DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE MAQUINA EXTRUSORA DE ARCILLA PARA IMPRESIÓN 3D

JARED MATEO RODRIGUEZ SANJUANELO

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN AUTOMATIZACIÓN

BOGOTÁ D.C. COLOMBIA

2025

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE MAQUINA EXTRUSORA DE ARCILLA PARA IMPRESIÓN 3D

JARED MATEO RODRIGUEZ SANJUANELO

Trabajo de grado presentada como requisito para optar al título de:

Ingeniero en Automatización

Director: PEDRO FERNANDO MARTIN GOMEZ

Ingeniero Mecánico, Ph.D.

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN AUTOMATIZACIÓN

BOGOTÁ D.C. COLOMBIA

2025

CONTENIDO

1 INTRODUCCION 1

2 NUEVAS TECNICAS UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCION EN TIERRA DE BLOQUES MODULARES DE ARCILLA EN IMPRESIÓN 3D 2

2.1 IMPRESIÓN 3D: 2

2.1.1 Fotopolimerización o estereolitografía: 3

2.1.2 Disposición de energía focalizada: 4

2.1.3 El laminado de hoja: 5

2.1.4 Fabricación aditiva por extrusión: 6

2.1.5 Tecnología de proyección de material: 7

2.1.6 Tecnología de proyección de material de aglutinante: 8

2.1.7 Multijet Fusion: 8

2.1.8 construcción con máquinas de impresión 3D: 9

2.1.9 Arcilla y/o cerámica de construcción: 11

2.2 INVESTIGACION SOBRE CONSTRUCCION ADITIVA PARA LA FABRICACION DE LADRILLOS MODULARES 13

2.2.1 Alcances y perspectivas de la implementación de las tecnologías de construcción aditiva en Colombia (Rivera F, 2018) 13

2.2.2 Fabricación aditiva con arcilla (Pérez J, 2022) 14

2.2.3 Diseño y construcción de un extrusor de arcilla para impresión 3d (Jiménez F et al, 2020) 16

2.2.4 Impresora 3D Argos y UNAL (Botero L, 2024) 19

3 DISEÑO TECNOLOGICO DE LA MAQUINA EXTRUSORA Y TABLERO ELECTRICO _____ 20

3.1 PRIMER DISEÑO DE EXTRUSORA _____ 20

3.2 SEGUNDO DISEÑO EXTRUSORA _____ 21

3.3 DISEÑO FINAL _____ 22

3.3.1 Base: _____ 23

3.3.2 Boquilla: _____ 24

3.3.3 Cilindro y base tolva: _____ 25

3.3.4 Soporte “1” del motor: _____ 26

3.3.5 Soporte “2” del motor: _____ 26

3.3.6 Platina: _____ 27

3.3.7 Soporte central del cilindro: _____ 28

3.3.8 Soporte delantero del cilindro: _____ 29

3.3.9 Tornillo sin fin: _____ 30

3.3.10 Tolva: _____ 31

3.3.11 Tapa: _____ 31

3.3.12 Soporte rodamiento: _____ 32

3.4 PLANOS DE LAS PIEZAS PARA EL PROTOTIPO DE EXTRUSORA _____ 33

3.5 CALCULOS _____ 33

3.6 PLANOS ELECTRICOS _____ 41

3.6.1 Manual del variador de velocidad _____ 43

3.6.2 Construcción del tablero eléctrico y configuración del variador de velocidad _____ 55

4 PRUEBAS DE LOS DIFERENTES SUBSISTEMAS DE LA MAQUINA EXTRUSORA Y PROGRAMACION DE TRAYECTORIAS CON EL ROBOT MOTOMAN. _____ 59

4.1 CONSTRUCCION DE LA MAQUINA EXTRUSORA. 59

4.1.1 Pruebas mecánicas del sistema. 68

4.2 PRUEBAS DE SISTEMA ELECTRICO. 76

4.3 PRUEBAS DE PROGRAMACION DE TRAYECTORIAS. 80

5 CONCLUSIONES 87

BIBLIOGRAFIA 88

ANEXOS 92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Impresión 3D.....3

Figura 2. Fotopolimerización o estereolitografía.....4

Figura 3. Disposición de energía focalizada.....5

Figura 4. El laminado de hoja.....6

Figura 5. Fabricación aditiva por extrusión. 7

Figura 6. Tecnología de proyección de material. 7

Figura 7. Tecnología de proyección de material de aglutinante. 8

Figura 8. Multijet Fusion.....9

Figura 9. Resultados de ensayo preliminares de extrusión de arcilla. 12

Figura 10. Calip-er 3D Clay Printer. 15

Figura 11. A. Impresión con overflow, B. Impresiones finales, C. Impresión con burbuja de aire. ..16

Figura 12. Ensamble extrusora y subsistemas.....18

Figura 13. A. Ensamble impresora 3D. B. Prueba de Extrusión.....18

Figura 14. Impresora 3D Argos y UNAL.....19

Figura 15. Primer diseño de la extrusora.....21

Figura 16. Segundo diseño de la extrusora. *22*

Figura 17. Diseño final de la extrusora. *23*

Figura 18. Base. *24*

Figura 19. Boquilla. *25*

Figura 20. Cilindro y base para la tolva. *25*

Figura 21. Soporte "1" del motor *26*

Figura 22. Soporte "2" del motor *27*

Figura 23. Platina. *28*

Figura 24. Soporte central del cilindro. *29*

Figura 25. Soporte delantero del cilindro. *30*

Figura 26. Tornillo sin fin. *30*

Figura 27. Tolva. *31*

Figura 28. Tapa. *32*

Figura 29. Soporte de rodamiento. *33*

Figura 30. Esquema eléctrico. *43*

Figura 31.Convertidores de 400 V AC. *44*

Figura 32. Posición del variador. *45*

Figura 33.Montaje en panel de armario. *45*

Figura 34. Conexión del variador. *46*

Figura 35. Selección de cable y apriete de tornillos. *47*

Figura 36. Diseño de armario conforme a los requisitos de CEM. *48*

Figura 37. Nomenclatura. *48*

Figura 38. Configuración de frecuencia del motor. *49*

Figura 39. Prueba de arranque del motor. *50*

Figura 40. Configuración de parámetros comunes. *50*

Figura 41. Señal de mando OFF1. ..... *51*

Figura 42. Señal de mando OFF2. ..... *52*

Figura 43. Señal de mando OFF3. ..... *52*

Figura 44. Configuración de la elevación de tensión. *53*

Figura 45. Frenado de motor DC secuencia 1. ..... *54*

Figura 46. Frenado de motor DC secuencia 2. ..... *55*

Figura 47. Tablero eléctrico. *56*

Figura 48. Configuración del variador.....57

Figura 49. Montaje del tablero eléctrico a la estructura de la maquina extrusora. Cambiar foto ...58

Figura 50. Mecanizado punta del tornillo sin fin 59

Figura 51. Chumacera con el eje del tornillo sin fin.....60

Figura 52. Fabricación de las hélices al eje. 60

Figura 53. Maqueta para la visualización de alojamiento del tornillo sin fin dentro del cilindro....61

Figura 54. Cilindro con su tornillo sin fin.....62

Figura 55. Soporte para rodamiento "6205".....62

Figura 56. flanche y chumacera. 63

Figura 57. Tornillo sin fin.....63

Figura 58. Medidas de la platina.....64

Figura 59. cilindro, boquilla y estructura. 64

Figura 60. Montaje del motor con la platina y estructura. 65

Figura 61. Cilindro y tolva. 66

Figura 62. Montaje eléctrico con conexión de toma eléctrica industrial. Cambiar foto.....67

Figura 63. Maquina extrusora. Cambiar fotooo 68

Figura 64. Arcilla natural para pruebas de extrusión. *69*

Figura 65. Proceso de alimentación de material para la máquina. *70*

Figura 66. Producto final. *71*

Figura 67. Resultado final del desmontaje tornillo sin fin. *72*

Figura 68. adherido de la arcilla con el cilindro. *73*

Figura 69. Pruebas de arcilla con arena y gravilla. *74*

Figura 70. Pieza mecanizada cónica y manguera industrial. *75*

Figura 71. Pruebas de relación entre frecuencia y velocidad del motor. *77*

Figura 72. Frecuencia vs velocidad del comportamiento del motor. *79*

Figura 73. Exportación de trayectorias del controlador al Software Motosim. *80*

Figura 74. Guardar las trayectorias en una memoria USB. *81*

Figura 75. Interfaz del motosim. *81*

Figura 76. Selección del controlador y robot. *82*

Figura 77. Robot motoman *83*

Figura 78. Cargar las trayectorias al motosim. *83*

Figura 79. Visualización de las trayectorias. *84*

Figura 80. Trayectorias realizadas de los ladrillos modulares. 85

Figura 81. Representación en 3D de los ladrillos modulares.....86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Alternativa de transporte de material *17*

Tabla 2. cálculos de potencia para el proceso de extrusión de arcilla. *36*

Tabla 3. HZ VS RPM. *76*

GLOSARIO

Impresión 3D: La impresión 3D es el proceso de creación de objetos mediante el depósito de capas de material unas sobre otras. La impresión 3D se denomina fabricación aditiva (3DEXPERIENCE Make, 2022).

Fabricación Aditiva: La fabricación aditiva se puede definir como el "Proceso de unión de materiales para realizar objetos desde un modelo digital de datos 3D, generalmente capa a capa, como oposición a los métodos de fabricación por sustracción tradicionales". (ASTM International, 2015)

Extrusión: La extrusión es el proceso más común de manufactura aditiva en el que un material semilíquido atraviesa una boquilla de impresión y construye objetos por capas sucesivas. (Rivera,2018, p.24)

Construcción aditiva: Se puede describir como un proceso de unir materiales para crear construcciones a partir de datos de modelos 3D donde los procesos de diseño, producción y montaje serán controlados digitalmente modelando una forma donde se superposicionen capas delgadas planas de conglomerado de cemento con un espesor constante que pueden apilarse entre sí. (Khan y Koc, 2021).

RESUMEN

En la actualidad, la tecnología está presente en casi todo lo que se encuentra a nuestro alrededor, esto incluye a la arquitectura y construcción; áreas que al ir innovando sus procesos de creación requieren de ciertos aportes tecnológicos en varias etapas. Una de estas es la construcción de piezas con características específicas que no son sencillas de fabricar, ya sea por el tamaño, la forma o el material con los requerimientos necesarios para su fin, entre otros. Ante esta problemática, se planteó como una posible solución la implementación de la impresión 3D, específicamente con arcilla de construcción. De aquí surgió el principal objetivo de este proyecto: extruir dicha arcilla con las condiciones de diseño de la máquina necesaria para posibilitar la impresión 3D de bloques modulares de construcción en tierra. El proyecto se centró en el diseño y construcción de un prototipo de extrusora. Como parte de la validación, se propuso realizar la impresión 3D de algunos diseños de ladrillos modulares desarrollados por la facultad de Arquitectura. Para la impresión 3D, fue necesario programar las trayectorias requeridas en el robot Motoman, con el objetivo de dar forma tridimensional al ladrillo de arcilla elaborado. Se realizaron pruebas funcionales con el objetivo de evaluar el comportamiento integral de cada uno de los subsistemas que conforman el proyecto. Estas pruebas permitirán verificar el desempeño del sistema mecánico, el sistema eléctrico y el módulo de programación de trayectorias implementado en el robot Motoman. En conclusión, los resultados experimentales confirmaron que la extrusora es capaz de trabajar de manera continua y precisa, con un rendimiento óptimo en el proceso de extrusión y con la consistencia necesaria para asegurar la repetitividad en futuras pruebas y aplicaciones de ladrillos modulares.

Palabras claves: Máquina, arcilla, impresión 3D, extruir, construcción en tierra

ABSTRACT

Today, technology is present in almost everything around us, including architecture and construction; areas that, as their creation processes continue to innovate, require certain technological input at various stages. One of these is the construction of pieces with specific characteristics that are not easy to manufacture, whether due to size, shape, or the material's requirements for their purpose, among others. Faced with this problem, the implementation of 3D printing, specifically with construction clay, was proposed as a possible solution. This led to the main objective of this project: to extrude said clay under the machine's design conditions necessary to enable the 3D printing of modular building blocks in earth. The project focused on the design and construction of an extruder prototype. As part of the validation process, 3D printing of some modular brick designs developed by the Faculty of Architecture was proposed. For 3D printing, the required trajectories had to be programmed into the Motoman robot, with the goal of giving the clay brick a three-dimensional shape. Functional tests were performed to evaluate the overall performance of each of the project's subsystems. These tests will verify the performance of the mechanical system, the electrical system, and the trajectory programming module implemented in the Motoman robot. In conclusion, the experimental results confirmed that the extruder can operate continuously and precisely, with optimal performance in the extrusion process and with the consistency necessary to ensure repeatability in future modular brick tests and applications.

Keywords: Machine, clay, 3D printing, extrusion, earth construction

1 INTRODUCCION

En los últimos años, la impresión 3D ha emergido como una tecnología revolucionaria en diversos sectores, incluyendo la industria de la construcción. Esta técnica permite fabricar estructuras tridimensionales con una alta precisión, reducción de tiempos y optimización de recursos. Sin embargo, la mayoría de las soluciones de impresión 3D aplicadas actualmente en construcción utiliza materiales como cemento u hormigón, los cuales presentan altos costos económicos y un impacto ambiental significativo.

Un aspecto crucial que esta problemática afecta de manera desproporcionada es a la vivienda de poblaciones vulnerables. A pesar de las ayudas gubernamentales, la oferta de vivienda es insuficiente y las limitaciones de acceso a zonas remotas en el territorio nacional obstaculizan la implementación de soluciones efectivas. La mayoría de las máquinas de impresión 3D existen son de gran tamaño, lo que dificulta su transporte y despliegue en estos lugares de difícil acceso.

Ante este panorama, nuestra investigación busca integrar los beneficios de la impresión 3D al sector de la construcción, específicamente a las técnicas tradicionales basadas en tierra. Nos enfocamos en las ventajas de la impresión 3D para la creación de formas tridimensionales complejas, lo que permitirá diseñar soluciones eficientes y estáticas. En este contexto, la impresión 3D compacta y de alta eficiencia, capaz de fabricar ladrillos modulares de arcilla de construcción. Esta máquina, por su tamaño se permitirá su traslado a zonas no accesibles. Convirtiendo una solución viable para las problemáticas mencionadas. Además, la facilidad de impresión de bloques modulares en 3D permite la creación de diseños irregulares con una estética diferenciada y a su vez simplifica el proceso de ensamble modular para obtener superficies de mayor tamaño.

La viabilidad de esta propuesta se aborda mediante la formulación de la siguiente pregunta de investigación ¿Es posible la construcción de bloques modulares de arcilla de forma no convencionales impresos en 3D? Para dar respuesta a esta interrogante, este trabajo de grado tiene como objetivo general diseñar y construir un prototipo de máquina extrusora para la impresión 3D de ladrillos modulares en tierra. El desarrollo incluye el diseño del prototipo, su construcción física, la validación funcional mediante pruebas experimentales y la programación de trayectorias del robot motoman para automatizar el proceso de impresión. Con este trabajo se pretende demostrar la viabilidad de aplicar la técnica de impresión 3D en tierra como una herramienta efectiva y sostenible para resolver problemas de viviendas en poblaciones vulnerables.

2 NUEVAS TECNICAS UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCION EN TIERRA DE BLOQUES MODULARES DE ARCILLA EN IMPRESIÓN 3D

Las nuevas tecnologías en el sector de la construcción han permitido la incorporación de métodos innovadores que reducen significativamente la intervención humana en los procesos de construcción. La implementación de sistemas automatizados mediante una máquina extrusora, diseñada para la fabricación de ladrillos modulares de arcilla.

El desarrollo y aplicación de esta metodología se realiza cumpliendo rigurosamente con las normativas vigentes, tales como las Sismo Resistente (NRS-10), Reglamento Colombiano de Construcción Sostenible (RCCS), NTC 6658, NTC-ISO 15686, ISO/TC 261 fabricación aditiva. Estas normativas garantizan que el uso de tecnologías emergentes como la impresión 3D en arcilla cumpla con los estándares de seguridad estructural y sostenibilidad.

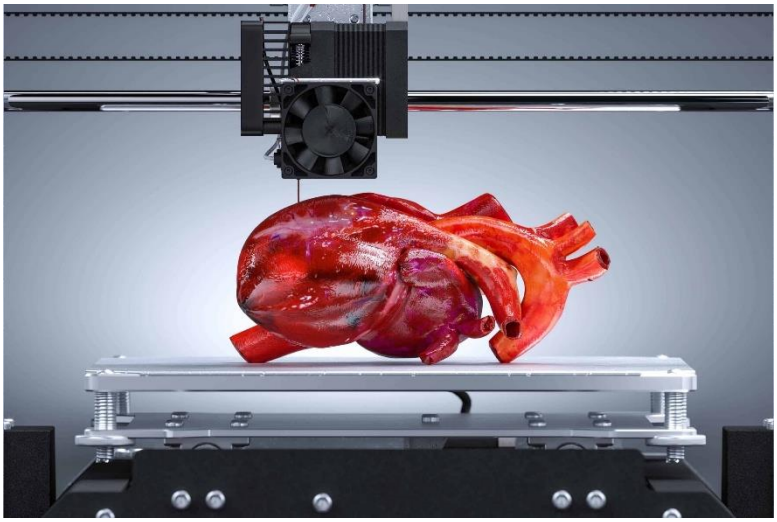
2.1 IMPRESIÓN 3D:

La idea de generar objetos sin una intervención humana muy presente, viene desde los años 40, donde se tienen antecedentes de publicaciones en revistas de ideas de ciencia ficción donde se menciona la idea de Ochoa A, (2023)" brazos mecánicos capaces de construir casas en el aire dibujándolas con un plástico especial, como el descrito en la historia corta "Things Pass By" de Leinster Murray". Dejando de lado las ideas de ciencia ficción, unos años más tarde, específicamente en 1971 se encuentra la primera patente que podemos relacionar con la impresión 3D, esta tiene como título Liquid Metal Recorder (Ochoa A, 2023) "inventado en 1971 por Johannes F. Gottwald. Una máquina compuesta por un inyector y una placa reutilizable que tendría como función utilizar materiales con un bajo punto de fusión mezclados con pigmentos para imprimir símbolos y caracteres sobre una superficie pre escogida". Proceso semejante al que se conoce hoy día como impresión FDM, Fused Deposition Modelling, cuyo proceso también cosiste en la fundición de materiales sobre una base siguiendo una ruta que resulte en la construcción de las secciones del objeto. (Ochoa A, 2023, p.2)

De aquí damos un salto hasta 1984, donde después de varias nuevas propuestas, avances e ideas sobre este tema, Chuck Hull acuñó el término "estereolitografía" para describir la generación de objetos por medio de capas que se endurecen formando su sección transversal, ya de aquí partimos al año 2000 en adelante, pues en el 2005 surgió el "proyecto RepRap, una iniciativa open source que produciría una impresora FDM capaz de autorreplicarse

e imprimir las piezas necesarias para construir una nueva impresora con la misma máquina" Ochoa A, (2023), luego de esto, esta tecnología inundó el mercado con la creación de varias empresas, ya que era de uso libre y fácil de reproducir, pues a partir del 2006 la gran mayoría de las patentes relacionadas con esta tecnología se volvieron de uso libre (Figura 1).

Figura 1. Impresión 3D.

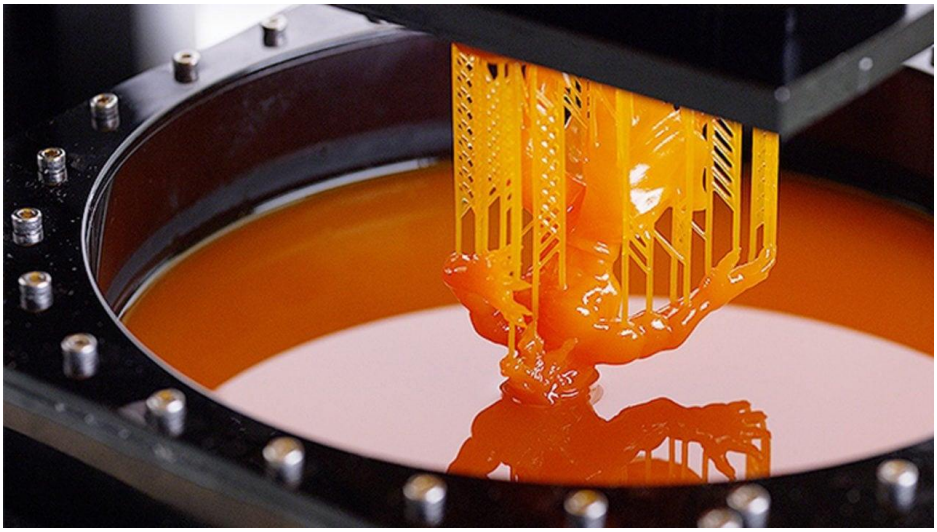


Fuente: 3DEXPERIENCE Make (2022).

2.1.1 Fotopolimerización o estereolitografía:

La fotopolimerización en tanque consta de un tanque con un polímero fotosensible, es la técnica con la que charles Hull creó la primera impresión 3D. Existe una plancha móvil la cual se sumerge en la cuba, cuando esta está sumergida se le aplica una luz ultravioleta que barre la zona que quiere que se quede solidificada según el modelo CAD. Estas técnicas suelen necesitar un curado y un post procesado que consta en retirar los soportes y limpiar el líquido sobrante (Figura 2).

Figura 2. Fotopolimerización o estereolitografía.



Fuente: Susana, S. (2017).

2.1.2 Disposición de energía focalizada:

Es la técnica más compleja, no se suele usar para fabricar piezas desde cero sino en la industria para reparaciones o para modificaciones, es una mezcla entre las impresoras de proyección en lecho de polvo y las de extrusión. Con una fuente de energía ya puede ser láser o un haz de electrones se calienta el material hasta que este se encuentre en punto de fusión, a la vez que esta tecnología añade material. Es una tecnología cara y compleja (Figura 3).

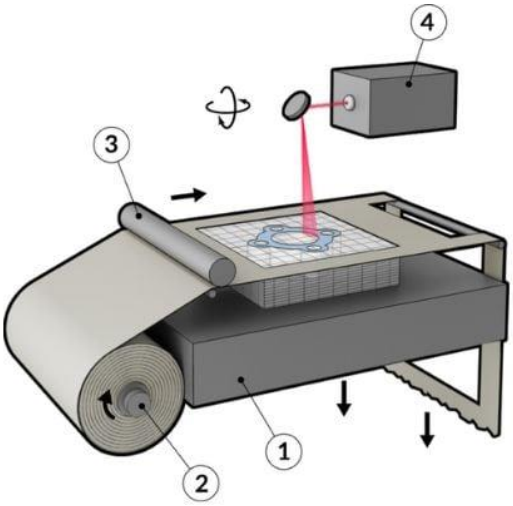
Figura 3. Disposición de energía focalizada.

Fuente: Lucia, C. (2019).

2.1.3 El laminado de hoja:

Es un sistema poco frecuente en el cual se cortan hojas con un láser y estas se colocan unas encima de otras provocando así un modelo 3D (Figura 4).

Figura 4. El laminado de hoja.

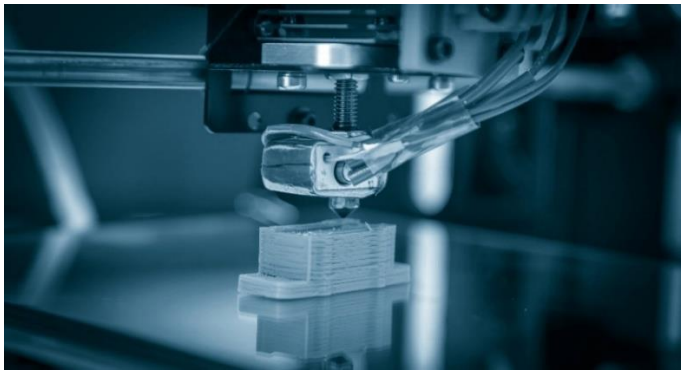


Fuente: Alicia, M. (2023).

2.1.4 Fabricación aditiva por extrusión:

Es la técnica más popular. La técnica trata de la extrusión por capas de cierto material hasta construir el objeto 3D. Es la técnica más extendida por la cantidad de materiales que se pueden utilizar y el mecanismo sencillo que tiene de funcionamiento. Otras ventajas son que no deja residuos en la mayoría de sus procesos, es decir el post procesado es muy simple. Al ser las impresoras más comunes existe gran cantidad de código abierto que se puede reutilizar para crearte tu propia impresora (Figura 5).

Figura 5. Fabricación aditiva por extrusión.



Fuente: Hiperbaric. (2020)

2.1.5 Tecnología de proyección de material:

Se depositan gotas de cera que más tarde serán curadas también con luz ultravioleta. La técnica es muy similar a las impresoras de impresión por tinta solo que en vez de imprimir en una sola capa lo hacen en múltiples capas (Figura 6).

Figura 6. Tecnología de proyección de material.

Fuente: Idelt. (2024)

2.1.6 Tecnología de proyección de material de aglutinante:

Existe otra técnica de proyección, pero esta vez de aglutinante, existe un lecho de polvo sobre el que se echa un aglutinante que cuando solidifica se retira el polvo sobrante y obtenemos la pieza final, muchas veces se necesita un chorro de aire para retirar bien el polvo (Figura 7).

Figura 7. Tecnología de proyección de material de aglutinante.

Fuente: Lucia, C. (2023).

2.1.7 Multijet Fusion:

Una tecnología similar es la del Multijet Fusion de HP, en el 2016 la empresa multinacional sacó al mercado esta nueva técnica, la cual aplica una capa de aglutinante y el polvo por encima y con infrarrojos se calienta el aglutinante. Lo que diferencia esta técnica de las otras, como la de proyección de aglutinante, es que cuando se aplica una capa la anterior sigue fundida por lo que las capas se fusionan mejor haciendo las impresiones con más duración y con mayor detalle (Figura 8).

Figura 8. Multijet Fusion

Fuente: 3dmitech. (s/f).

2.1.8 Construcción con máquinas de impresión 3D:

Como menciona Rivera F (2018) en su investigación. En 1997 comenzaron las primeras exploraciones de la aplicación de la construcción automatizada. Esta tecnología estaba en sus inicios y se basaba en el principio de depositar cemento portland en una capa basada en arena (Pegna, 1997).

Posteriormente, en 1998 el profesor Berokh Khoshnevis de la Universidad del Sur de California desarrolló el primer proceso de construcción aditiva que se ha estandarizado: Contour Crafting. Este, es un proceso automatizado de construcción que requiere de una máquina controlada por un computador y que está dirigida a construir casas monolíticamente utilizando la extrusión de concreto según Wang & Ju.

En 2007, Enrico Dini construyó lo que para la época era la impresora más grande del mundo: la D-Shape. El proceso empleado en esta impresora se basaba en la técnica de lecho de polvo o (powder feed) creada en 1993; a diferencia de las impresoras que partían de la extrusión de materiales, esta tecnología procura aglutinar materiales de construcción en polvo para formar objetos tridimensionales. Sin embargo, su aplicación en la construcción requería un cambio importante en el tamaño de los objetos creados, lo que en sí resulta en el desarrollo de una tecnología propia según Lowke.

A partir de estas innovaciones se ha desarrollado toda una industria: se han logrado aplicar los principios de la fabricación aditiva a la construcción y se han conseguido nuevos avances tecnológicos. Entre algunas de las técnicas desarrolladas están la Stone Spray, la C-Fab y la Big Delta (Wang & Ju, 2017). Además de esto, diferentes empresas han realizado aportes al desarrollo de la construcción aditiva; entre otras, se pueden destacar las siguientes: Qindago, Unique Techonology, WinSun Decoration Design Engineering Co, Contour Crafting, Be More 3D, Apis Cor y DUS Architects según Hamidreza.

La industria de la construcción aditiva se ha desarrollado en los principales polos de desarrollo tecnológico en el mundo: China, Estados Unidos, Rusia, países europeos y Emiratos Árabes Unidos.

En particular, China es el país con mayores avances a nivel comercial de la construcción aditiva. En efecto, para 2017, las constructoras Winsun Decoration Design Engineering Co y Huashang Tengda lograron construir un edificio de 5 plantas, 10 viviendas de pequeño tamaño y dos “Villas‟

Por otra parte, el emirato de Dubái se ha interesado particularmente en el desarrollo de esta tecnología ya que no solamente inauguraron en 2016 la denominada “primera oficina impresa en 3D” (Dubai Future Foundation, s.f.) sino que además el gobierno lanzó recientemente la “Estrategia de impresión 3D de Dubái‟ o Dubái 3D Pintan Strategy, que estipula que para 2025 “al menos un 25% de toda edificación nueva debe ser impresa con esta tecnología” según Dubái Future Foundation en las páginas 15 y 16.

2.1.9 Arcilla y/o cerámica de construcción:

La idea de implementar arcilla o materiales similares para la construcción se da por diferentes factores, para este caso particular nos interesamos en dos de ellos principalmente y es la capacidad de la tecnología de impresión 3D de hacer posible crear diseños complejos que optimicen la construcción de estructuras. También el bajo costo al utilizar los suelos como materia prima, trayendo consigo otros beneficios como una baja huella ambiental.

El desarrollo de este tipo de materiales trae consigo el estudio de sus propiedades como las reológicas ya que estas propiedades gobiernan el transporte del material a través del sistema de bombeo y determinan la estabilidad de la capa después de la deposición. Cuando un material se transporta al cabezal de impresión en el sistema de bombeo, se produce un fenómeno conocido como "flujo pistón" debido a la mayor viscosidad del material. Este estado de flujo produce una pérdida de presión, lo que ralentiza el caudal y requiere que la bomba proporcione más energía. Según el modelo de Buckingham-Reiner, la pérdida de presión de los materiales que fluyen a través de un conducto está determinada por dos factores: límite elástico y viscosidad. Idealmente, una mezcla debe tener un límite elástico dinámico y una viscosidad bajos para garantizar un flujo suave y eficiente. Sin embargo, después de ser extruido de la boquilla, para permanecer estable, el límite elástico estático del material debe elevarse rápidamente.

La preparación de arcillas se hace de diferentes formas, materiales y procesos, dependiendo de las necesidades que busca cumplir, la aplicación y las propiedades. Para el caso de arcillas para construcción aditiva que es la aplicación que se busca en este proyecto existen variedad de opciones, unas mejores que otras, recalcando que pueden ser aplicadas para construcciones a diferentes escalas, propósitos y expuestas a diferentes condiciones.

Un ejemplo es la arcilla descrita y estudiada por (Yazeed A. Al-Noaimat. 2023) que corresponde a la combinación de piedra caliza y arcilla calcinada, la cual podría ser una alternativa prometedora, que ofrece diversos beneficios, incluida la sustitución del OPC (Ordinary Portland Cement) en proporciones elevadas. Donde se analiza críticamente el efecto de las diferentes proporciones de arena a aglutinante, el contenido de aditivos, los niveles de reemplazo de OPC, el grado y la calcinación de la arcilla y los aditivos sobre las propiedades frescas, endurecidas y de impresión de las mezclas impresas en 3D.

El comportamiento preliminar de las mezclas de arcillas desarrolladas, para lo cual fueron seleccionadas las dos mezclas con mayor probabilidad de ser extruida en la máquina, de acuerdo con su consistencia y sus propiedades. Facilidad de extrusión de la mezcla en húmedo, grado de humectación o características físicas de consistencias y fluidez entre otras. Presión de extrusión requerida y tiempo de fraguado y máxima consistencia. Se hicieron pruebas de extrusión de diferentes formas, comenzando por la preparación de arcilla con diferentes grados de consistencia, humedad y/o fluidez; con el objeto de determinar las propiedades físicas aproximadas que se requiere para extruir el material, estas muestras fueron solidificadas alcanzando una buena consistencia entre el término de una hora y el día siguiente (Figura 9).

Figura 9. Resultados de ensayo preliminares de extrusión de arcilla.

Fuente: Martin, P. (2025).

2.2 CONSTRUCCION ADITIVA PARA LA FABRICACION DE LADRILLOS MODULARES

Durante el desarrollo del presente proyecto, se llevó a cabo una investigación sobre los avances y aplicaciones de la construcción aditiva, con énfasis de la impresión de ladrillos modulares en material como la arcilla, se analizaron diversos artículos científicos y documentos técnicos, lo cual permitió identificar tanto las oportunidades como los desafíos inherentes al proceso de fabricación aditiva en tierra.

2.2.1 Alcances y perspectivas de la implementación de las tecnologías de construcción aditiva en Colombia (Rivera F, 2018)

Este trabajo tuvo como objetivo general establecer el alcance y las perspectivas de la construcción aditiva en Colombia y proponer líneas de investigación de la tecnología pertinentes para la industria de la construcción.

Como se menciona en los objetivos se inicia con la definición de términos y procesos relacionados, seguida de la búsqueda de antecedentes de la construcción aditiva en documentos académicos, con los que se describieron los procesos usados, sus características, costos, beneficios y los tipos de equipos más utilizados o con mayor potencial para la construcción aditiva, como, el Contour Crafting, Concrete Printing, Cellular Fabrications, entre otros. Luego de la contextualización sobre el tema a tratar, se procede a conocer la perspectiva de la implementación de esta tecnología en Colombia por medio de preguntas específicas que permitan cubrir el tema a tratar hechas a personas de interés relacionadas de alguna forma con la industria de la construcción, arquitectura e ingeniería.

La encuesta elaborada cuenta con 14 preguntas y se divide en cinco grandes partes:

- La primera parte, busca recolectar los nombres y categorizar por grupos poblacionales a cada una de las personas encuestadas
- La segunda parte, cuenta con un breve resumen de los avances tecnológicos en la construcción aditiva en el mundo entero para establecer una base común de conocimientos entre los encuestados. Además de esto, se busca poder confrontar esta información obtenida con la información previa que se tenia

- La tercera parte, busca brindar información sobre la percepción que se tiene de la tecnología, estableciendo las ventajas y desventajas que tienen un mayor impacto en la industria de la construcción.
- La cuarta parte, busca aportar información sobre la percepción que se tiene respecto a la posible implementación de la construcción aditiva en Colombia.
- La quinta parte, busca identificar elementos y formular unas posibles líneas de investigación de la tecnología para que se pueda acelerar su implementación.

Aquí es importante mencionar que según los resultados de la encuesta muestra que los encuestados respondieron que la principal aplicación, con una considerable diferencia respecto a las demás, es la fabricación de elementos no estructurales con formas inusuales (60,47%), lo que se puede relacionar con el objetivo de nuestro proyecto.

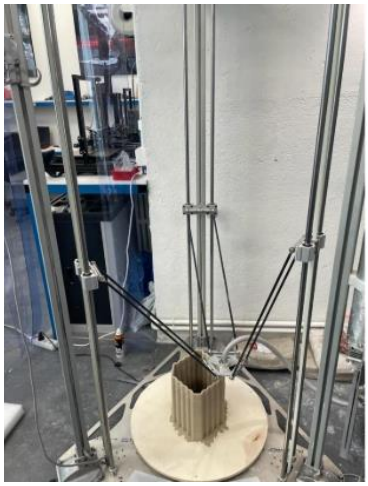
2.2.2 Fabricación aditiva con arcilla (Pérez J, 2022)

El proyecto se lleva a cabo con el objetivo de obtener una impresora 3D cerámica totalmente funcional para la elaboración de proyectos solicitados por los clientes de la empresa. Otro objetivo es desarrollar la propia rama de proyectos de la empresa, mostrando así el potencial de la empresa. El objetivo del proyecto es una impresora que tenga implantada la técnica de extrusión delta y cuyo material de extrusión sea arcilla.

Descripción del modelo/sistema/herramienta

El modelo se fundamentó en una impresora 3D tipo delta, utilizando la arcilla como material base de extrusión. Este tipo de impresoras se caracteriza por estar compuesto por tres ejes verticales, donde el movimiento del extrusor no se desarrolla en coordenadas cartesianas, sino en coordenadas cilíndricas, a través del desplazamiento vertical de cada uno de los ejes. Entre las principales ventajas de las impresoras delta se destaca su mayor velocidad y la calidad superior de los acabados obtenidos. No obstante, presentan como principal desventaja la complejidad del sistema, ya que requiere la conversión de todos los movimientos a coordenadas polares (Figura 10).

Figura 10. Calip-er 3D Clay Printer.



Fuente: Pérez J. (2022)

Resultados:

En el caso de este proyecto los resultados son los propios objetos impresos. Ha existido una notoria evolución en las figuras impresas por diferentes parámetros. El parámetro más influyente es el caudal de material extruido, Flow en inglés. Este parámetro se mide en m^3/s, es tan influyente para controlar el overflow que genera una pared de mayor espesor del deseado y una alteración tanto estética como dimensional del objeto, por el otro lado tendríamos el underflow, este problema lo que implica es que no exista el material solicitado en el momento por lo que las capas no serían homogéneas y la figura no se podría imprimir. El material de impresión es de suma importancia, existen gran variedad de arcillas en el mercado, en esta impresora se han realizado impresiones con arcilla blanca, la más habitual. La arcilla se imprime húmeda, es un parámetro muy relevante, este parámetro influye en la densidad del material de extrusión que se traslada al sistema de extrusión, si la arcilla está muy hidratada no opondrá resistencia ya que la fricción es menor y existirá un overflow, si no está suficientemente húmeda las presiones en el sistema de extrusión serán muy elevadas provocando rupturas. La densidad influye a la hora de la consistencia del objeto impreso, si la densidad es baja las paredes no soporta el peso de la propia arcilla por lo que pueden existir derrumbamientos. El otro gran problema que se observa en las piezas es la existencia de

bolsas de aire en el sistema de extrusión. Estas bolsas de aire se traducen en capas que no se llegan a imprimir debido a que no se extruye material y solo aire (Figura 11).

Figura 11. A. Impresión con overflow, B. Impresiones finales, C. Impresión con burbuja de aire.

A. B. C.

Fuente: Pérez J. (2021)

2.2.3 Diseño y construcción de un extrusor de arcilla para impresión 3d (Jiménez F et al, 2020)

El objetivo de esta investigación fue diseñar y construir un extrusor de arcilla para impresión 3d, en respuesta y como alternativa a los altos costos que presentan los materiales convencionales (PLA, ABS). Con esto se ampliaría el campo de acción de la impresión 3d hacia otros sectores de la industria y la artesanía.

Se realizaron dos pruebas de funcionamiento una de control semiautomático (desplazamiento de boquilla manual y extrusión controlada) y otra completamente controlada con las cuales se comprobó el cumplimiento de las expectativas funcionales y económicas planteadas, llegando a extruir un volumen definido de material, sin embargo, resulta poco práctico para fabricación de piezas de gran volumen ya que no cuenta con alimentación continua de material.

Alternativas de sistemas mecánicos

Para la elección del sistema se realizó una breve evaluación de las posibles alternativas de transporte de arcilla, por lo cual se tuvieron en cuenta las ventajas y desventajas de cada alternativa. Para poder limitar los sistemas se seleccionaron tres diferentes sistemas de transmisión mecánica: Piñón-Cremallera, Tornillo de potencia y Tornillo Sinfín. Los dos primeros cuentan con un sistema de cilindro pistón y el último genera la presión necesaria debido a la reducción cónica que presenta a lo largo de su geometría. A fin de elegir el Sistema más adecuado según los requerimientos de la investigación se tomaron en cuenta los siguientes criterios de selección: costo, complejidad de fabricación, eficiencia y adaptabilidad a la impresora que posee la universidad (Tabla 1).

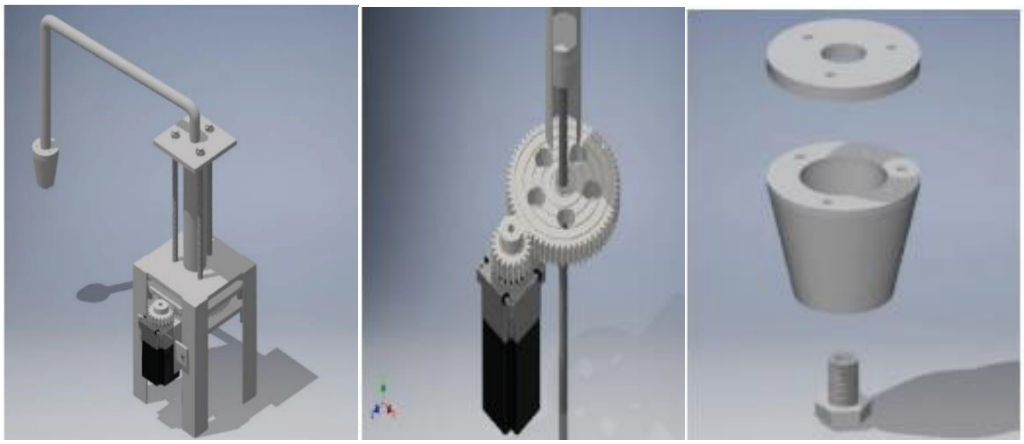
Tabla 1. Alternativa de transporte de material

	Sistema de transporte de material		
	Piñón-cremallera	Tornillo de potencia	Tornillo sin fin
Costos	Alto	Baja	Alto
Fabricación	Medio	Baja	Alto
Eficiencia	Medio	Medio	Máximo
Adaptabilidad	Complejo	Medio	Sencillo

Fuente: Jiménez F et al. (2021)

Después del análisis efectuado se determina que la mejor opción es el tornillo de potencia, debido a que este tiene las características óptimas para el proyecto desarrollado (Figura 12).

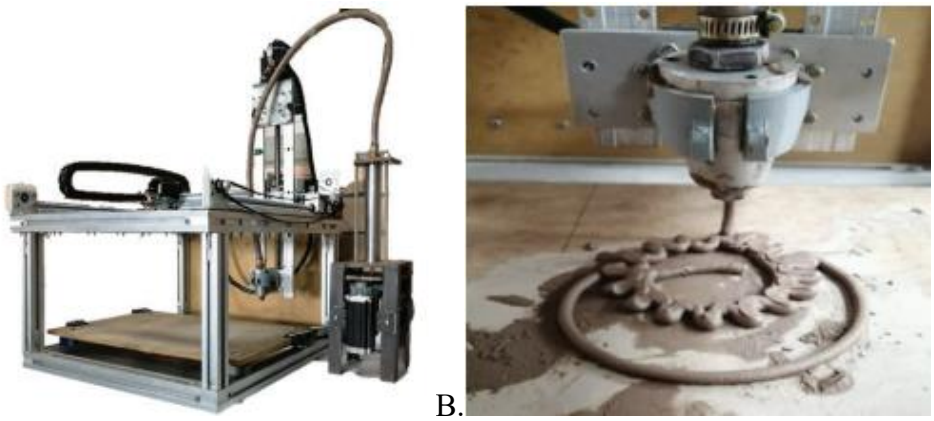
Figura 12. Ensamble extrusora y subsistemas.



Fuente: Jiménez F et al. (2021).

Por último, se realizó la construcción del prototipo y se hicieron pruebas de extrusión (Figura 13).

Figura 13. A. Ensamble impresora 3D. B. Prueba de Extrusión.



Fuente: Jiménez F et al. (2021).

2.2.4 Impresora 3D Argos y UNAL (Botero L, 2024)

Por medio de una alianza entre la Universidad Nacional (sede Medellín) y Cementos Argos se creó la impresora 3D más grande de Suramérica. Capaz de construir los muros de una vivienda de 50 metros cuadrados en 32 horas continuas.

Tomás Restrepo, vicepresidente de Futuro de Cementos Argos asegura que, La automatización de los procesos constructivos y la flexibilidad en la arquitectura que nos provee la impresora 3D nos permitirán potenciar la eficiencia en los proyectos y disminuir costos y tiempos.

De acuerdo con Cementos Argos, la impresora 3D podría reducir los costos de material hasta en 20 %, aumentar la productividad de personal de obra hasta 30 %, disminuir el tiempo de construcción entre 10 % y 20 % y mitigar el desperdicio entre 15 % y 30 %.

Una de las ventajas de esta tecnología es que da libertad en diseños, formas y texturas. De allí que pueda ofrecer opciones de vivienda personalizadas. Desde ya, los equipos de la empresa y la universidad avanzan en la construcción de una vivienda completa para el segundo semestre de 2024 (Figura 14).

Figura 14. Impresora 3D Argos y UNAL.

Fuente: Botero L. (2024)

3 DISEÑO TECNOLOGICO DE LA MAQUINA EXTRUSORA Y TABLERO ELECTRICO

El diseño de la máquina extrusora fue representado mediante el software SolidWorks, herramienta especializada en diseño asistido por computadora (CAD). Con esta se logró elaborar de forma precisa cada uno de los componentes mecánicos que conforman el sistema. Asimismo, se desarrollaron los ensamblajes y se ejecutaron simulaciones de movimiento, lo cual permitió visualizar de manera clara el funcionamiento del conjunto.

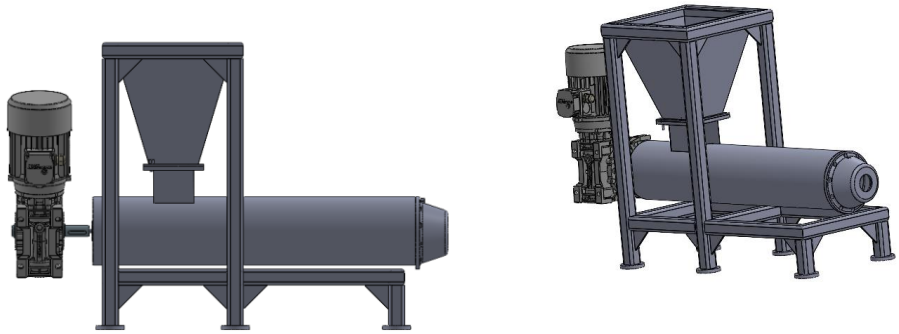
El diseño del sistema de control y la distribución eléctrica se realizó utilizando el software CADe_SIMU. Esta plataforma permitió la elaboración de los planos eléctricos necesarios para la conexión y operación de actuador y variador de velocidad.

3.1 PRIMER DISEÑO DE EXTRUSORA

El diseño de la máquina extrusora se realizó utilizando el software SolidWorks, una herramienta tipo CAD que proporciona un entorno gráfico intuitivo y eficiente para la creación de modelos sólidos en 3D, ensamblajes y planos técnicos. Estos elementos serán presentados a lo largo del capítulo.

En la elaboración del primer prototipo se utilizó el software SolidWorks y la función de ensamble. Este modelo inicial incluye componentes como una base que sostiene la cama de extrusión y la tolva con su respectivo motor trifásico que va unida al tornillo sin fin. Sim embargo, se identificó la falta de optimizar, ya que se requiere que la estructura sea fácil de montar y desmontar para el mantenimiento. El diseño presenta varias limitaciones, no es fácil de ensamblar, falta de transporte y la estabilidad es crítica porque no soporta altas presiones (Figura 15).

Figura 15. Primer diseño de la extrusora.

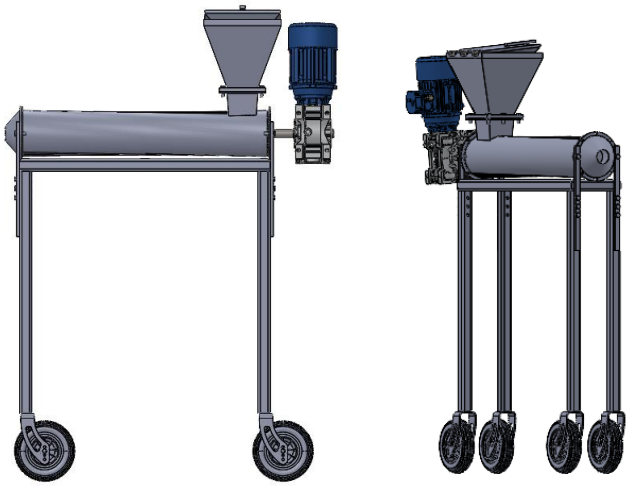


Fuente: Autoría propia.

3.2 SEGUNDO DISEÑO EXTRUSORA

En el segundo diseño, se optimizó el modelo inicial, logrando una estructura más fácil de montar y desmontar, lo cual facilitó las tareas de mantenimiento. Se incorporaron cuatro ruedas que permiten al operario transportar el equipo sin mayor esfuerzo. No obstante, se identificó un problema crítico relacionado con la altura y la ausencia de soportes estructurales, lo cual afectó la estabilidad general de la máquina. El centro de masa se vio comprometido, ya que el peso del motor generó un desequilibrio que provocó la inclinación de la estructura hacia el lado del motor, comprometiendo así la estabilidad del proceso de extrusión (Figura 16).

Figura 16. Segundo diseño de la extrusora.



Fuente: Autoría propia.

3.3 DISEÑO FINAL

El prototipo final representa varios ensambles para la extrusión de arcilla para la tierra. Se explicará el funcionamiento de cada pieza para obtener el diseño final de la extrusión de arcilla (Figura 17).

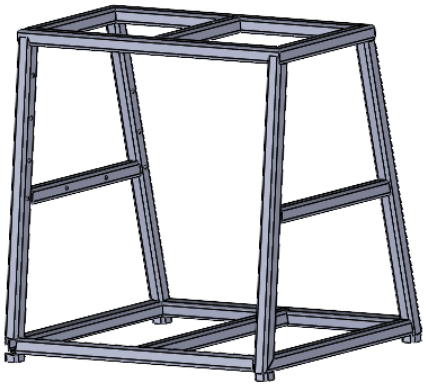
Figura 17. Diseño final de la extrusora.

Fuente: Autoría propia.

3.3.1 Base:

La estructura de la base será ensamblada con perfiles de hierro, seleccionando por su alta resistencia y capacidad de carga, lo que contribuye a un centro de masa estable y minimiza el riesgo de balanceo, garantizando una mayor rigidez gracias a los soportes y reduciendo las vibraciones no deseadas durante el proceso de extrusión (Figura 18).

Figura 18. Base.

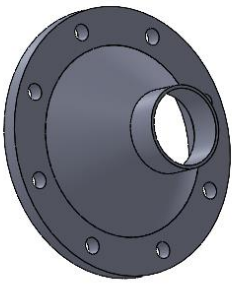


Fuente: Autoría propia.

3.3.2 Boquilla:

La boquilla es el elemento terminal del sistema de extrusión, diseñada para garantizar una salida uniforme del material (Arcilla). Estará acoplada a una manguera industrial de alta resistencia mediante una abrazadera de sujeción para asegurar una conexión hermética y evitando perdida de presión. Su geometría cónica facilita el flujo del material y minimizando la resistencia interna lo que permite una extrusión eficiente y continua de la arcilla. Se acoplará al flanche del cilindro para una mayor rigidez en el ensamble de las piezas (Figura 19).

Figura 19. Boquilla.

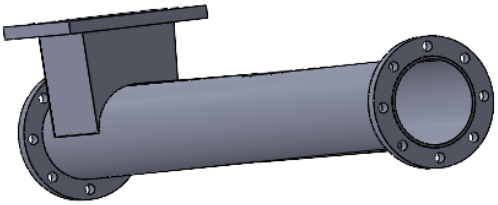


Fuente: Autoría propia.

3.3.3 Cilindro y base tolva:

El cilindro fue diseñado con dos flanches en sus extremos, lo que facilita la unión tanto de la tapa como de la boquilla. Sobre la superficie del cilindro se procederá a soldar la base de la tolva, permitiendo así una integración estructural adecuada entre ambos componentes. (Figura 20).

Figura 20. Cilindro y base para la tolva.

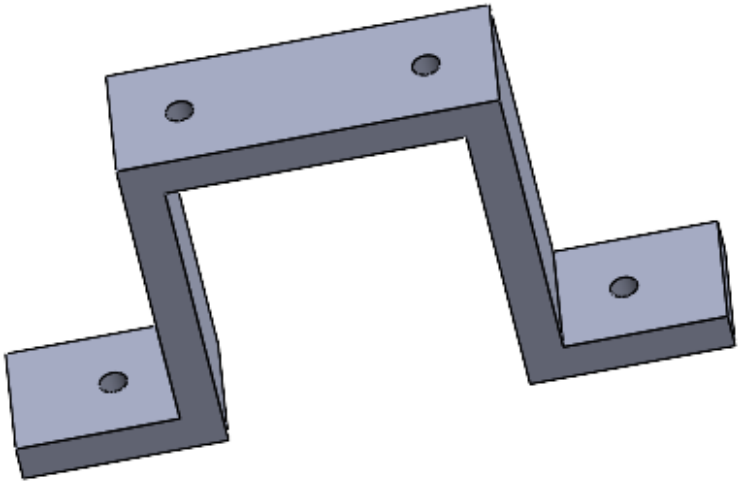


Fuente: Autoría propia.

3.3.4 Soporte “1” del motor:

El soporte “1” funciona como un elemento de fijación para conectar el motor a la platina garantizando la estabilidad del conjunto evitando vibraciones y desplazamientos no deseados durante el proceso de extrusión (Figura 21).

Figura 21. Soporte "1" del motor

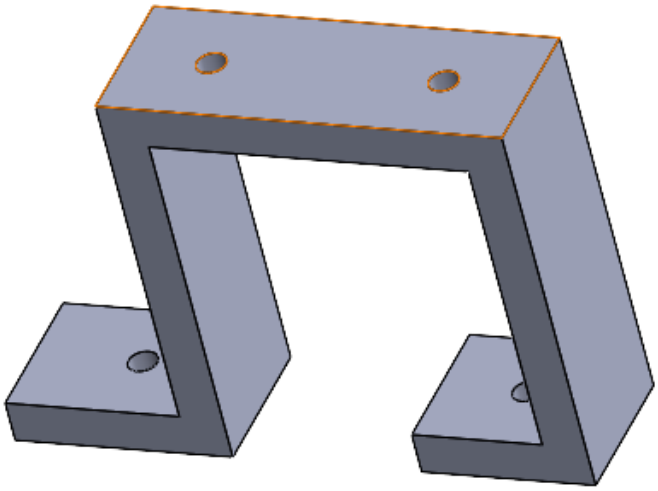


Fuente: Autoría propia.

3.3.5 Soporte “2” del motor:

El soporte “2” funciona como un elemento de fijación para conectar el motor a la platina garantizando la estabilidad del conjunto evitando vibraciones y desplazamientos no deseados durante el proceso de extrusión (Figura 22):

Figura 22. Soporte "2" del motor

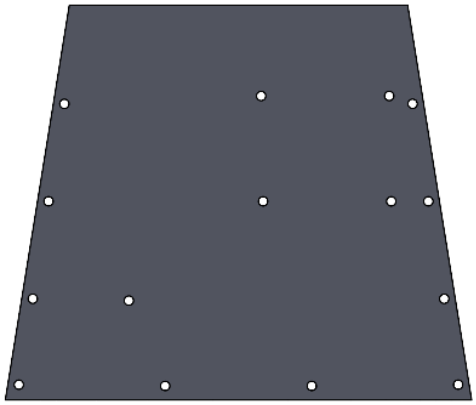


Fuente: Autoría propia.

3.3.6 Platina:

La platina funciona como elemento de soporte y conexión entre la base y el motor. Los soportes “1” y “2” actúan como fijaciones del motor a la platina, lo que permite garantizar la estabilidad del conjunto y evitar desplazamientos o vibraciones durante el proceso de extrusión. En la Figura 18 se puede observar la conexión entre el motor, la platina y la base. (Figura 23).

Figura 23. Platina

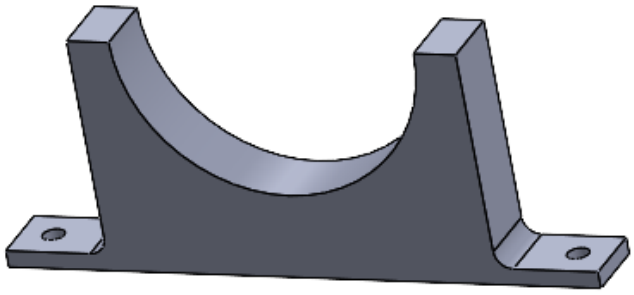


Fuente: Autoría propia.

3.3.7 Soporte central del cilindro:

El soporte central está fijado en el centro de la base y tendrá la función de estabilizar y apoyar el cilindro para evitar desplazamientos durante el proceso de extrusión (Figura 24).

Figura 24. Soporte central del cilindro.

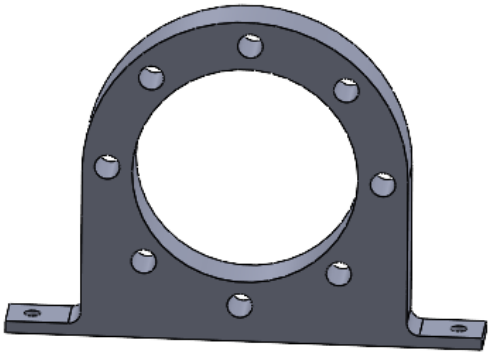


Fuente: Autoría propia.

3.3.8 Soporte delantero del cilindro:

El soporte delantero estará fijado en la base y el flanche del cilindro, proporcionando una mejor estabilidad para evitar desplazamientos del sistema. Este componente está diseñado para absorber las cargas mecánicas generadas por el proceso de extrusión aumentando su rigidez y garantizando las condiciones de alta presión y esfuerzo operativo (Figura 25)

Figura 25. Soporte delantero del cilindro.



Fuente: Autoría propia.

3.3.9 Tornillo sin fin:

El tornillo sin fin cuenta con dos ranuras en sus extremos se colocarán dos arandelas de fijación axial de las piezas ensambladas con el eje, se coloca dos soportes de rodamiento "Figura 30" en cada extremo del tornillo (Figura 26).

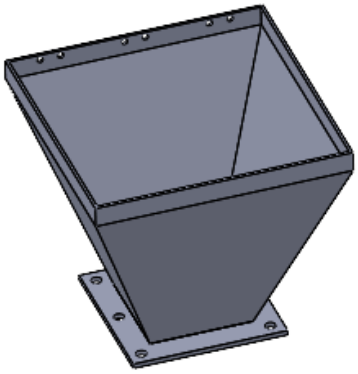
Figura 26. Tornillo sin fin.

Fuente: Autoría propia.

3.3.10 Tolva:

La tolva presenta una geometría de cono invertido para almacenar el material “Arcilla”, se incorporará una tapa con manija que facilitará al operario el desplazamiento de la arcilla; está conectada a la base del cilindro mediante tornillos (Figura 27).

Figura 27. Tolva.

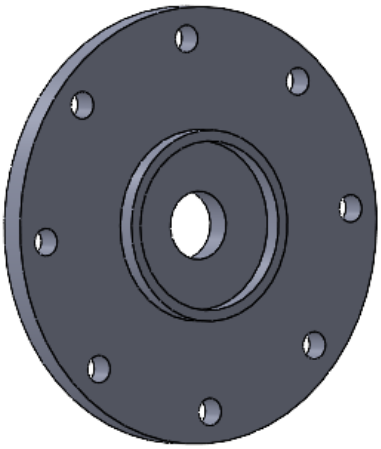


Fuente: Autoría propia.

3.3.11 Tapa:

La tapa va conectada al flanche trasero del cilindro. Esta pieza será mecanizada para alojar un retenedor de aceites de referencia SKF con dimensiones d35xD62xb7 cuya función principal es prevenir posibles fugas de fluidos, en este caso, arcilla durante el proceso de extrusión (Figura 28).

Figura 28. Tapa.

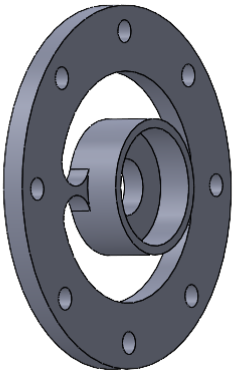


Fuente: Autoría propia.

3.3.12 Soporte rodamiento:

El soporte de rodamiento va en los extremos del tornillo sin fin. Esta pieza será mecanizada para alojar el rodamiento con referencia “6205” cuya función principal es reducir la fricción y facilitar el movimiento del tornillo sin fin ayudando a soportar cargar y aumentar la eficiencia (Figura 29).

Figura 29. Soporte de rodamiento.



Fuente: Autoría propia.

3.4 PLANOS DE LAS PIEZAS PARA EL PROTOTIPO DE EXTRUSORA

En este documento se presentan los planos técnicos de la extrusora, donde se detallan las dimensiones(mm) totales de cada una de sus piezas. Estos planos son fundamentales para la fabricación y ensamblaje, permitiendo una correcta interpretación de sus componentes y sus especificaciones. A través de estas representaciones gráficas, se garantiza la precisión en la manufactura y el ajuste adecuado de cada parte dentro del sistema de extrusión para la construcción de la máquina (Anexos 1 al 4).

3.5 CALCULOS

El manual de diseño de sistemas de transporte de la empresa Coneyor Eng & Mfg determinan el tamaño y la velocidad de un transporte de tornillo, primero es necesario establecer el código del material y la capacidad de diseño.

$$Capacidad\ de\ diseño = Capacidad\ requerida \times Factor\ de\ capacidad(s) \quad \text{Ec.1}$$

$$Capacidad\ de\ diseño = 0.006m^3 \times 1.0 = 0.006m^3 \qquad \text{Ec.2}$$

La velocidad de transportador (N) se determina mediante la formula “Ec 8”.

- Diámetro Externo (D_e)= 0.098 in
- Diámetro Interno (D_i)= 0.0254 in
- Paso de hélice= 0.051m.
- Porcentaje de llenado (L)= 45%=0.45
- Capacidad de diseño (Q)= $0.212 {ft^3}/{h}$

La ecuación de un área transversal donde fluye el material:

$$A = \frac{\pi}{4}(D_e^2 - D_i^2) \qquad \text{Ec.3}$$

- A= Área en metros cuadradas

$$A = \frac{\pi}{4}(0.098_e^2 - 0.0254_i^2) = 0.0074m^2 \qquad \text{Ec.4}$$

Capacidad por revoluciones

$$Volumen\ por\ revoluciones = A \times Paso \times \%\ llenado \qquad \text{Ec.5}$$

$$V_{rev} = 0.0074 \times 0.051 \times 0.45 = 0.00568 {ft^3}/{rev} \qquad \text{Ec.6}$$

N=Revoluciones por minuto del tornillo, sin superar la velocidad máxima recomendada.

$$N = \frac{Capacidad\ de\ diseño\ (ft^3/hr)}{Capacidad\ de\ revoluciones\ (ft^3/rev)} \qquad \text{Ec.7}$$

$$N = \frac{0.212}{0.00568} = 37.3RPM \qquad \text{Ec.8}$$

Potencia para mover el material

- Longitud (L) = 2.66 ft
- N(RPM) = 37
- diámetro (F_d) = 1.0
- bearning (F_b) = 1.0
- Capacidad de diseño (D_c) = 0.212 ft^3/h
- peso del material (W) = 168.5 lb/ft^3
- materia (F_m) = 1.2
- sobrecarga (F_o) = 1.5
- eficiencia (e)=0.85

$$HP_m = \frac{D_c \times L \times W \times F_m}{100} \qquad \text{Ec.9}$$

$$HP_m = \frac{0.212 \times 2.66 \times 168.5 \times 1.2}{100} = 0{,}114HP \qquad \text{Ec.10}$$

Potencia por fricción

$$HP_f = \frac{F_d \times L \times N \times F_b}{100} \qquad \text{Ec.11}$$

$$HP_f = \frac{1.0 \times 2.66 \times 37 \times 1.0}{100} = 0{,}984HP \qquad \text{Ec.12}$$

HP total

$$HP_{total} = \frac{(HP_m + HP_f)f_o}{e} \qquad \text{Ec.13}$$

$$HP_{total} = \frac{(0.984 + 0{,}114)1.5}{0.85} = 1{,}292\ HP \qquad \text{Ec.14}$$

Se procede a hacer los cálculos de diseño del tornillo sin fin teniendo en cuenta un volumen de material mínimo de 4 – 5 litros, volumen necesario para impresión de aproximadamente, un mampuesto de cualquier diseño geométrico propuesto. Con estas condiciones fueron aplicados los cálculos de dimensionamiento del tornillo a partir de datos como: presión de trabajo (800 psi), el diámetro medio (1 – 3 pulgadas), paso del tornillo (1 pulg), Longitud del tornillo (0,5 – 1 m), coeficiente de fricción arcilla-metal (0,6), calculando: área de sección transversal de empuje del tornillo, fuerza de empuje o extrusión requerida (N), Torque requerido para girar el tornillo (N-m), velocidad de giro del tornillo (rpm) entre 5 y 30 rpm y la Potencia requerida para realizar la extrusión de la mezcla con las condiciones descritas anteriormente (tabla 2)

Tabla 2. cálculos de potencia para el proceso de extrusión de arcilla.

CALCULO DE TORNILLO DE EXTRUSION - FORMULA DE DISEÑO													
PRESION	DIAMETRO MEDIO	PASO	LONGITUD	COEF. FRICCIÓN	AREA	FUERZA	a	b	TORQUE	VEL GIRO	VEL. ANGULAR	POTENCIA	POTENCIA
(Psi)	(pulg)	(m)	(m)		(pulg2)	(N)			(N-m)	(rpm)	(rad/s)	(W)	(HP)
800	1	0,0508	0,81	0,6	0,7854000	2795,38286	1,93576	3,11112	22,0891888	10	1,0472	23,1317985	0,03100777
800	1,5	0,0508	0,5	0,6	1,7671500	6289,61143	2,87824	4,68192	73,6583204	10	1,0472	77,1349931	0,10339811
800	2	0,0508	0,5	0,6	3,1416000	11181,5314	3,82072	6,25272	173,544652	10	1,0472	181,73596	0,24361389
800	2,5	0,0508	0,5	0,6	4,9087500	17471,1429	4,7632	7,82352	337,723798	10	1,0472	353,664361	0,47408091
800	3	0,0508	0,5	0,6	7,0686000	25158,4457	5,70568	9,39432	582,17137	10	1,0472	609,649859	0,81722501
800	1	0,0508	0,7	0,6	0,7854000	2795,38286	1,93576	3,11112	22,0891888	10	1,0472	23,1317985	0,03100777
800	1,5	0,0508	0,7	0,6	1,7671500	6289,61143	2,87824	4,68192	73,6583204	10	1,0472	77,1349931	0,10339811
800	2	0,0508	0,7	0,6	3,1416000	11181,5314	3,82072	6,25272	173,544652	10	1,0472	181,73596	0,24361389
800	2,5	0,0508	0,7	0,6	4,9087500	17471,1429	4,7632	7,82352	337,723798	10	1,0472	353,664361	0,47408091
800	3	0,0508	0,7	0,6	7,0686000	25158,4457	5,70568	9,39432	582,17137	10	1,0472	609,649859	0,81722501
800	1	0,0508	1	0,6	0,7854000	2795,38286	1,93576	3,11112	22,0891888	10	1,0472	23,1317985	0,03100777
800	1,5	0,0508	1	0,6	1,7671500	6289,61143	2,87824	4,68192	73,6583204	10	1,0472	77,1349931	0,10339811
800	2	0,0508	1	0,6	3,1416000	11181,5314	3,82072	6,25272	173,544652	10	1,0472	181,73596	0,24361389
800	2,5	0,0508	1	0,6	4,9087500	17471,1429	4,7632	7,82352	337,723798	10	1,0472	353,664361	0,47408091
800	3	0,0508	1	0,6	7,0686000	25158,4457	5,70568	9,39432	582,17137	10	1,0472	609,649859	0,81722501

Fuente: Martin, P. (2025).

Se realizó el cálculo con las ecuaciones del Excel seleccionando los parámetros más apropiados para el diseño del tornillo sin fin según el volumen de material de extrusión estimado:

- Presión (P)= 800 psi.
- Diámetro medio(D)= 1 in
- Paso de hélice= 0.0508m.
- Longitud del tornillo sin fin(L)= 0.81m.
- Coeficiente de fricción(μ)= 0.6μ.

La ecuación de un área transversal de un cilindro es:

$$A = \frac{\pi}{4} \times D^2 \qquad \text{Ec.15}$$

- A= Área en pulgadas cuadradas
- D= Diámetro medio en pulgadas.

$$A = \frac{\pi}{4} \times 1^2 = 0{,}7854 in^2 \qquad \text{Ec.16}$$

La ecuación de presión es fuerza sobre área

- *F*= fuerza (*N*).
- *P*= presión (Pa).
- *A*= Área (m^2).

Convertimos las unidades de presión y área

- 1 psi= 6894.76 Pa.
- 1 in^2= 0.00064516m^2.

Aplicamos la presión de 800 psi y un área de $0.7854 in^2$.

- 800 psi= 800*6894.76=5,515,808 Pa.
- $0.7854 in^2$=0.7854*0.00064516=0.0005067m^2.

Entonces se obtiene *F*:

$$F = 5{,}515{,}808 \times 0.0005067 = 2795.38 \text{ N} \qquad \text{Ec.17}$$

Ecuación para "a" es una representación de un parámetro geométrico:

- a = Relación del paso respecto al radio.
- Coeficiente de fricción(μ)= 0.6μ.
- Diámetro medio(D)= 1 in

$$a = 1 + \pi \times \mu \times \mathrm{D} \qquad \text{Ec.18}$$

$$a = 1 + \pi \times 0.6 \times 1 = 2{,}885\ \mathrm{D} \qquad \text{Ec.19}$$

Ecuación para "b" es el factor de fricción:

- Coeficiente de fricción(μ)= 0.6μ.
- b = Factor de fricción.
- Diámetro medio(D)= 1 in.
- Longitud del tornillo sin fin(L)= 0.81m.

$$b = \pi \times D - (\mu \times \mathrm{L})\ \mathrm{D} \qquad \text{Ec.20}$$

$$b = \pi \times 1 - (0.6 \times 0.81) = 2{,}656\ \mathrm{D} \qquad \text{Ec.21}$$

Ecuación para torque (T):

- T = Torque(N-m).
- F = Fuerza (N).
- Diámetro medio(D)= 1 in.
- a = Relación del paso respecto al radio.
- b = Factor de fricción.
- Radio (r)= 0.0254.

$$T = \frac{(F \times D \times a)}{(2 \times b)} * r \text{ D} \qquad \text{Ec.22}$$

Reemplazar la ecuación 8 en 9 para obtener T:

$$T = \frac{(2795.38 \times 1 \times 2.885)}{(2 \times 2.656)} * 0.0254 = 38{,}57 N - m \text{ D} \qquad \text{Ec.23}$$

Ecuación de velocidad angular (w):

- w = velocidad angular(rad/s).
- Velocidad de giro(N) = 10 RPM
- 2 π=radianes en una vuelta completa
- 60 = conversión de minutos a segundos

$$w = \frac{2\pi \times N}{60} \qquad \text{Ec.24}$$

$$w = \frac{2\pi \times 10}{60} = 1{,}0472 rad/s \qquad \text{Ec.25}$$

Ecuación de potencia en Watts (W):

- P = potencia (W).

- T = Torque(N-m).
- w = velocidad angular(rad/s).

$$P(W) = T \times w \qquad \text{Ec.26}$$

$$P(W) = 38.57 \times 1.0472 = 40{,}39W \qquad \text{Ec.27}$$

Ecuación de potencia en HP

- HP = potencia en caballos de fuerza.
- P = Potencia en Watts.
- 746 = Factor de conversión (1 HP = 746 W).

$$HP = \frac{P}{746} \qquad \text{Ec.28}$$

Se obtiene *HP*:

$$HP = \frac{40.39}{746} = 0{,}0541\ HP \qquad \text{Ec.29}$$

Cálculos para el volumen de la tolva

- Lado superior de la tolva= 246mm.
- Lado inferior de la tolva= 100mm.
- Altura de la tolva= 200mm.
- Área 1=246^2= 60,516mm^2
- Área 2=100^2= 10,000mm^2
- H= 200mm

Ecuación de volumen V:

$$V = \frac{h}{3}(A1 + A2 + \sqrt{A1 \times A2}) \qquad \text{Ec.30}$$

$$V = \frac{200}{3}\left(60{,}516 + 10{,}000 + \sqrt{60{,}516 \times 10{,}000}\right) = 6340{,}931mm^3 \qquad \text{Ec.31}$$

El volumen total calculado fue de 6,34 litros, valor que corresponde a la cantidad necesaria para llenar tanto la tolva como la extrusora. Este volumen garantiza que el sistema disponga del material suficiente para mantener un proceso de extrusión continuo y estable, permitiendo la fabricación de los ladrillos modulares en 3D sin interrupciones por falta de alimentación de arcilla.

3.6 PLANOS ELECTRICOS

El esquema muestra un circuito de potencia y control para un motor trifásico conectado a un variador de velocidad. Se dividirá la explicación en dos partes: circuito de potencia y circuito de control.

La alimentación trifásica entra por L1, L2, L3 y pasa por el interruptor -Q, si el conector KM esta activado(cerrado), la corriente fluye hacia las terminales R, S, T del variador convirtiendo la entrada trifásica en una salida de frecuencia y voltaje variable que controla la velocidad del motor.

Circuito de potencia:

El circuito de potencia se encarga de alimentar el motor trifásico a través del variador de velocidad.

- Fuente de alimentación trifásica: las terminales L1, L2, L3 son las fases Y PE es la conexión a tierra por seguridad representa la entrada de alimentación trifásica a 400V a nivel industrial.

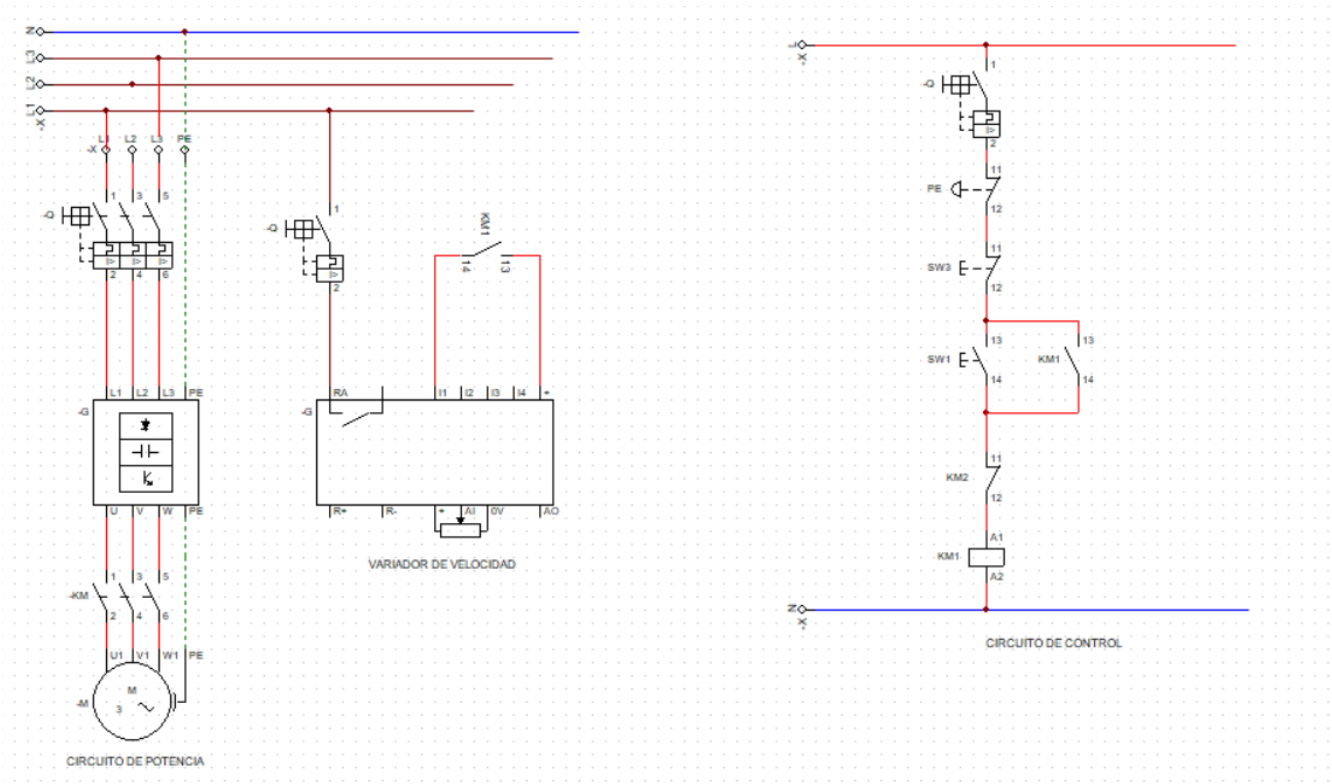
- Interruptor -Q: Es un interruptor automático trifásico que protege el circuito completo contra sobrecargas y cortocircuitos.
- Contactor KM: Este contactor conecta y desconecta la alimentación trifásica al variador de velocidad.
- Variador de velocidad: Recibe la alimentación trifásica en sus terminales (R, S, T) y sus salidas (U, V, W) se conectan al motor trifásico para controlar su velocidad mediante una señal análoga que se representara por un potenciómetro industrial.

Circuito de control:

El circuito de control se encarga de gestionar el encendido, apagado del motor y variador.

El Arranque del sistema comienza con el interruptor -Q debe estar cerrado (contacto 11-12), si el relé RA no detecta fallos el circuito de control puede operar. Al presionar el pulsador S1 se energiza la bobina de KM. Esto cierra los contactos KM1 en el circuito de potencia (KM), alimentando el variador. Al presionar el pulsador S2, se interrumpe el circuito de control, desactivando la bobina de KM1, esto abre los contactos KM, cortando la alimentación del variador y deteniendo el motor (Figura 30).

Figura 30. Esquema eléctrico.



Fuente: Autoría propia.

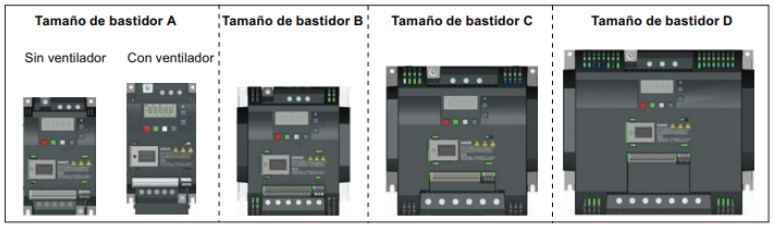
3.6.1 Manual del variador de velocidad

El variador de velocidad permite regular la velocidad del motor, lo que a su vez controla directamente la velocidad de rotación del tornillo sin fin. Para este propósito, se seleccionó el variador de referencia “6SL3210-5BE21-1CV0”, el cual permite controlar un motor trifásico con alimentación a 220 V, asegurando un funcionamiento eficiente y adaptable a las condiciones del proceso de extrusión.

Toda la información presentada del variador se basa en el manual de SIEMENS. (2013). Convertidor SINAMICS V20. Los convertidores de 400 V AC trifásicos están disponibles en

cuatro tamaños de bastidor en el cual vamos a utilizar el bastidor A con ventilador con referencia “6SL3210-5BE21-1CV0” (Figura 31).

Figura 31.Convertidores de 400 V AC.

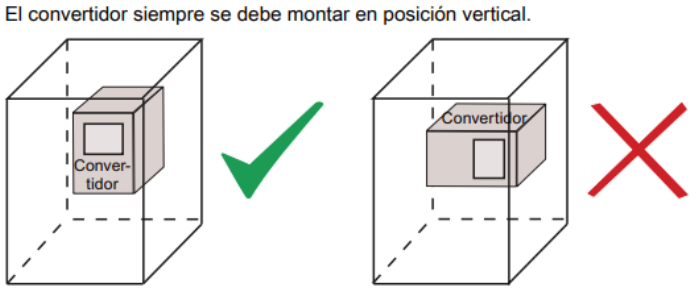


Componente	Potencia nominal de salida	Corriente nominal de entrada	Corriente nominal de salida	Corriente de salida a 480 V a 4 kHz/40 °C	Referencia	
					No filtrado	Filtrado
Tamaño de bastidor A (sin ventilador)	0,37 kW	1,7 A	1,3 A	1,3 A	6SL3210-5BE13-7UV0	6SL3210-5BE13-7CV0
	0,55 kW	2,1 A	1,7 A	1,6 A	6SL3210-5BE15-5UV0	6SL3210-5BE15-5CV0
	0,75 kW	2,6 A	2,2 A	2,2 A	6SL3210-5BE17-5UV0	6SL3210-5BE17-5CV0
	0,75 kW 1)	2,6 A	2,2 A	2,2 A	-	6SL3216-5BE17-5CV0
Tamaño de bastidor A (con un ventilador)	1,1 kW	4,0 A	3,1 A	3,1 A	6SL3210-5BE21-1UV0	6SL3210-5BE21-1CV0
	1,5 kW	5,0 A	4,1 A	4,1 A	6SL3210-5BE21-5UV0	6SL3210-5BE21-5CV0
	2,2 kW	6,4 A	5,6 A	4,8 A	6SL3210-5BE22-2UV0	6SL3210-5BE22-2CV0
Tamaño de bastidor B (con un ventilador)	3,0 kW	8,6 A	7,3 A	-	6SL3210-5BE23-0UV0	6SL3210-5BE23-0CV0
	4,0 kW	11,3 A	8,8 A	8,24 A	6SL3210-5BE24-0UV0	6SL3210-5BE24-0CV0
Tamaño de bastidor C (con un ventilador)	5,5 kW	15,2 A	12,5 A	11 A	6SL3210-5BE25-5UV0	6SL3210-5BE25-5CV0
Tamaño de bastidor D (con dos ventiladores)	7,5 kW	20,7 A	16,5 A	16,5 A	6SL3210-5BE27-5UV0	6SL3210-5BE27-5CV0
	11 kW	30,4 A	25 A	21 A	6SL3210-5BE31-1UV0	6SL3210-5BE31-1CV0
	15 kW	38,1 A	31 A	31 A	6SL3210-5BE31-5UV0	6SL3210-5BE31-5CV0

Fuente: SIEMENS. (2013).

Orientación de montaje y espacio libre, el convertidor se debe montar en un área cerrada que opere eléctricamente o en un armario de control, el convertidor siempre se debe montar en posición vertical (Figura 32).

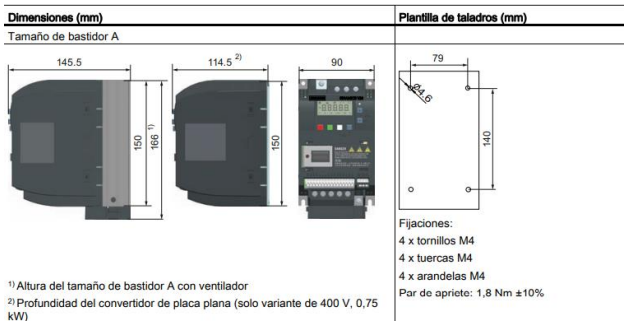
Figura 32. Posición del variador.



Fuente: SIEMENS. (2013).

El montaje presenta las dimensiones físicas y la plantilla de taladros para el montaje del variador de velocidad Siemens V20 en su versión con tamaño de bastidor A, que corresponde a los modelos más compactos (Figura 33).

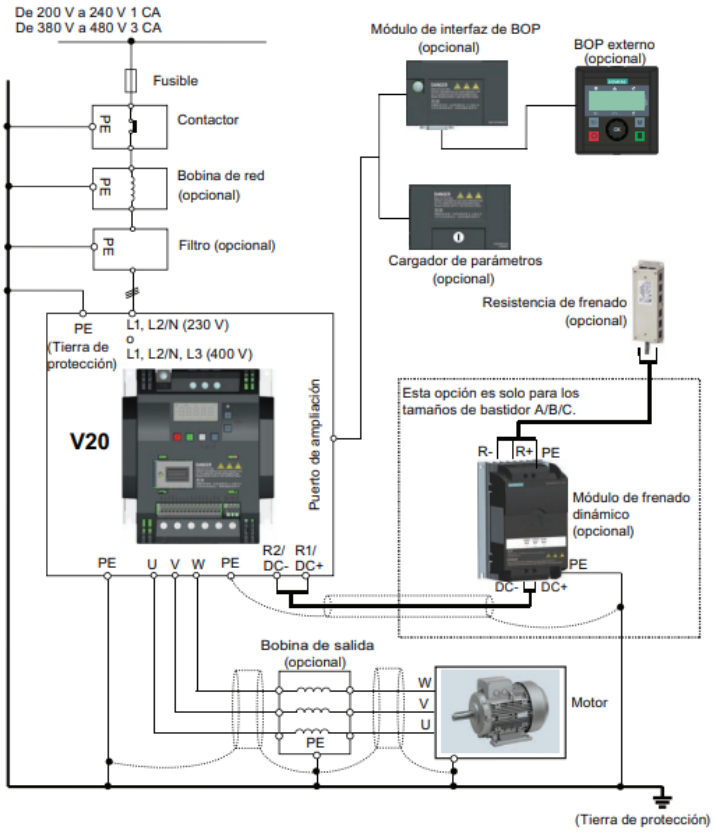
Figura 33.Montaje en panel de armario.



Fuente: SIEMENS. (2013).

El diagrama general de conexión del variador de velocidad V20, utilizado para controlar un motor trifásico. El sistema puede funcionar con alimentación monofásica (200–240 V) o trifásica (380–480 V), y permite una variedad de elementos opcionales para adaptarse a diferentes aplicaciones industriales (Figura 34).

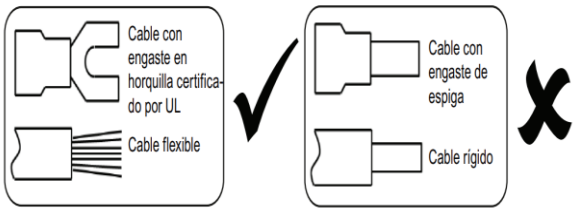
Figura 34. Conexión del variador.



Fuente: SIEMENS. (2013).

Secciones de cable recomendado y pares de apriete de tornillo para los variadores de Siemens V20 (Figura 35).

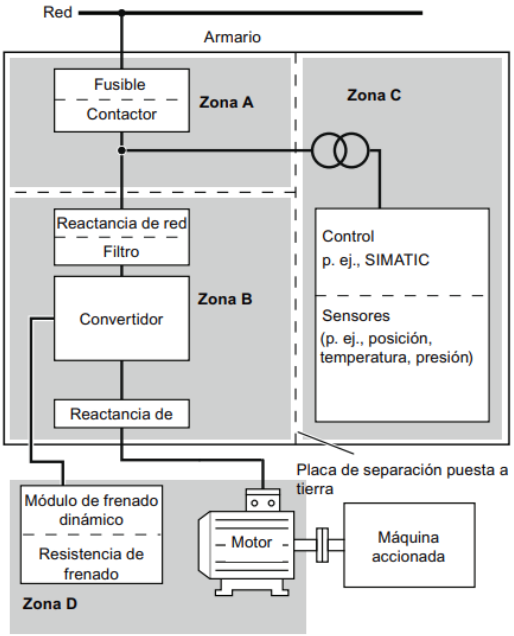
Figura 35. Selección de cable y apriete de tornillos.



Fuente: SIEMENS. (2013).

Diseño de armario conforme a los requisitos de compatibilidad electromagnética (CEM) es implementar medidas de supresión de interferencias dentro del armario de control es asegurarse de que esas fuentes de interferencias y el equipo potencialmente susceptibles se instalan por separados el uno al otro (Figura 36).

Figura 36. Diseño de armario conforme a los requisitos de CEM.



Fuente: SIEMENS. (02013).

Se muestra las visualizaciones básicas de la pantalla del variador (Figura 37).

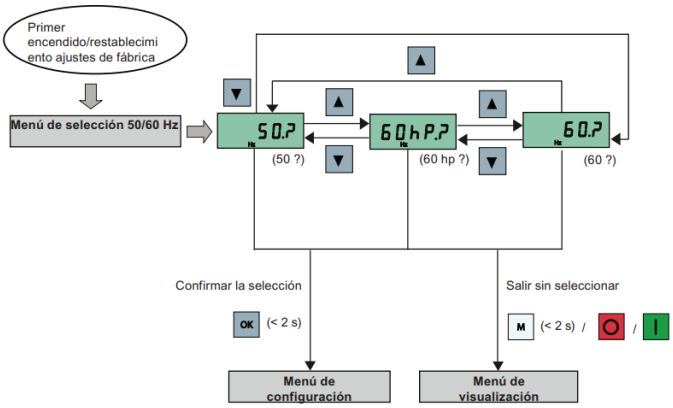
Figura 37. Nomenclatura.

"A"	A	"G"	g	"N"	n	"T"	t
"B"	b	"H"	h	"O"	o	"U"	U
"C"	C	"I"	i	"P"	P	"V"	u
"D"	d	"J"	J	"Q"	q	"X"	H
"E"	E	"L"	L	"R"	r	"Y"	y
"F"	F	"M"	n	"S"	S	"Z"	2
De 0 a 9	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					"?"	.P

Fuente: SIEMENS. (2013).

Configuración del menú de selección de 50/60 HZ es visible en el primer encendido o tras un restablecimiento de los ajustes de fábrica, la frecuencia básica del motor también se puede seleccionar cambiando P0100 al valor deseado. La potencia nominal del motor P0307 se expresan en “kW” o “hp” (Figura 38).

Figura 38. Configuración de frecuencia del motor.



Fuente: SIEMENS. (2013).

Arranque del motor para la marcha de prueba se describe como arrancar el motor para una marcha de prueba para así comprobar que la velocidad del motor y la dirección de rotación son correctas. Para arrancar el motor, el convertidor debe estar en el menú de visualización y el estado predeterminado de conexión debe tener P0700 (selección de la fuente de señal de mando) =1.

Si ya está en el menú de configuración (el convertidor muestra “P0304”) pulse M durante más de dos segundos para salir al menú de configuración y entrar en el menú de visualización, puede arrancar el motor en modo HAND o JOG (Figura 39).

Figura 39. Prueba de arranque del motor.

Arranque del motor en modo HAND

1. Pulse I para arrancar el motor.
2. Pulse O para parar el motor.

Arranque del motor en modo JOG

1. Pulse M + OK para pasar del modo HAND al JOG (el icono parpadea).
2. Pulse I para arrancar el motor. Suelte I para parar el motor.

Fuente: SIEMENS. (2013).

Configuración de parámetros comunes: se proporciona algunos parámetros para la optimización del rendimiento del convertidor, si establece P8553 en 1, los números de los parámetros de este menú se sustituyen por un texto breve (Figura 40).

Figura 40. Configuración de parámetros comunes.

Parámetro	Nivel de acceso	Función	Menú de texto (si P8553 = 1)
P1080[0]	1	Frecuencia mínima del motor	MIN F (MIN F)
P1082[0]	1	Frecuencia máxima del motor	MAX F (MAX F)
P1120[0]	1	Tiempo de aceleración	rMPUP (RMP UP)
P1121[0]	1	Tiempo de deceleración	rMPdn (RMP DN)
P1058[0]	2	Frecuencia de JOG	JOGP (JOG P)
P1060[0]	2	Tiempo de aceleración de JOG	JOGUP (JOG UP)
P1001[0]	2	Consigna de frecuencia fija 1	FIXF1 (FIX F1)

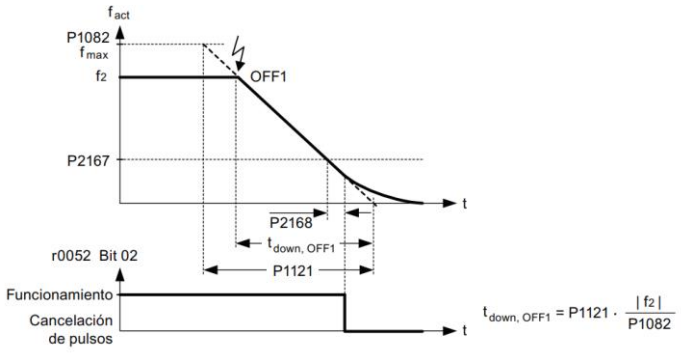
Fuente: SIEMENS. (2013).

Funciones básicas de puesta de marcha, selección del modo STOP el convertidor como el usuario tiene que responder a una amplia variedad de situaciones y detener el convertidor si

es necesario. Por eso, se debe tener en cuenta los requisitos de funcionamiento, así como las funciones de protección del convertidor (sobrecarga eléctrica o térmica), o las funciones de protección de hombre-maquina. Debido a las diferentes funciones OFF (OFF1, OFF2, OFF3), el convertidor puede responder de forma flexible a los requisitos mencionados. Tenga en cuenta que después de una señal de mando OFF2/OFF3, el convertidor estará en el estado "Bloqueo ON". Para volver a conectar el motor, se necesita una señal baja → alta de la señal de mando ON.

La señal de mando OFF1 está relacionado con la señal de mando ON. Cuando la señal de mando ON se retira, OFF1 se activa directamente. OFF1 frena el convertidor con el tiempo de declaración P1121. Si la frecuencia de salida cae por debajo del valor parámetro P2167 y si el tiempo ha vencido, entonces se cancela los impulsos del convertidor (Figura 41).

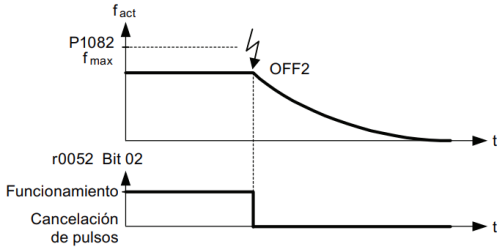
Figura 41. Señal de mando OFF1.



Fuente: SIEMENS. (2013).

La señal de mando OFF2 cancela inmediatamente los impulsos del convertidor. De este modo, el motor hace una parada natural y no es posible detenerlo de forma controlada (Figura 42).

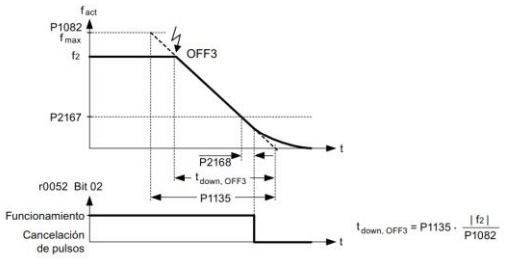
Figura 42. Señal de mando OFF2.



Fuente: SIEMENS. (2013).

Las características de frenado de OFF3 son idénticas a las de OFF1, con la excepción del tiempo de declaración P1135 de OFF3 independiente. Si la frecuencia de salida cae por debajo del valor del parámetro P2167 y si el tiempo de P2168 ha vencido, entones se cancela los impulsos del convertidor como la señal de mando OFF1 (Figura 43).

Figura 43. Señal de mando OFF3.



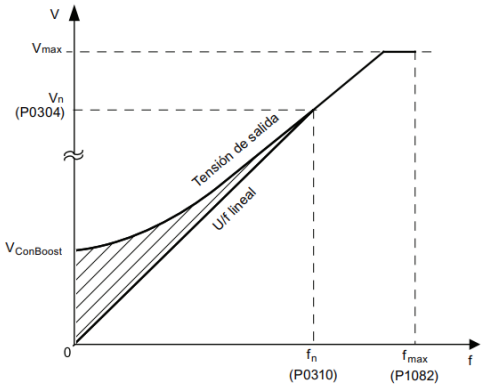
Fuente: SIEMENS. (2013).

Configuración de la elevación de tensión Para las frecuencias de salida bajas, las características de U/f solo proporcionan una tensión de salida baja. Las resistencias óhmicas del devanado del estátor juegan un papel importante en las frecuencias bajas, que se desprecian al determinar el flujo del motor en el modo U/f. Esto quiere decir que la tensión de salida puede ser demasiado baja para:

- Implementar la magnetización del motor asíncrono
- Mantener la carga
- Compensar las pérdidas en el sistema

La tensión de salida se puede aumentar en el convertidor usando los parámetros que se muestran (Figura 44).

Figura 44. Configuración de la elevación de tensión.

Parámetro	Tipo de elevación	Descripción
P1310	Elevación continua de tensión [%]	Este parámetro define el nivel de elevación referido a P0305 (corriente nominal del motor) aplicable a las características U/f lineal y cuadrática. Rango: De 0,0 a 250,0 (ajuste predeterminado de fábrica: 50.0) La elevación de tensión es efectiva en el rango de frecuencias completo mientras que el valor disminuye continuamente a altas frecuencias. 

Fuente: SIEMENS. (2013).

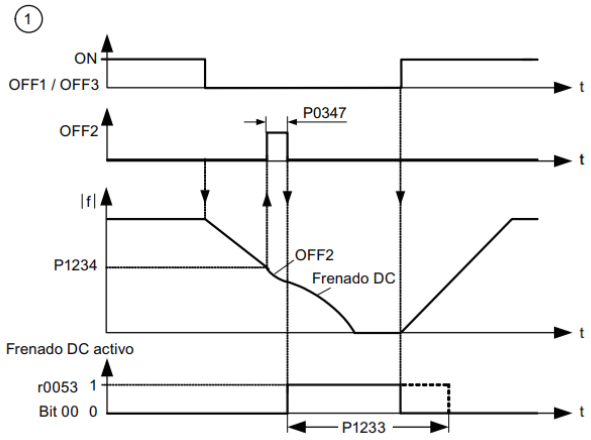
Configuración de la función de frenado DC hace que el motor se detenga rápidamente al aplicar una corriente de frenado de DC (la corriente aplicada produce también un par de frenado estacionario). Para el frenado por DC, se aplica una corriente DC en el devanado del estator que produce un par de frenado significativo para un motor asíncrono.

El frenado por DC se selecciona de la siguiente manera:

Secuencia 1: seleccionando después de OFF1 u OFF3 (el frenado por DC se libera mediante P1233) (Figura 45).

1. Se habilita mediante P1233.
2. El frenado por DC se activa con la señal de mando OFF1 u OFF3.
3. La frecuencia del convertidor se desacelera a lo largo de la deceleración parametrizada de OFF1 u OFF3 hasta la frecuencia en la que tiene que iniciarse el frenado por DC: P1234.
4. Los impulsos del convertidor se inhiben mientras dura el tiempo de desmagnetización P0347.
5. A continuación, se aplica la corriente de frenado necesaria P1232 durante el tiempo de frenado seleccionado P1233. El estado se muestra mediante la señal r0053 bit 00.

Figura 45. Frenado de motor DC secuencia 1.

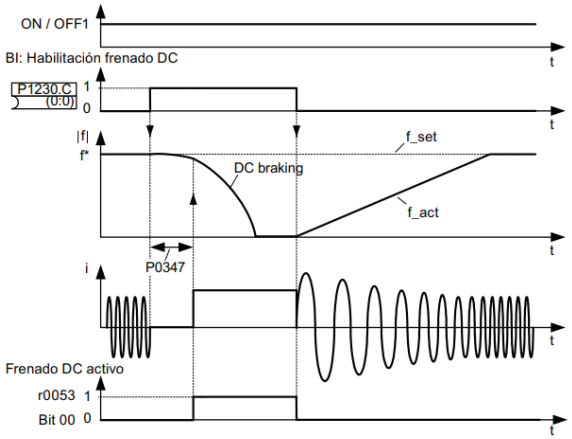


Fuente: SIEMENS. (2013).

Secuencia 2: Seleccionado directamente con el parámetro BICO P1230 (Figura 46)

1. Se habilita y selecciona con el parámetro BICO P1230
2. Los impulsos del convertidor se inhiben mientras dura el tiempo de desmagnetización P0347.
3. La corriente de frenado solicitada P1232 se aplica durante el tiempo seleccionado y el motor se frena. Este estado se muestra mediante la señal r0053 bit 00.
4. Después de que se haya cancelado el frenado por DC, el convertidor acelera a la consigna de frecuencia hasta que la velocidad del motor coincide con la frecuencia de salida del convertidor.

Figura 46. Frenado de motor DC secuencia 2.



Fuente: SIEMENS. (2013).

3.6.2 Construcción del tablero eléctrico y configuración del variador de velocidad

La construcción del tablero eléctrico cuenta con un variador Siemens V20 con la referencia de “6SL3210-5BE21-1CV0”, un guarda motor que protege el motor de sobrecarga o cortocircuitos, un contactor (relé de potencia) que permite prender o apagar el motor, potenciómetro industrial para controlar la velocidad del motor y el banco de lorenzo de referencia DL 2200 es una estación modular de entrenamiento eléctrico que energiza el variador a 380v (Figura 47)

Figura 47. Tablero eléctrico.

Fuente: Autoría propia.

La configuración de puesta en marcha del variador de velocidad para programar el dispositivo se presiona el botón “M” y se va a ingresar a los diferentes parámetros al presionar el botón “Ok” se reflejará el nivel de acceso que se representa por números para aceptar cada nivel presionar el botón “OK”.

- P0003: Configuración de nivel de acceso del usuario “1”.
- P0010: Habilitar la puesta en marcha rápida “1”.
- P0100: Seleccionar en que unidades se va a configurar la potencia en KW “2” o HP “1” en este caso se configuro en KW(Kilovatio).
- P0304: tensión nominal característica “1.5 KW”.
- P0305: Corriente nominal “380V”.
- P0307: Potencia nominal del motor “3.4 A”.
- P0310: Frecuencia Nominal del motor “60 HZ”.
- P0311: Configurar la velocidad del motor en RPM “1600 RPM”.
- P0700: Configuración de selección de fuentes de señal de mando se oprime 2 que son las bornas del variador.
- P1000: Seleccionamos la consigna de frecuencia “2” una salida analógica se conectará un potenciómetro industrial.
- P1080: Frecuencia mínima del variador “0”.
- P1082: Frecuencia máxima del variador ”60.00”.

- P1120: Configuración de la rampa de aceleración del motor se observa en segundos.
- P1121: Configuración de la rampa desacelerar se observa en segundos.
- P3900: Puesta de marcha a finalizado “1”.

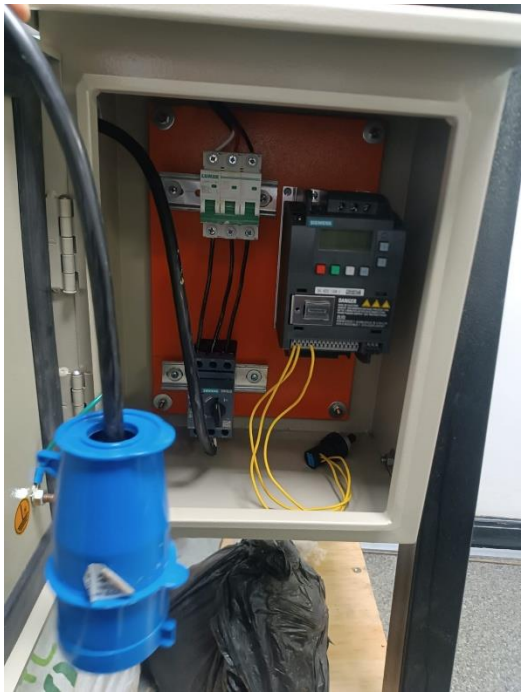
El variador va a hacer una verificación de para cargar todos los parámetros de puesta en marcha (Figura 48).

Figura 48. Configuración del variador.

Fuente: Autoría propia

Se realizo el montaje del tablero eléctrico a la estructura de la extrusora (Figura 49).

Figura 49. Montaje del tablero eléctrico y toma industrial trifásica.



Fuente: Autoría propia.

.

4 PRUEBAS DE LOS DIFERENTES SUBSISTEMAS DE LA MAQUINA EXTRUSORA Y PROGRAMACION DE TRAYECTORIAS CON EL ROBOT MOTOMAN.

Se realizaron pruebas funcionales con el objetivo de evaluar el comportamiento integral de cada uno de los subsistemas que conforman el proyecto. Estas pruebas permitirán verificar el desempeño del sistema mecánico, el sistema eléctrico y el módulo de programación de trayectorias implementado en el robot Motoman.

En el subsistema mecánico, se observará el comportamiento estructural de los componentes durante el proceso de extrusión del material. En el subsistema eléctrico, se validará el correcto funcionamiento del motor, las conexiones y los dispositivos de protección. Finalmente, en el subsistema de programación, se evaluará la precisión, la repetibilidad y la fluidez de las trayectorias del robot Motoman.

4.1 CONSTRUCCION DE LA MAQUINA EXTRUSORA.

Se llevó a cabo la construcción del tornillo sin fin y ajuste del diámetro del eje par el tornillo, mediante técnicas de manufactura como el torneado, la soldadura y el taladrado. Estas técnicas permitieron dar forma y precisión a la pieza, garantizando su correcto funcionamiento dentro del sistema mecánico de la extrusora (Figura 50 a 52).

Figura 50. Mecanizado punta del tornillo sin fin

Fuente: Autoría propia.

Figura 51. Chumacera con el eje del tornillo sin fin.

Fuente: Autoría propia.

Figura 52. Fabricación de las hélices al eje.

Fuente: Autoría propia.

La fabricación del tornillo hizo necesario fabricar una maqueta preliminar para definir la geometría de corte de las hélices correspondientes, de tal manera que, luego fueron hechas las plantillas de corte para la hélice que posteriormente fue soldada con el eje de acuerdo con los planos de diseño (figura 53).

Figura 53. Maqueta para la visualización de alojamiento del tornillo sin fin dentro del cilindro.

Fuente: Autoría propia.

Se construyeron los flanches y del soporte para el rodamiento con referencia “6205”, cuya función principal fue reducir la fricción y facilitar el movimiento del tornillo sin fin, contribuyendo a soportar cargas y aumentar la eficiencia del sistema. Asimismo, se compró una chumacera para sostener y guiar el eje del tornillo sin fin, se realizó el montaje de la camisa de la extrusora con el tornillo sin fin (Figura 54 a 57).

Figura 54. Cilindro con su tornillo sin fin.

Fuente: Autoría propia.

Figura 55. Soporte para rodamiento "6205".

Fuente: Autoría propia.

Figura 56. flanche y chumacera.

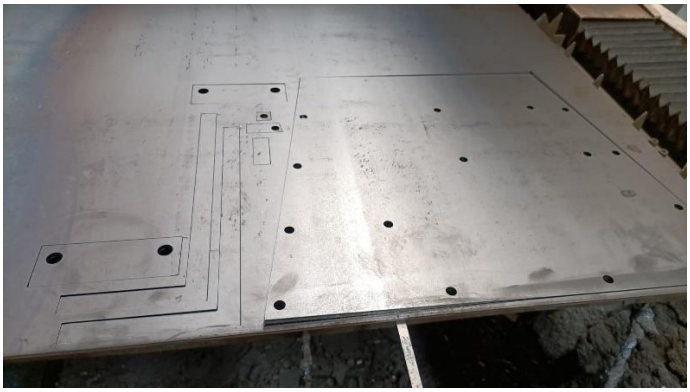
Fuente: Autoría propia.

Figura 57. Tornillo sin fin.

Fuente: Autoría propia.

Se llevo a cabo un corte con plasma para obtener las dimensiones de la platina (ver anexo 6). Posteriormente, se inició el montaje de la extrusora con sus respectivas piezas, como la tolva, la boquilla, la estructura y el ensamble del motor junto con la platina y sus soportes correspondientes. Todo esto se llevó a cabo el montaje con el objetivo de garantizar una fijación adecuada y evitar vibraciones o desplazamientos durante el proceso de extrusión de arcilla (Figura 58 a 61).

Figura 58. Medidas de la platina



Fuente: Autoría propia.

Figura 59. cilindro, boquilla y estructura.

Fuente: Autoría propia.

Figura 60. Montaje del motor con la platina y estructura.

Fuente: Autoría propia.

Figura 61. Cilindro y tolva.

Fuente: Autoría propia.

Se hizo el montaje del tablero eléctrico con una conexión de toma eléctrica para poder energizar la máquina a 220v (Figura 62)

Figura 62. Montaje eléctrico con conexión de toma eléctrica industrial.

Fuente: Autoría propia.

Montaje final de la máquina extrusora para la impresión 3D de ladrillos modulares en tierra (Figura 63).

Figura 63. Máquina extrusora.

Fuente: Autoría propia.

4.1.1 Pruebas mecánicas del sistema.

Fue alimentada la máquina a 220V en los laboratorios de la Universidad de La Salle. En primer lugar, apliqué aceite quemado a la extrusora y al cilindro para lubricar y preparar la arcilla natural, evitando que se adhiriera a las paredes del cilindro y asegurando así un proceso constante. Posteriormente, se compró 8 kg de arcilla para realizar diferentes pruebas con el fin de evaluar el funcionamiento de los subsistemas mecánicos y eléctricos (Figura 64)

Figura 64. Arcilla natural para pruebas de extrusión.

Fuente: Autoría propia.

Las pruebas resultaron exitosas, ya que la consistencia de la arcilla fue adecuada para la fabricación de ladrillos modulares 3D. Se comenzó introduciendo distintos tamaños de arcilla para observar el proceso de extrusión, donde fue necesario ejercer presión sobre la arcilla para que pudiera ser extruida correctamente. El proceso tomó 3 minutos con 20 segundos para extruir 8 kg de material bruto, Obteniendo al final 2 kg aprox. de material extruido, el restante corresponde a la carga interna del cilindro. Durante la extrusión, por cada minuto se logró producir cerca de 20 cm de arcilla (Figura 65).

Figura 65. Proceso de alimentación de material para la máquina.

Fuente: Autoría propia.

Durante todo el proceso, la corriente se mantuvo constante en 3,64 A, lo que evidenció la estabilidad eléctrica del sistema. El resultado final fue una pieza cilíndrica de arcilla impecable, con una superficie lisa, gran flexibilidad y consistencia óptima para la construcción de ladrillos modulares 3D, lo que evidenció la precisión y eficiencia de la máquina extrusora (ver Anexo 5 figura 66)

Figura 66. Producto final.

Fuente: Autoría propia.

Se realizo el desmontaje del cilindro y del tornillo sin fin para efectuar la limpieza de la arcilla, ya que, de no retirarla, con el tiempo se endurecería hasta convertirse en un material muy resistente. Además, este procedimiento me permitió observar cómo la arcilla se había adherido tanto al cilindro como al tornillo sin fin. Al final de la limpieza de la extrusora se volvió a construir la maquina extrusora para próximas pruebas. (Figura 67 y 68)

Figura 67. Resultado final del desmontaje tornillo sin fin.

Fuente: Autoría propia.

Figura 68. adherido de la arcilla con el cilindro.

Fuente: Autoría propia.

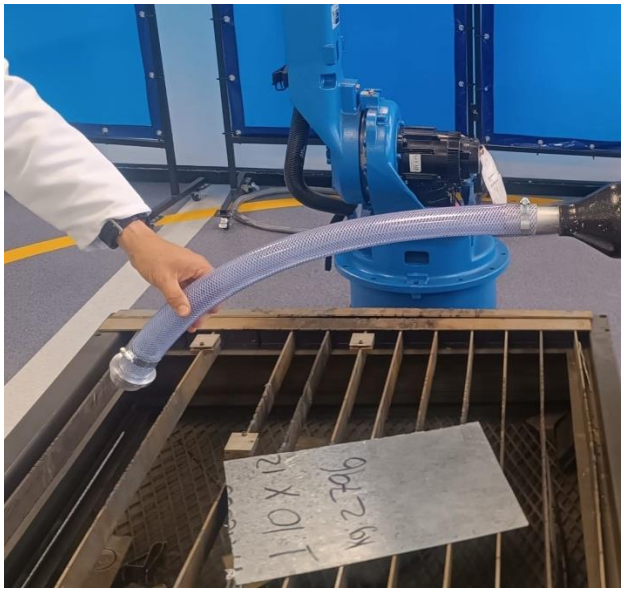
Se realizaron nuevas pruebas con una mezcla de arcilla más húmeda, pero el proceso no fue satisfactorio, ya que la alta humedad dificultó considerablemente la extrusión. Para mejorar su consistencia, se tuvo que mezclar la arcilla utilizada en pruebas anteriores, agregando arena y gravilla, con el fin de obtener un material más adecuado para continuar con los ensayos (Figura 69).

Figura 69. Pruebas de arcilla con arena y gravilla.

Fuente: Autoría propia.

Se mecanizo una pieza cónica para reducir el área transversal de extrusión al final desde el diámetro de la manguera industrial (2 pulgadas) hasta el diámetro mínimo posible para la impresión de los mampuestos (aprox. ¾ pulgada) para ajustarla en la pinza del robot motoman, acoplándola con una manguera industrial diseñada para resistir la presión generada durante el proceso. Sin embargo, durante las pruebas surgieron falencias con la pieza mecanizada, ya que debido a su forma cónica presentaba un orificio muy pequeño (de 15 mm de diámetro) que dificultaba la salida de la arcilla. Debido a la alta presión, la manguera se soltó de la boquilla de la extrusora, lo que impidió realizar las pruebas previstas adaptadas al robot motoman (Figura 70).

Figura 70. Pieza mecanizada cónica y manguera industrial.



Fuente: Autoría propia.

Posteriormente, se llevaron a cabo nuevas pruebas con la mezcla de arcilla que contenía arena y gravilla, logrando que, tras varios intentos, adquiriera una mejor consistencia y se integrara adecuadamente con la arcilla natural. Finalmente, se decidió ampliar la pieza cónica para facilitar la extrusión de la arcilla y poder montarla en el robot Motoman, con el objetivo de llevar a cabo pruebas de trayectorias para la construcción de ladrillos modulares.

4.2 PRUEBAS DE SISTEMA ELECTRICO.

Se verificó el comportamiento y la respuesta del motor trifásico (ver Anexo 7). La Tabla 4 presenta la relación entre la frecuencia de entrada (Hz) y la velocidad de rotación del motor (RPM), evidenciando que a mayor frecuencia, mayor es la velocidad de rotación. Este comportamiento se debe a que el variador de frecuencia modifica la frecuencia de la corriente suministrada al motor, lo que impacta directamente en su velocidad.

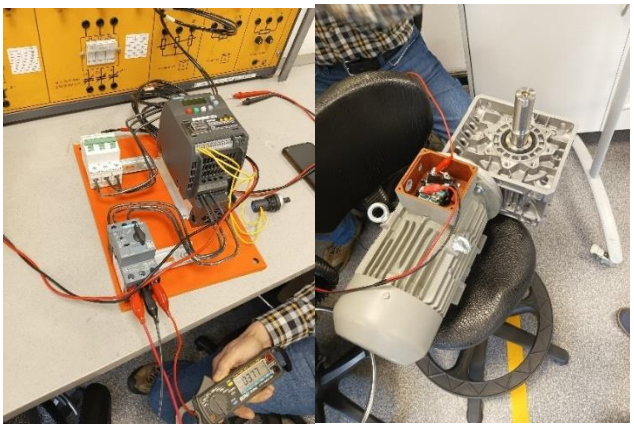
Durante el análisis del motor operando a una frecuencia de 60 Hz, se observó que el guardamotor desconectó el circuito debido a que la corriente consumida por el motor superó el valor de protección configurado. Para evitar esta interrupción, fue necesario ajustar el umbral de corriente del guardamotor a un valor superior, permitiendo así el funcionamiento continuo del sistema sin activar la protección (Figura 71).

Tabla 3. HZ VS RPM.

Hz	RPM
45	22,5
50	25
55	28
60	30

Fuente: Autoría propia.

Figura 71. Pruebas de relación entre frecuencia y velocidad del motor.



Fuente: Autoría propia.

La velocidad sincrónica (Ns) de un motor: Es la velocidad ideal de rotación del campo magnético giratorio

- Ns= 120 velocidad sincrónica (RPM)
- F= 50 frecuencia (Hz)
- P = 4 números de polos

$$Ns = \frac{120 \times F}{P} \qquad \text{Ec.32}$$

El campo magnético de estator gira a 1500 RPM

$$Ns = \frac{120 \times 60}{4} = 1500\ RPM \qquad \text{Ec.33}$$

La velocidad lineal permite conocer cuanto material se mueve por unidad de tiempo donde el paso del tornillo sin fin de 50.8mm.

$$Velocidad\ lineal(^{m}/_{s}) = Paso\ de\ tornillo(m) \times \frac{RPM}{60} \qquad \text{Ec.34}$$

La arcilla avanza 18,75 mm/ s por segundo

$$Velocidad\ lineal(^{m}/_{s}) = 50{,}8 \times \frac{22.5}{60} = 18{,}75\ mm/s \qquad \text{Ec.35}$$

La arcilla avanza 20,84 mm/s por segundo

$$Velocidad\ lineal(^{m}/_{s}) = 50{,}8 \times \frac{25}{60} = 20{,}84\ mm/s \qquad \text{Ec.36}$$

La arcilla avanza 23,34 mm/s por segundo.

$$Velocidad\ lineal(^{m}/_{s}) = 50{,}8 \times \frac{28}{60} = 23{,}34\ mm/s \qquad \text{Ec.37}$$

La arcilla avanza 25 mm/s por segundo.

$$Velocidad\ lineal(^{m}/_{s}) = 50{,}8 \times \frac{30}{60} = 25\ mm/s \qquad \text{Ec.38}$$

- P:1500W
- RPM: Revoluciones por minuto Ver tabla 2

El comportamiento del torque es inversamente proporcional a la velocidad ya que a menor frecuencia mayor torque para facilitar el desplazamiento del material (Arcilla).

$$T = \frac{1500 \times 60}{2\pi \times 22.5} = 636{,}6Nm \qquad \text{Ec.39}$$

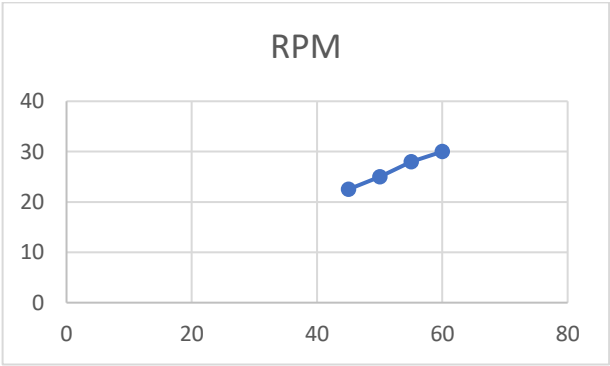
$$T = \frac{1500 \times 60}{2\pi \times 22.5} = 572{,}9Nm \qquad \text{Ec.40}$$

$$T = \frac{1500 \times 60}{2\pi \times 22.5} = 511{,}6Nm \qquad \text{Ec.41}$$

$$T = \frac{1500 \times 60}{2\pi \times 22.5} = 477{,}4Nm \qquad \text{Ec.42}$$

La gráfica muestra una relación lineal creciente entre la frecuencia de entrada y la velocidad del motor (RPM). A medida que la frecuencia aumenta, la velocidad del motor también se incrementa de forma proporcional, lo que confirma el comportamiento esperado en motores de corriente alterna controlados por variadores de frecuencia (Figura 72)

Figura 72. Frecuencia vs velocidad del comportamiento del motor.

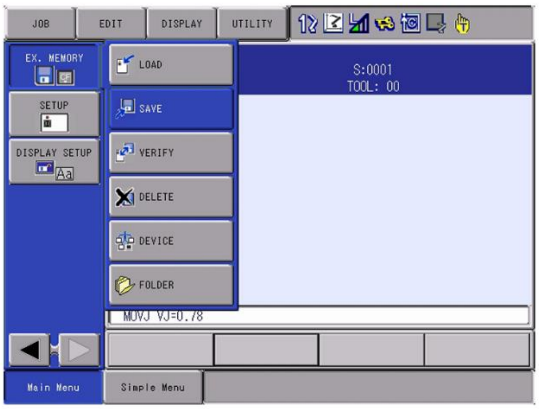


Fuente: Autoría propia.

4.3 PRUEBAS DE PROGRAMACION DE TRAYECTORIAS.

Las trayectorias fueron programadas mediante el controlador DX100 del robot Motoman. Para guardar el proyecto, se utilizó una memoria USB insertada en el puerto ubicado en la parte posterior del controlador. Posteriormente, fue necesario seleccionar la opción EX. MEMORY para iniciar el proceso de almacenamiento del proyecto en el dispositivo externo (Figura 73).

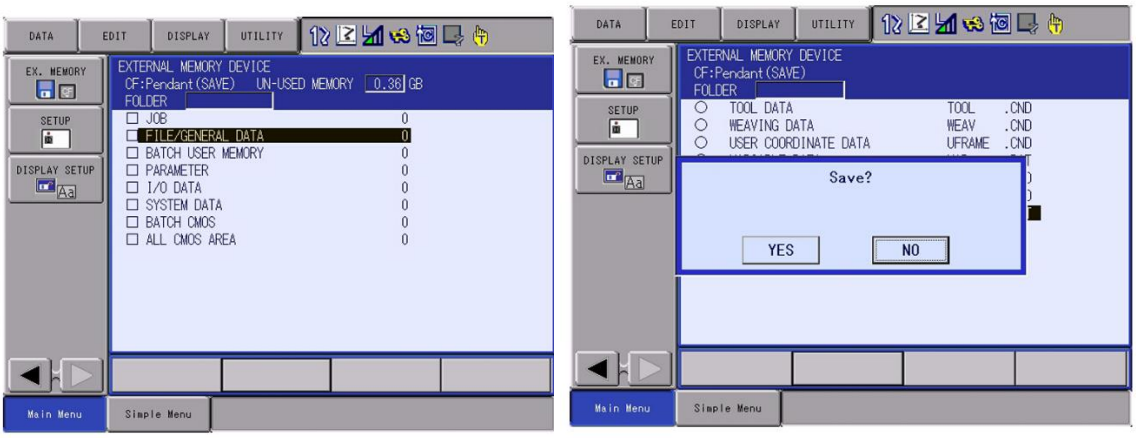
Figura 73. Exportación de trayectorias del controlador al Software Motosim.



Fuente: Autoría propia.

Luego se selecciona JOB y se confirma a través de SAVE (Figura 74).

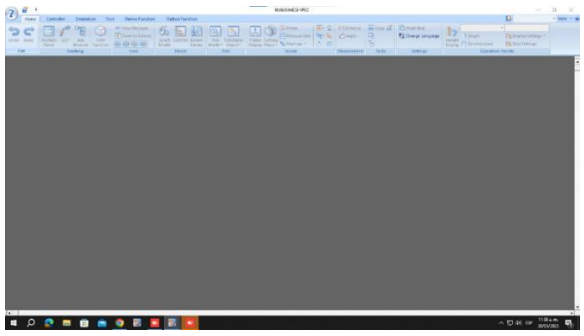
Figura 74. Guardar las trayectorias en una memoria USB.



Fuente: Autoría propia.

Se exportarán las trayectorias en formato .txt (ver Anexos 6 al 9), generadas por el controlador DX100, hacia el software MotoSim. Este proceso permite simular y verificar las trayectorias previamente programadas en el entorno virtual. A continuación, se presenta la interfaz del software MotoSim, donde se visualizan y ajustan los movimientos del robot (Figura 75).

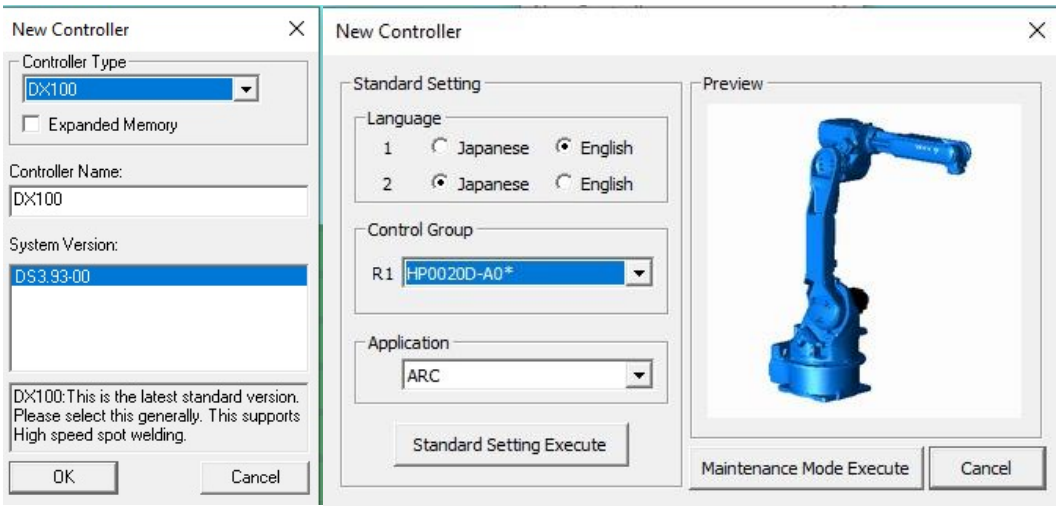
Figura 75. Interfaz del motosim.



Fuente: Autoría propia.

En la parte superior de la interfaz sale un círculo con un robot dar clic luego new para crear un nuevo proyecto y seleccionar el controlador DX 100 y dar clic ok, saldrá otra interfaz para seleccionar la referencia del robot “HP0020D-A0” (Figura 76).

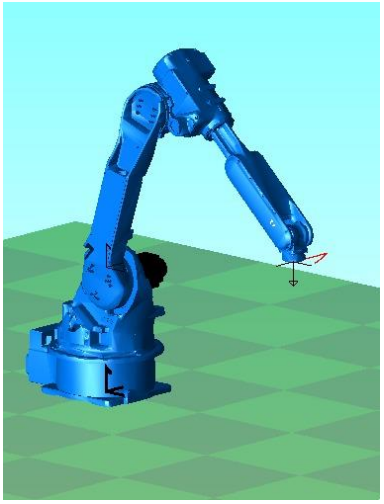
Figura 76. Selección del controlador y robot.



Fuente: Autoría propia.

Se ve la implementación del robot con su área de trabajo con referencia HP0020D-A0* (Figura 77).

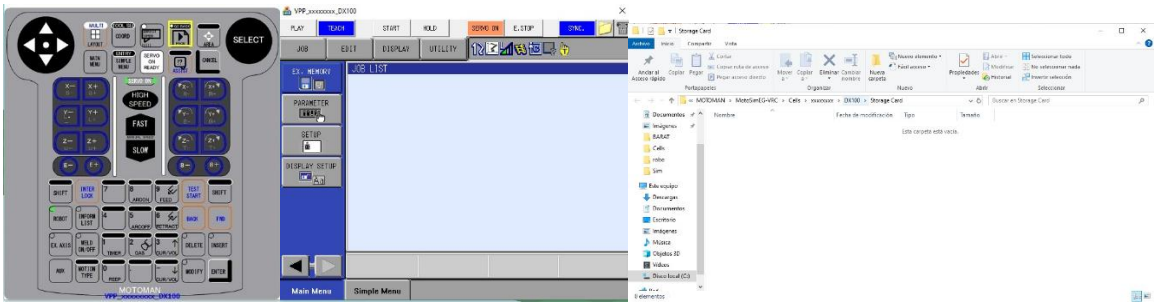
Figura 77. Robot motoman



Fuente: Autoría propia.

Se va a observar la interfaz del controlador con su pantalla, en el lado superior derecho dar clic en una carpeta amarilla, se abriría otra interfaz que se carga los .txt de las trayectorias creadas desde el controlador DX 100 (Figura 78).

Figura 78. Cargar las trayectorias al motosim.



Fuente: Autoría propia.

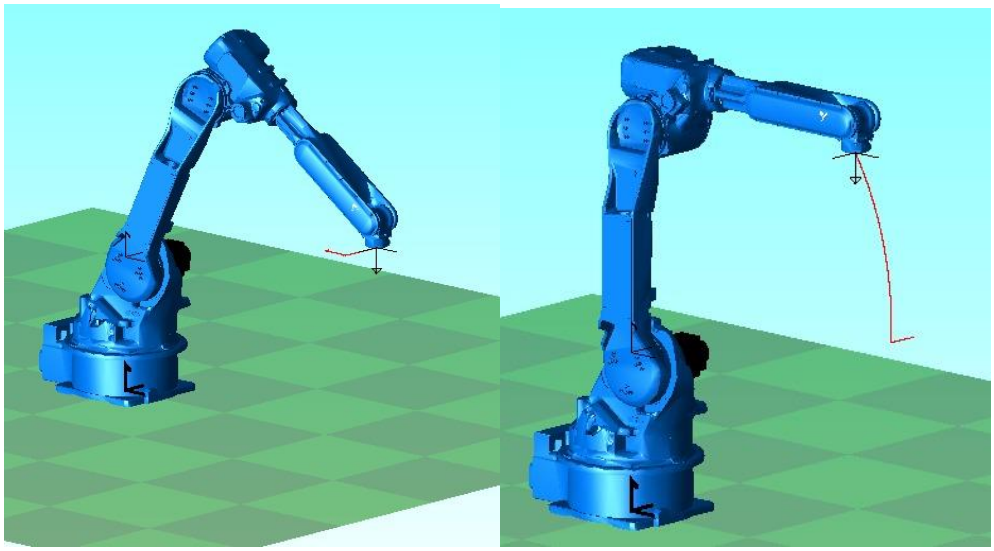
Se cargan los archivos .txt en el controlador DX100. Luego, se accede al menú JOB y se selecciona uno de los archivos deseados. A continuación, se visualizan las trayectorias programadas con la instrucción MOVJ, la cual permite realizar movimientos rápidos de posicionamiento entre diferentes puntos. La variable Vj indica la velocidad con la que el robot se desplazará de un punto a otro durante estos movimientos (Figura 79).

Figura 79. Visualización de las trayectorias.

Fuente: Autoría propia.

Se ve las trayectorias realizadas por el robot motoman de los diferentes ladrillos modulares (Figura 80).

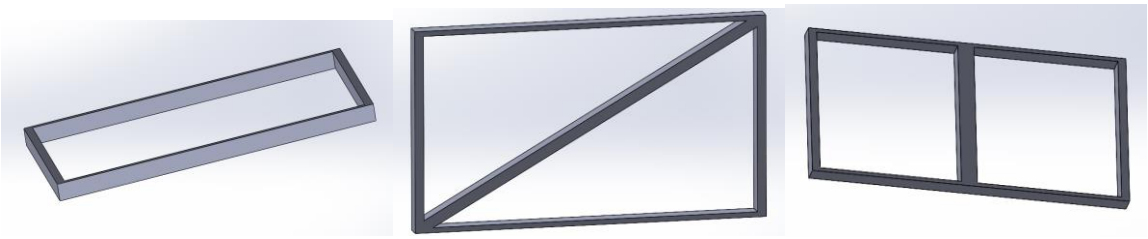
Figura 80. Trayectorias realizadas de los ladrillos modulares.



Fuente: Autoría propia.

Se realizaron las trayectorias correspondientes a tres diseños distintos de ladrillos para el proyecto desarrollado en conjunto con la Facultad de Arquitectura, el cual consiste en la construcción de un muro utilizando ladrillos modulares impresos en 3D. La representación tridimensional de dichos ladrillos modulares fue elaborada mediante el software SolidWorks por dificultades en la compra de materiales para la preparación de la arcilla desarrollada por la facultad de arquitectura de la Universidad de la Salle, no fue posible hacer la impresión final de los mampuestos con el robot motoman, pero quedaron todos los elementos requeridos para hacerla pruebas con la maquina integrada con el robot y hacer la impresión de unas muestras de ladrillo diseñado; como parte del proyecto de investigación en desarrollo actual.(Figura 81).

Figura 81. Representación en 3D de los ladrillos modulares.



Fuente: Autoría propia.

5 CONCLUSIONES

El diseño de la máquina extrusora de arcilla en SolidWorks demostró ser viable y eficaz para su propósito. A través del análisis del modelo 3D, se validó el correcto funcionamiento de cada uno de sus componentes, asegurando que el ensamblaje cumple con los requisitos del proceso de extrusión. Las pruebas de simulación evidenciaron que el diseño previene vibraciones y desplazamientos indeseados del motor, lo cual es crítico para mantener la precisión y estabilidad durante la operación.

Se logró la construcción y ajuste del tornillo sin fin para la máquina extrusora, utilizando diversas técnicas de manufactura como el torneado, la soldadura y el taladrado. Este proceso garantizó que el tornillo cumpliera con las especificaciones de diseño, lo que es crucial para su correcto funcionamiento. La fabricación de la máquina extrusora se completó con el montaje final de todas las piezas, incluyendo la camisa, la tolva, la boquilla, y la estructura de soporte. El corte de la platina y las piezas del cilindro y el tornillo con láser y el ensamblaje del motor en su posición final fueron pasos determinantes para asegurar una fijación adecuada y prevenir vibraciones o desplazamientos durante el proceso de extrusión de arcilla.

El proceso de pruebas de la máquina extrusora demostró que el diseño y la implementación cumplen con los objetivos planteados, ya que fue posible obtener piezas de arcilla con excelente calidad, superficie lisa y flexibilidad adecuada para la fabricación de ladrillos modulares 3D. La máquina evidenció un buen desempeño tanto mecánico como eléctrico, logrando mantener una corriente constante de 3,64 A durante todo el procedimiento, lo cual garantiza estabilidad y eficiencia en el consumo energético. Asimismo, los resultados experimentales confirmaron que la extrusora es capaz de trabajar de manera continua y precisa, con un rendimiento óptimo en el proceso de extrusión y con la consistencia necesaria para asegurar la repetitividad en futuras pruebas y aplicaciones.

A pesar de las dificultades en la adquisición de materiales, se logró un hito importante en el proyecto: la exitosa programación y simulación de las trayectorias para la impresión de ladrillos modulares. La metodología implementada, que involucró la programación en el controlador DX100 del robot Motoman y la verificación en el software MotoSim, resultó ser eficiente y reproducible. Esta fase de simulación validó que los diseños de los ladrillos pueden ser fabricados por el robot, y se dejaron preparados todos los archivos (.txt) y los parámetros necesarios.

BIBLIOGRAFIA

REVISTAS

Conveyor Eng. & Mfg. (1999) Manual de diseño de sistemas de transporte

Jiménez Díaz, F., Villamizar Cruz, N. I., Acosta Arcos, D. F., Maldonado Monroy, D. H., & Gonzalez Molina, C. A. (2021). Diseño y construcción de un extrusor de arcilla para impresión 3d. Ingenio Magno.

http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/2178

Khan S. Sami. G. Koc M. (2021) Evaluación de sostenibilidad, potenciales y desafíos de las estructuras de hormigón impresas en 3D una revisión sistemática para aplicaciones ambientales construidas, Revista de Producción Más Limpia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Massie, C. (enero de 2015). China's WinSun Unveils Two New 3D Printed Buildings. The journal of the american institute of architects. Recuperado el 2018 de Septiembre de 19, de https://www.architectmagazine.com/technology/chinas-winsun-unveils-two-new-3d-printed-buildings_o

Yazeed A. Al-Noaimat, Mehdi Chougan, Mazen J. Al-kheetan, Othman Al-Mandhari, Waleed Al-Saidi, Marwan Al-Maqbali, Haitham Al-Hosni, Seyed Hamidreza Ghaffar. (2023). 3D printing of limestone-calcined clay cement: A review of its potential implementation in the construction industry.

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023002426

CIBERGRAFIA

Alicia, M. (2023, septiembre 10). Guía completa: La impresión 3D por laminación, ¡te explicamos todo! 3Dnatives. https://www.3dnatives.com/es/guia-completa-impresion-3d-laminacion-110920232/

Asaf, O, Bentur, A, Larianovsky, P, Sprecher, A. (2023). From soil to printed structures: A systematic approach to designing clay-based materials for 3D printing in construction and architecture. Israel Institute of Technology.

Botero, L. (6 de marzo de 2024). Argos y la Nacional crean la impresora 3D más grande de Suramérica: permitirá construir casas. Valora Analitik. https://www.valoraanalitik.com/2024/03/06/cementos-argos-y-la-universidad-nacional-crean-impresora-3d-para-construir-casas/

Dubai Future Foundation. (2017). DUBAI 3D PRINTING STRATEGY. Recuperado de http://www.dubaifuture.gov.ae/our-initiatives/dubai-3d-printing-strategy/#1458229665815-d71b8236-2fec8fc7-fbc6

Discover 3D Printing, also known as Additive Manufacturing with 3DEXPERIENCE Make and Any-Shape. (2022, febrero 23).

Fabricación aditiva. (2020, julio 27). Hiperbaric. https://www.hiperbaric.com/es/tecnologia-hip/tecnicas-de-fabricacion-hip/fabricacion-aditiva/

Impresión 3D: innovación y revolución tecnológica. (2024, marzo 8). Idelt. https://idelt.com/es/impresion-3d-innovacion-y-revolucion-tecnologica/

Lucía, C. (2019, septiembre 9). Guía completa: Deposición de energía directa, ¡te explicamos todo! 3Dnatives. https://www.3dnatives.com/es/guia-deposicion-de-energia-directa-100920192/

Lowke, D., Enrico, D., Perrot, A., Weger, D., & Gelen, C. (mayo de 2018). Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. Science Direct.

Lucía, C. (2023, junio 9). Guía completa: Binder Jetting o inyección de aglutinante, ¡te explicamos todo! 3Dnatives. https://www.3dnatives.com/es/inyeccion-aglutinante-te-lo-contamos-23032016/

Martin. P, Cifuentes. C, Orlando. J, Nader. C, Rangel. J. (2025) INFORME DE AVANCE DE PROYECTO TERRA 3D

Multi Jet Fusion 3D printing process. (s/f). 3dmitech.co.uk. Recuperado el 19 de septiembre de 2025, de https://www.3dmitech.co.uk/post/fusion-printing

Ochoa A. (2023) Origen y avance de la impresión 3D. Universidad Anáhuac México

Olave, N, Ahumada, J. (2018). Propuesta metodológica para el cálculo de la vida útil estimada con fines valuatorios para las construcciones anexas rurales con base en la norma técnica iso 15686

Pérez J. (2022) Fabricación aditiva con arcilla. Universidad Pontificia Comillas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI).

Rivera F. (2018) Alcances y perspectivas de la implementación de las tecnologías de construcción aditiva en Colombia. Universidad De Los Andes. Recuperado de https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/2ccf4ad2-24c1-47cb-b04a-1176a57926ee

Susana, S. (2017, noviembre 9). Guía completa: SLA o impresión 3D por estereolitografía, ¡te explicamos todo! 3Dnatives. https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/

SIEMENS. (2013) Convertidor SINAMICS V20 https://cache.industry.siemens.com/dl/files/484/67267484/att_61462/v1/v20_OPI_es-SP_es-ES.pdf

Tess. 3ders. (26 de septiembre de 2016). Our Top 27 3D printed housing and construction projects www.3ders.org. http://www.3ders.org/articles/20160926-our-top-26-3d-printed-houses-construction-projects.html

ANEXOS

Anexo 1- BOQUILLA 4.0.pdf

Anexo 2- SOPORTE RODAMIENTO 4.0.pdf

Anexo 3- TAPA 4.0.pdf

Anexo 4- TORNILLO SIN FIN 4.0.pdf

Anexo 5- https://www.youtube.com/watch?feature=shared&v=plInrEREjkY

Anexo 6- https://www.youtube.com/shorts/jGq-PKOiPMk

Anexo 7- https://www.youtube.com/watch?v=ikKcsV4Xw8Q

Anexo 8 Programación del robot Motomann

```
/JOB

//NAME TESISREC1

//POS

///NPOS 18,0,0,0,0,0

///TOOL 0

///POSTYPE PULSE
```

///PULSE

C00000=3,1,0,0,0,-1

C00001=8595,33461,-33411,-11,39080,-3322

C00002=-6023,33068,-33822,11,39152,2338

C00003=-5478,45359,-20430,10,36569,2128

C00004=7756,45704,-20040,-9,36487,-2997

C00005=8508,33623,-33242,-10,39052,-3288

C00006=8664,32037,-32294,-10,37609,-3346

C00007=-5750,31821,-32517,12,37647,2235

C00008=-5204,43809,-19511,11,35164,2025

C00009=8174,44269,-18997,-7,35060,-3153

C00010=8929,32124,-32066,-8,37505,-3444

C00011=8929,30259,-30942,-8,35809,-3444

C00012=-5447,30359,-30839,11,35793,2122

C00013=-5000,41785,-18782,10,33651,1949

```
C00014=8348,42308,-18208,-9,33540,-3219

C00015=9139,30107,-31093,-10,35835,-3525

C00016=9139,30108,-31094,-9,35834,-3524

C00017=3,1,0,0,0,-1

//INST

///DATE 2025/05/05 14:11

///ATTR SC,RW

///GROUP1 RB1

NOP

MOVL C00000 VJ=250 PL=0

MOVL C00001 VJ=90 PL=0

MOVL C00002 VJ=90 PL=0

MOVL C00003 VJ=90 PL=0

MOVL C00004 VJ=90 PL=0

MOVL C00005 VJ=90 PL=0
```

```
MOVL C00006 VJ=90 PL=0

MOVL C00007 VJ=90 PL=0

MOVL C00008 VJ=90 PL=0

MOVL C00009 VJ=90 PL=0

MOVL C00010 VJ=90 PL=0

MOVL C00011 VJ=90 PL=0

MOVL C00012 VJ=90 PL=0

MOVL C00013 VJ=90 PL=0

MOVL C00014 VJ=90 PL=0

MOVL C00015 VJ=90 PL=0

MOVL C00016 VJ=90 PL=0

MOVL C00017 VJ=250 PL=0

END
```

Anexo 7

/JOB

```
//NAME TESISREC2

//POS

///NPOS 21,0,0,0,0,0

///TOOL 0

///POSTYPE PULSE

///PULSE

C00000=4,1,0,0,0,-1

C00001=8644,32711,-32595,-1,38235,-3350

C00002=-5138,44307,-20041,0,35855,1993

C00003=7993,44745,-19549,0,35755,-3095

C00004=8745,32920,-32377,0,38203,-3387

C00005=-5732,32457,-32859,0,38285,2227

C00006=-5273,44298,-20051,0,35860,2050

C00007=-5274,42636,-19034,0,34340,2051

C00008=8773,31247,-31164,0,36549,-3396
```

C00009=-5309,30721,-31702,0,36637,2064

C00010=-4896,42464,-19222,0,34377,1905

C00011=8273,42988,-18645,0,34263,-3201

C00012=9078,31269,-31145,0,36547,-3512

C00013=9078,29452,-29961,0,34838,-3512

C00014=-4833,40897,-17977,0,32754,1883

C00015=-5281,28962,-30452,0,34913,2057

C00016=8777,29496,-29915,0,34831,-3393

C00017=8045,41328,-17507,0,32664,-3109

C00018=-5160,40877,-17999,0,32759,2011

C00019=-5160,40877,-17999,0,32759,2011

C00020=3,1,0,0,0,-1

//INST

///DATE 2025/05/05 14:24

///ATTR SC,RW

```
///GROUP1 RB1

NOP

MOVJ C00000 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00001 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00002 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00003 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00004 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00005 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00006 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00007 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00008 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00009 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00010 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00011 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00012 VJ=0.78 PL=0
```

```
MOVJ C00013 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00014 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00015 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00016 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00017 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00018 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00019 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00020 VJ=0.78 PL=0

END
```

Anexo 8

```
/JOB

//NAME TESISREC3

//POS

///NPOS 23,0,0,0,0,0

///TOOL 0
```

```
///POSTYPE PULSE

///PULSE

C00000=2,1,0,0,0,-1

C00001=520,32590,-33858,-1,39011,-203

C00002=498,44543,-20883,-1,36532,-196

C00003=7867,45260,-20074,-1,36363,-3053

C00004=8633,33171,-33251,-1,38907,-3350

C00005=-6284,32791,-33638,-1,38971,2433

C00006=-5725,44932,-20433,-1,36435,2216

C00007=891,44564,-20850,-1,36523,-349

C00008=891,42926,-19901,-1,35060,-349

C00009=974,31235,-32394,-1,37355,-381

C00010=-5766,31581,-32038,-1,37296,2232

C00011=-5280,43270,-19517,-1,34982,2044

C00012=8085,43715,-19020,-1,34881,-3139
```

C00013=8854,31708,-31905,-1,37273,-3437

C00014=775,30868,-32768,-1,37415,-305

C00015=775,28887,-31550,-1,35598,-305

C00016=705,41607,-18202,-1,33263,-277

C00017=8481,42468,-17258,-1,33079,-3292

C00018=9279,30328,-30095,-1,35372,-3601

C00019=-5485,29710,-30721,-1,35471,2125

C00020=-5023,41574,-18237,-1,33271,1946

C00021=1648,41305,-18530,-1,33328,-640

C00022=3,1,0,0,0,-1

//INST

///DATE 2025/05/05 14:37

///ATTR SC,RW

///GROUP1 RB1

NOP

```
MOVJ C00000 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00001 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00002 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00003 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00004 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00005 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00006 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00007 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00008 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00009 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00010 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00011 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00012 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00013 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00014 VJ=0.78 PL=0
```

```
MOVJ C00015 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00016 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00017 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00018 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00019 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00020 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00021 VJ=0.78 PL=0

MOVJ C00022 VJ=0.78 PL=0

END
```