



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Desarrollo de alimentos para deposición para
impresora tridimensional modelo Delta
Kossel de dos extrusores.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

JORGE LUIS CHÁVEZ ALFARO

ASESORA

**DRA. MA. ANDREA TREJO MÁRQUEZ
M. EN C. SELENE PASCUAL BUSTAMANTE**

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO

2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis**

Desarrollo de alimentos para deposición para impresora tridimensional modelo Delta Kossel de dos extrusores

Que presenta el pasante: **Jorge Luis Chávez Alfaro**

Con número de cuenta: **309074153** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 22 de abril de 2019.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en C. Gilberto Atilano Amaya Ventura	
VOCAL	Dra. María Eugenia Ramírez Ortíz	
SECRETARIO	Dra. María Andrea Trejo Márquez	
1er. SUPLENTE	I.A. Alberto Solís Díaz	
2do. SUPLENTE	I.A. Janeli Solís Garfias	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Margarita y Ditrich, por el apoyo y guía que me dieron en todo momento. También gracias al resto de mis familiares, mi hermano, mis tí@s, prim@s y demás ramificación familiar.

Gracias a todos mis profesores, en especial a las profesoras del taller de frutos, Andrea, Selene, Adela y Caro, por su inmensurable paciencia, no lo nieguen, era irritante.

A mis amigos, los primarios de la universidad Angie, Pao, Vicky, Brian y Juan P., con ustedes el trayecto se volvió más interesante que el final.

A mis amigos del grupillo del Bacho, Montse, Luis, Gerard, Rober, Irazu, no tengo idea de cómo nos conocimos, pero agradezco esa casualidad.

A Grecia y Paks, gracias por ser la mejor compañía de la prepa, me pregunto que hubiera sucedido de haber continuado con ustedes (puro caos).

Finalmente, gracias a Gaby y Jesús, su patrocinio y confianza fue el principal engrane para el proyecto, infinito agradecimiento a ustedes.

Índice de figuras	iv
Índice de tablas	vii
Resumen	1
1. Introducción	2
2. Antecedentes	3
2.1. Impresión tridimensional	3
2.1.1. Categorías de prototipado rápido	3
2.1.2. Definición e historia de la impresión tridimensional	3
2.1.2.1. Stereolithography (SLA)	5
2.1.2.2. Fused Deposition Modelling (FDM)	6
2.1.2.3. Selective Laser Melting (SLM)	6
2.1.2.4. Laminated Object Manufacturing (LOM)	8
2.1.2.5. 3D Inkjet Printing (3DP)	8
2.1.3. Proceso de impresión	9
2.1.4. Situación nacional y mundial	11
2.1.5. Futuro de la impresión tridimensional	12
2.2. Concepto de impresión tridimensional de alimentos	13
2.2.1. Categorías de impresión tridimensional de alimentos	17
2.2.1.1. Sinterizado	17
2.2.1.1.1. Sinterizado por aglutinación	17
2.2.1.1.2. Sinterizado por calentamiento	18
2.2.1.2. Impresión por chorro	19
2.2.1.3. Impresión por deposición	19
2.2.2. Tipos de extrusión en impresoras por deposición	21
2.2.2.1. Extrusión por pistón	21
2.2.2.2. Extrusión por tornillo	21
2.2.2.3. Extrusión por presión de aire	21
2.2.3. Tipos de impresoras de deposición	21
2.2.3.1. Cartesiana	22
2.2.3.2. Delta	24
2.2.3.3. Polar	24
2.2.3.4. SCARA	24
2.2.4. Alimentos impresos	25
2.2.5. Descripción de parámetros	25
2.2.5.1. Capas y perímetros	26
2.2.5.2. Configuración de relleno	27
2.2.5.3. Velocidades para parámetros	28
2.2.6. Situación social	28
2.3. Origen del maíz	31
2.3.1. Propiedades químicas del maíz	32
2.4. Origen del frijol	34
2.4.1. Propiedades químicas del frijol	35
2.5. Productos típicos mexicanos e importancia	38
3. Objetivos	40
3.1. Objetivo General	40
3.2. Objetivos Particulares	40

4.	Materiales y métodos	41
4.1.	Diseño de una impresora tridimensional Delta Kossel	41
4.1.1.	Análisis funcional de impresora	43
4.1.2.	Diseño, selección y prototipo	45
4.2.	Diseño de alimentos	45
4.3.	Desarrollo de las formulaciones alimentarias para impresora tridimensional	47
4.3.1.	Formulación y preparación de masas iniciales	47
4.3.1.1.	Evaluaciones rápidas	50
4.3.1.1.1.	Evaluación de fluidez	51
4.3.1.1.2.	Esfuerzo	51
4.3.1.1.3.	Estabilidad	51
4.3.2.	Formulación y preparación de masas finales	51
4.3.3.	Preparación de frijoles para impresora	52
4.4.	Aspectos relacionados con inocuidad del diseño de impresora 3D para alimentos	54
4.5.	Evaluar la estabilidad del alimento obtenido a partir de la impresora mediante características físicas y características sensoriales.	56
4.6.	Análisis estadístico	57
5.	Resultados y discusión	59
5.1.	Diseño de una impresora tridimensional para alimentos tipo Delta Kossel	59
5.1.1.	Diseño de dispositivos y partes de la impresora 3D	59
5.1.2.	Diagrama de la tarjeta	67
5.1.3.	Calibración de los motores de las torres	69
5.1.4.	Zona de presión	71
5.1.5.	Zona de almacenamiento	72
5.1.6.	Primer prototipo de extrusor	74
5.1.7.	Segundo prototipo de extrusor	77
5.2.	Doble extrusión	79
5.2.1.	Resumen de corrida uno con dos extrusores	82
5.2.2.	Calibración de los extrusores	83
5.2.3.	Tercer y cuarto prototipo de extrusor	83
5.3.	Formulaciones alimentarias	85
5.3.1.	Evaluaciones en las masas iniciales	87
5.3.1.1.	Fluidez	87
5.3.1.2.	Esfuerzo	88
5.3.1.3.	Estabilidad	89
5.3.2.	Preparación de muestra de frijoles	91
5.3.3.	Acondicionamiento de muestras para impresora	91
5.4.	Preparación de impresora	92
5.4.1.	Diseño de alimentos	92
5.4.2.	Configuración de parámetros para la elaboración de alimentos	93
5.4.3.	Impresión de las muestras	94
5.5.	Impresión de doble extrusión	104
5.5.1.	Diseño y configuración de alimentos con dos extrusores	104
5.5.2.	Impresión de alimento con dos ingredientes	105
5.6.	Mejoramiento de alimentos impresos	110

5.6.1.	Evaluación de muestras finales	111
5.6.1.1.	Evaluación física de la masa y el frijol	111
5.6.1.2.	Evaluación sensorial del alimento impreso	114
6.	Conclusiones	116
7.	Recomendaciones	117
8.	Referencias	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama básico de funcionamiento de impresión por estereolitografía (A); barco de vapor, empleado para la calibración de impresoras, conocido como “3D Benchy” impreso en estereolitografía (B).	5
Figura 2. Diagrama de funcionamiento de impresión por fusión y deposición de material (A); conejo elaborado con impresión de material por deposición (B)	6
Figura 3. Esquemas que muestran el procesamiento de sinterizado, (A) colocación de polvo, (B) fundición de polvo añadido; (C) prótesis craneal generada con sinterizado, elaborada con Titanium 6Al-4V, amalgama de titanio, aluminio y vanadio	7
Figura 4. (Izquierda) Esquema de funcionamiento de una impresora LOM (A); pequeña turbina impresa en una impresora LOM (B)	8
Figura 5. Esculturas realizadas a partir de modelos matemáticos, elaborada con impresora Zprinter 650, la cual lanza chorros de aglutinante y tinta sobre un polvo plástico para poder formar las piezas tridimensionales y a color	9
Figura 6. Curva de Rogers, según la teoría de la difusión de las innovaciones, la curva indicaría las etapas en que se encuentra una innovación con respecto a determinados sectores de la población	13
Figura 7. Resultado de la impresión por sinterizado de aglutinante (A); 3D systems ChefJet Pro (B), que además emplea un proceso para entintar el polvo similar a las impresoras sobre el papel	18
Figura 8. Impresora de azúcar CandyFab 4000 (A). Resultado de sinterizado por aire caliente usando CandyFab4000 (B)	19
Figura 9. (A) Equipo de impresión por chorro, en donde son lanzados gotas de alimento. (B) Galletas con impresión de una cara de oso. (C) Impresión de alimentos tridimensionales fortificado con nutrientes. (D) Salsa de pizza distribuido correctamente sobre el pan con la técnica de chorro	20
Figura 10. Equipo casero de impresión por deposición (A), imprimiendo con masa de galleta. Ejemplo de impresión de un alimento en 3 dimensiones con una impresora de deposición (B)	20
Figura 11. Algunos parámetros de extrusión reflejado en la impresión como: perímetros (A) y capas (B)	26
Figura 12. Esquema de las principales partes del maíz	33
Figura 13. Estructura interna de frijol, (A), estructura externa de frijol (B)	36
Figura 14. Tamales elaborados de forma tradicional (A); Tamales empacados de la marca “Costeña” como una forma de modernizar un producto tradicional (B)	39
Figura 15. Diagrama de funcionalidad de la impresora de alimentos	45
Figura 16. Ejemplos de geometrías que pueden emplearse en la impresión para las primeras etapas: letras o figuras bidimensionales sencillas para la prueba de la impresora (A) y geometrías tridimensionales para la calibración (B, C)	46
Figura 17. (A) 3DBenchy, geometría que se emplea en la calibración de impresoras; (B) una simple taza; (C) busto de Albert Einstein	47
Figura 18. Empaque de harina de maíz, “MASECA antojitos”	48
Figura 19. Preparación de masas: (A) pesado de ingredientes, (B) masa formada, (C) masa en cartucho	50
Figura 20. Frijoles filtrados (A) para retirar y deshacer grandes partículas con la finalidad de mejorar la fluidez (B)	53
Figura 21. Procedimiento para preparación de la muestra: frijoles en plástico film (A), formación de un salchichón (B), cartuchos preparados (C) y llenado de cartucho para su posterior extrusión (C)	54
Figura 22. Estrías de las impresiones plásticas, donde se acumulan microorganismos, vista lateral (A), vista superior (B)	55
Figura 23. Reómetro empleado para medir las viscosidades aparentes de las masas y los frijoles: (A) Reómetro y (B) medición de las masas	57
Figura 24. Hoja de evaluación sensorial	58
Figura 25. Bocetos de piezas de la impresora, carriles, agarres de banda dentada, ruedas, y extrusores	60

Figura 26. Diseño de base de la caja de control, soporte para motor y columna; ensamble de carro	60
Figura 27. Renderizado del modelo de la impresora, realizado en Fusion 360	61
Figura 28. (A) Base de los rieles impresos con impresora 3D en PLA; (B) piezas para los rodamientos de las bandas dentadas; (C) motor atornillado a una de las bases de rieles	62
Figura 29. (A) Perfiles de aluminio de 28x28 cm; base de unión de perfiles impresa en PLA; (B) prisma triangular regular, (C) estructura primordial de las impresora Delta	62
Figura 30. Simulación de deformación por esfuerzo de flexión y compresión de 9N a tubería de aluminio de 6 mm	63
Figura 31. (A) Varillas de fibra de carbono que fungirán de brazos para el soporte de extrusores; (B) carro para riel donde sobresalen los brazos; (C) llantas de carro donde se desplazan por el riel de manera suave y firme	64
Figura 32. Interfaz de Pronterface. Lado derecho de la interfaz, control manual; parte central, área de impresión; lado derecho, introducción de comandos	65
Figura 33. Esquema de brazo de impresora Delta con los parámetros básicos para definir: 1-Largo de brazo; 2- Radio factible; 3- Radio del centro; 4- Desfase	66
Figura 34. Esquema que muestra el alcance de los brazos de la impresora Delta. En verde se muestra el área que podría ser accesible sin obstáculos. En amarillo el área que realmente puede ser empleada	66
Figura 35. Tarjeta de control Smoothieboard 5xc para impresora 3D	68
Figura 36. (A) Introduciendo comandos en pronterface. (B) Energización con fuente de poder y prueba de motores. (C) Instalación de electrónica en la base de la caja de control	69
Figura 37. Ensamblado final de la impresora, sin extrusor	71
Figura 38. Conexiones entre el compresor, la zona de almacenamiento y el cartucho de alimento	72
Figura 39. Diseño de las conexiones para el tanque de almacenamiento	73
Figura 40. Diseño de primer prototipo de extrusor de tornillo, fabricado con impresión FDM en PLA	74
Figura 41. Instalación completa de la impresora 3D de alimentos, con el extrusor y la conexión al tanque de presión	75
Figura 42. (A) Evaluación de la presión con tornillo a 20 rpm. (B) Impresión de geometría con tornillo a 20 rpm. (C) Resultado de la impresión.	76
Figura 43. Obstrucción ocasionada por empaques (A). Rompimiento de extrusor debido a la tensión (B)	77
Figura 44. Segundo prototipo de extrusor con las mejoras (A). Extrusor instalado en el centro de la impresora (B)	78
Figura 45. (A) Iniciación de la impresión con masa 65% agua, 35% harina de maíz. (B) Impresión concluida. (C) Impresión calentada en horno eléctrico a 150°C por 90 segundos. (D) Después del calentamiento la impresión se puede tomar fácilmente con las manos	79
Figura 46. Prototipo de extrusor de multiconexión, varias entradas, una sola salida un solo motor (A). Extrusores independientes, un motor para cada ingrediente (B)	80
Figura 47. La ubicación actual de las dos boquillas con respecto a la boquilla colocada al inicio de la experimentación	81
Figura 48. Primer resultado de alimento impreso usando dos extrusores sin calibración. El exterior está elaborado de masa de maíz 35% harina, 64% agua y los frijoles disueltos en 10% de agua	82
Figura 49. Explosión de la conexión por la presión debido a un mal diseño	84
Figura 50. Cartucho con rosca y conexión neumática (A). En la salida se añade un plástico film perforado para facilitar el desalojo de alimento con la presión y evitar que salga o se exponga (B)	85
Figura 51. Masas de harina en diferentes proporciones	86
Figura 52. Tamizado de harina de maíz con malla Tyler número 40 (A). Se visualiza la cascarilla y trozos de grano de maíz muy gruesos, estas partículas representaron casi el 25% del empaque y fueron causantes de las obstrucciones (B)	87
Figura 53. Resultado de la extrusión de masa, formulaciones elaboradas con harina y 66.7, 69.2, 71.4, 73.4 y 75% de agua. Las masas con mejor aspecto tienen 69.2 % y 71.4% de agua	88

Figura 54. Prueba para observar decaimiento en las masas y estabilidad. Las formulaciones son elaboradas con harina y 66.7, 69.2, 71.4, 73.4 y 75% de agua. Las masas con mejor aspecto tienen 69.2 % y 71.4% de agua	89
Figura 55. (A) Las muestras se colocaron en papel film y se envuelven, quedando como un "salchichón"(B). Posteriormente los alimentos se insertan con una duya formada por el empaque al cartucho de la impresora (C)	92
Figura 56. Cubos para calibración de extrusión y parámetros, diseñados con Fusion 360	93
Figura 57. Vista previa del alimento modelado en CAD desde el software de fileteado Simplify3D, desde donde se puede realizar la modificación de instrucciones del código G.	94
Figura 58. Deformación de la impresión debido al empuje de deposición de las capas	100
Figura 59. Representación de geometrías iguales con distintas alturas de capas, la de mayor número de capas tenderá a aplastarse más por la presión generada por las constantes deposiciones	101
Figura 60. Anchura de extrusión excesiva ocasionado por el exceso de presión, la imagen izquierda muestra un filamento grueso de 3 mm que se sale del parámetro y del lado derecho se representa el filamento establecido en los parámetros de 2.2 mm	101
Figura 61. Impresión de letras con los parámetros establecidos anteriormente	102
Figura 62. Freído de las letras elaboradas con impresión 3D con masa de maíz	102
Figura 63. (A) Diseñando un barco 3DBenchy con masa de maíz. (B) Prueba experimental de impresión de barco 3D; (C) El colapso es debido al peso y que no se usa la boquilla adecuada, la cual debe de ser de 1 mm	104
Figura 64. Cubo de 30 mm seccionado en distintos ángulos, su interior tiene otra geometría, se trata de otro cubo de 20 mm. Cada geometría puede configurarse de forma distinta	105
Figura 65. El comienzo de la impresión es problemático con superficies muy lisas, mejorando solo hasta cambiar la superficie	106
Figura 66 (A) Resultado de impresión con doble extrusión. (B) Calentamiento con horno de microondas por 30 segundos. (C) Calentamiento con horno eléctrico por 450 °C durante 3 minutos. (D) Impresión cortada a la mitad	107
Figura 67. Otras de las geometrías que se emplean para los dos extrusores, con las que se intentó asemejar alimentos típicos mexicanos como: una "gordita" (A), un "sope" (B) y un "tlacoyo" (C). En azul se representa la deposición de masa y en verde la deposición de frijoles	108
Figura 68. Impresión de un alimento que intenta asemejarse a un producto mexicano denominado coloquialmente "gordita". El proceso comienza con la impresión del alimento (A), sigue el calentamiento en aceite (B) y se divide en dos para observar la cocción de la masa y los frijoles (C)	109
Figura 69. Alimento impreso asemejando un "tlacoyo", el cual después de ser impreso se calentó en horno eléctrico a 250 °C por 10 minutos	109
Figura 70. Impresión de "sope" (A), el cual posteriormente es calentado a 250°C en un horno eléctrico por 5 minutos (B).	110
Figura 71. Viscosidad aparente de las distintas reformulaciones de masas en donde se compara la masa de 71.4% de agua de 65 KPas, con las masas con aditivo 1 de 65 KPas y la masa de aditivo 2 de 41 KPas	112
Figura 72. Viscosidad aparente de los frijoles donde se puede observar un pico de 1.4 KPas	113
Figura 73. Resultados de extrusión de cubos de 20 mm con diversas formulaciones de masas, se puede apreciar un completo alisamiento de la masa con aditivo 2 añadida	114
Figura 74. Evaluación sensorial de "sopes cúbicos". (A) sabor, (B) adhesividad, (C) olor, (D) dureza, (E) apariencia	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Métodos para la automatización de los alimentos elaborada por el MIT	16
Tabla 2. Características de distintas impresoras de deposición	22
Tabla 3. Se muestran algunas de las impresoras que se encuentran en el mercado, así como sus principales características y fabricantes	23
Tabla 4. Opiniones generales acerca de las nuevas tecnologías implementadas en sectores de la industria alimentaria	30
Tabla 5. Composición química proximal de las principales partes del grano de maíz	34
Tabla 6. Proteínas presentes en el grano de maíz	34
Tabla 7. Composición química de distintas variedades de frijol	36
Tabla 8. Composición proteica del frijol Bayo	37
Tabla 9. Formulaciones de masas en diferentes proporciones para el uso en impresora	49
Tabla 10. Conversión de coordenadas angulares a cartesianas para cada una de las columnas de la impresora	67
Tabla 11. Resultados de las evaluaciones realizadas a las formulaciones de las masas	90
Tabla 12. Evaluaciones para masas de maíz y frijoles con modificación de diferentes parámetros como presión, RPM, y formulación	95
Tabla 13. Modificación de parámetros partiendo de la prueba 19	103
Tabla 14. Las reformulaciones propuestas ajustan la retención de agua y el sabor con la adición de sal	113

RESUMEN

La producción de alimentos automatizada es una tecnología que ha sido implementada principalmente en industrias para la producción masiva de alimentos, las principales ventajas de estas tecnologías son: la disminución de costos, la reducción de contaminantes, la eficacia en el aprovechamiento de recursos y por supuesto la rapidez y la cantidad de la producción. Adaptar esta tecnología en sectores como, hospitales, banquetería, escuelas o los hogares, áreas distintas a la industria, representa actualmente un reto para visionarios, empresarios y entusiastas de las tecnologías de la automatización, ya que consideran que con ello cada consumidor se podría permitir la personalización de sus alimentos, en forma, tamaño, sabor, ingredientes e incluso calorías. Debido a que estas tecnologías están en constante evolución es necesario poder mantenerse a la par de dichos avances. El objetivo de este trabajo fue construir un equipo para la producción de alimentos automatizada, en este caso una impresora 3D modelo Kossel, con el que se pudiera imprimir, por deposición, mínimo un ingrediente y máximo dos. La construcción de la impresora 3D nos permitió experimentar con diversos alimentos, extrusores, presiones, velocidades, así como diferentes formas y seleccionar las mejores condiciones de impresión para dichos alimentos. Los extrusores seleccionados fueron de tornillo sin fin y presión de aire, utilizándose con cartucho de alimento de 60 ml. Los primeros ingredientes empleados fueron masa de maíz y frijoles. Las masas iniciales de maíz se realizaron por la mezcla de harina en proporciones que variaron desde los 53.8 hasta los 75 % de agua; mientras que los frijoles solo fueron macerados con una malla de 1 y 2 mm de anchura de orificio. Posteriormente se seleccionó la mejor masa y se reformuló añadiendo almidón aditivo 1 o aditivo 2, con la finalidad de mejorar su fluidez y estabilidad de deposición; después se evaluaron individualmente mediante una prueba de viscosidad que se realizó con un reómetro HAAKE Rotovisco RT 20 y una evaluación sensorial para los alimentos impresos, al cual se le realizó un análisis estadístico de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5%. El resultado de estas evaluaciones mostró que el uso de aditivo 2 en las masas mejora la fluidez al disminuir la viscosidad aparente; mientras que la evaluación sensorial mostró que la textura y la apariencia se ven ligeramente beneficiados por este ingrediente.

1. INTRODUCCIÓN

La manufactura de adición de material, también conocida coloquialmente como impresión tridimensional, es una técnica encargada de adicionar material capa sobre capa hasta la formación de una estructura (Lipson *et al.*, 2013). El desarrollo de esta tecnología se llevó a cabo en el período de 1984 a 1989 por Charles Hull, inventor de la estereolitografía (Hull, 1984; Wallenius, 2014) y la empresa Stratasys, fundada por Scott Crump quien ideó el modelado de fusión por deposición (Crump, 1989; Wallenius, 2014). La manufactura de adición de material inicialmente surge como una alternativa rápida y eficiente para la construcción de prototipos y modelos a escala, antes de que los productos puedan ser llevados a la producción; esto permitió reducir, costos, manufactura, moldes y tiempo (Gershenfeld, 2012; Gibson *et al.*, 2010). Con el vencimiento de las patentes de invención en 2004 (Hull, 1984) y 2009 (Crump, 1989) se propició una revolución y desarrollo tecnológico en distintas áreas, que emplean la impresión 3D para diversos fines; se puede destacar su uso en la Arquitectura, para la construcción de casas (Serrano, 2015), en la Medicina, produciendo prótesis y órganos funcionales (Zamora, 2015; Mironov *et al.*, 2003). En la ingeniería se ha hecho más accesible el uso a estudiantes permitiendo hacer tangible sus proyectos (Méndez, 2015); así como en creaciones de vestuario desarrollando ropa funcional (Sebková, 2014). En la industria alimentaria la impresión 3D ha destacado año tras año proliferando con novedosas ideas, desde la producción de aperitivos con estrafalarias formas y sabores, restaurantes automatizados con alimentos ajustados al gusto del consumidor, hasta el empleo de impresoras en alimentos para viajes espaciales (Sun *et al.*, 2015a; NASA, 2013). El futuro de la impresión de alimentos es prometedor y se estima que en la siguiente década los hogares podrían contar con una máquina de impresión de alimentos de manera tan cotidiana como el horno de microondas (López, 2015). Esta circunstancia ha generado motivación en investigadores y aficionados quienes han proporcionado constantes mejoras en el diseño técnico de las impresoras alimentarias y en el desarrollo de alimentos para imprimir. Los alimentos empleados en impresión usualmente se enfocan en la consistencia inicial que facilite el flujo y la consistencia final que generan estabilidad en la deposición (Kim, 2015); estas características representan una desventaja, debido a que limitan el uso de una gran variedad de alimentos. El presente trabajo busca realizar el desarrollo de nuevas formulaciones alimentarias de deposición y su evaluación en una impresora Delta Kossel de doble extrusor, con la finalidad de aumentar la gama de sabores, texturas y formas en la impresión de alimento.

1. ANTECEDENTES

1.1. Impresión tridimensional

La impresión tridimensional es una técnica de prototipado rápido mediante el uso de sistemas automatizados con los cuales se fabrican piezas o prototipos a partir de un modelo computarizado (Espinel, 2016).

1.1.1. Categorías de prototipado rápido

El bajo costo, la rapidez, la construcción de formas complejas y la aplicación de estas técnicas para sustituir manufacturas convencionales ha permitido acrecentar su uso en distintas áreas de la industria. El uso de prototipado rápido fue inicialmente empleado en el diseño y análisis de piezas de ingeniería, pero poco a poco los campos de aplicación fueron ampliándose a las áreas aeroespaciales, biomédicas, eléctricas, e incluso domésticas (Wallenius, 2014).

Existen diversas técnicas de prototipado rápido se han dividido en dos grupos principales: procesos sustractivos y procesos aditivos.

El prototipado por sustracción consiste en ir desbastando un material hasta obtener la figura deseada, este tipo de procesos usualmente emplean una gran variedad de tornos, fresadoras y en algunos casos el láser, dependiendo del material que se desee desbastar (Espinel, 2016).

El prototipado por adición, se basa en la formación de figuras bidimensionales sobre algún material a la que progresivamente se añaden capas hasta la formación de una estructura tridimensional. Las tecnologías de adición más representativas, son la estereolitografía, el sinterizado, el laminado y la deposición de material fundido, en ocasiones estos procesamientos se combinan para formar procesamientos mixtos, pero también se desarrollan nuevos procesamientos totalmente distintos a los conocidos (Espinel, 2016). Hoy en día esta tecnología es conocida coloquialmente como impresión 3D.

1.1.2. Definición e historia de la impresión tridimensional

La impresión tridimensional se inventó en la década de los ochenta. Fue desarrollada por dos ingenieros en dos vertientes completamente distintas.

Primeramente en 1984 con el ingeniero Estadounidense Charles Hull, quien estaba realizando estudios sobre fotopolímeros, plásticos que endurecen al exponerse a la luz; en ese momento tuvo la idea de poder generar delgadas capas de plástico superpuestas una sobre otra hasta la obtención de un objeto determinado. A esta tecnología Hull la denominó manufactura estereolitográfica (STL), la cual patentó, para después en 1986 fundar 3D Systems (Wallenius, 2014). Posteriormente en 1988 Scott Crump inventa la impresión de modelado por deposición fundida (FDM) y en conjunto con su esposa fundan Stratasys.

En sus inicios la principal aplicación que se le dio a las impresoras 3D fue para la construcción de prototipos o modelos a escala de productos o de alguna pieza, con la finalidad de poder corregir o mejorar el producto antes de enviarse a producción. La impresión tridimensional, al ser una técnica de procesamiento de prototipado rápido, permite generar piezas con un tiempo relativamente menor al de otras manufacturas, desde algunas horas hasta algunos días por cada impresión; aventajando y desplazando rápidamente a otros procesamientos tradicionales, posicionándose cada vez más en la preferencia de las industrias manufactureras. Con esta tecnología se permitió reducir los costos de producción en los moldes y en las revisiones de diseño (Wallenius, 2014).

Con el vencimiento de las patentes de dichas tecnologías y la globalización de la información por medio de internet, la impresión 3D se fue adentrando más en la vida cotidiana, desde los hogares, hasta las escuelas. La fácil accesibilidad de la impresión 3D propició la generación de dos grupos de usuarios que usan la tecnología para auto mejorar la tecnología de impresión y para mejorar otros campos de estudio; estos son conocidos como: los profesionales y los entusiastas. Los profesionales, como ingenieros e investigadores, compañías como Stratasys y 3D Systems, han logrado introducir y adaptar la tecnología a diversas industrias, que incluyen la ingeniería, medicina, arquitectura, aeronáutica y van constantemente desarrollando nuevas innovaciones, basados en los retos que se presentan en las áreas de estudio.

Por otra parte, los entusiastas, como estudiantes, “Makers” o investigadores independientes, han logrado realizar mejoras en el hardware y software de las tecnologías de impresión 3D existentes, la información recopilada por los entusiastas se ha mantenido abierta a todo el público, con la finalidad de que todos puedan obtener los datos para la construcción y evolucionar las tecnologías de adición. Gracias al grupo de entusiastas, la

impresión 3D se pudo adentrar en sectores de la sociedad que anteriormente eran ajenos a las tecnologías de impresión, como la medicina, la antropología y la arquitectura, entre otros y no solo en la industria manufacturera. Es gracias a los entusiastas que la impresión 3D se ha vuelto más cotidiana, barata y por lo mismo de fácil obtención. Entre los métodos de impresión 3D más conocidos están las que manejan materiales tales como: resinas fotosensibles, termoplásticos, metales, polvos cerámicos y laminados plásticos (Espinel, 2016).

2.1.2.1 Stereolithography (SLA)

La estereolitografía es una técnica de prototipado rápido que emplea un líquido foto polimérico sensible a la luz ultravioleta. Este líquido modifica su viscosidad cuando es expuesto a un haz de luz UV que ocasiona que las moléculas poliméricas se enlazan formando una red, convirtiendo el líquido en sólido. Para el desarrollo de un modelo el equipo primero interpreta los datos del diseño en formato STL y posteriormente genera trazos bidimensionales sobre el líquido foto polimérico con el láser UV, el diseño solidificado se sumerge nuevamente en el líquido y se vuelve a trazar el diseño, repitiendo el proceso hasta finalizar el modelo diseñado en CAD (Figura 1).

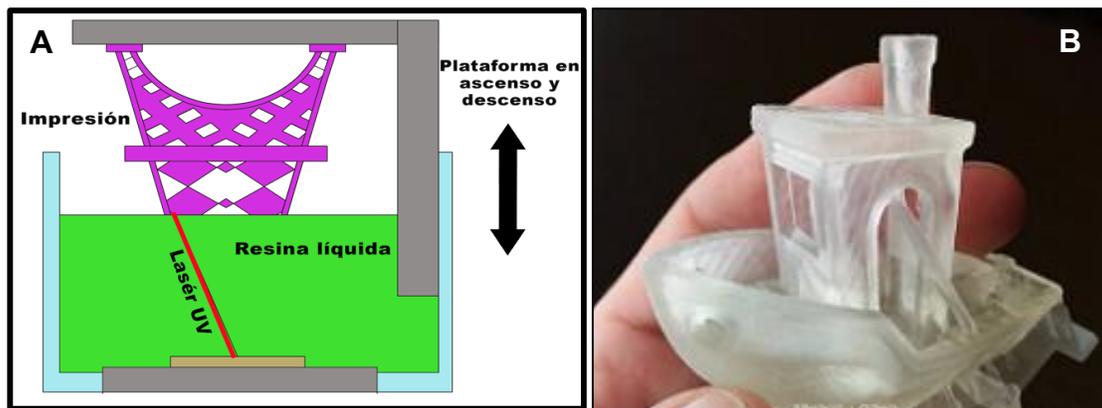


Figura 1. Diagrama básico de funcionamiento de impresión por estereolitografía (A); barco de vapor, empleado para la calibración de impresoras, conocido como “3D Benchy” impreso en estereolitografía (B).

Fuente: Flickr (2015a).

2.1.2.2. Fused Deposition Modelling (FDM)

El Modelado por Deposición Fundida, (FDM, por sus siglas en inglés) es una técnica de prototipado rápido que se ha vuelto muy popular en los últimos años. Este sistema funciona con un tornillo sinfín o un engrane que estará empujando un material sólido polimérico hacia una zona de calentamiento que lo fundirá, como el material sólido se sigue empujando constantemente, el material polimérico sólido desplazará continuamente al polímero fundido hacia una boquilla de diámetro predefinido, a este proceso se le conoce como extrusión (Grames, 2018) (Figura 2). Para el desarrollo de un modelo es necesario cargar el archivo en el equipo en formato STL, el equipo interpretará los datos y comenzará a generar diseños bidimensionales donde se estará sobreponiendo constantemente el material fundido hasta la finalización del modelado diseñado en computadora o CAD (Computer Assisted Design).

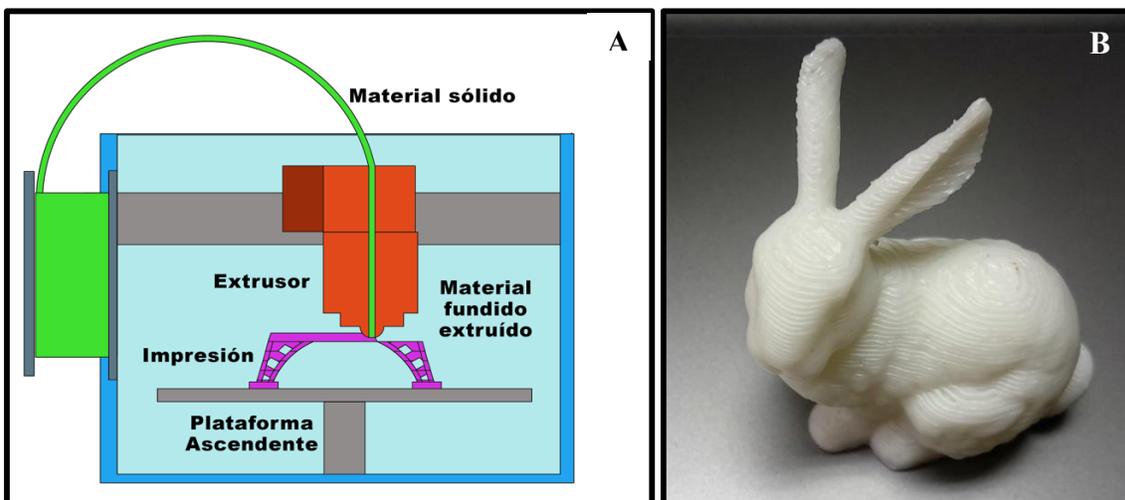


Figura 2. Diagrama de funcionamiento de impresión por fusión y deposición de material (A); conejo elaborado con impresión de material por deposición (B).

Fuente: De Frutos (2016).

2.1.2.3 Selective Laser Melting (SLM)

La fusión selectiva por láser es una técnica de modelado basada en el calentamiento de partículas metálicas de unas cuantas micras mediante un láser; la temperatura que genera el láser casi alcanza la temperatura de fusión del material, pero se evita llegar a ese punto para no generar oxidación en el metal. Cuando las partículas de metal son bombardeadas

por el láser, éstas se calientan a tal punto que comienzan a fundir y unir con el resto de las partículas que fueron bombardeadas por el láser. Para generar un modelo, simplemente es necesario cargar un diseño en formato STL y permitir que la máquina comience a trazar el diseño sobre un polvo; al iniciar se traza con láser sobre la superficie de polvo hasta fundir las pequeñas partículas de polvo, con ello se generara un diseño bidimensional, el dibujo posteriormente se cubrirá nuevamente con polvo, y se pasará nuevamente el láser para realizar la pieza, esto se repetirá hasta la obtención de una figura tridimensional (Figura 3). El sinterizado también puede ser usado con polvos plásticos, técnica conocida como sinterizado selectivo por láser, SLS (por sus siglas en inglés, Selective laser sintering) (Kruth *et al.*, 2003).

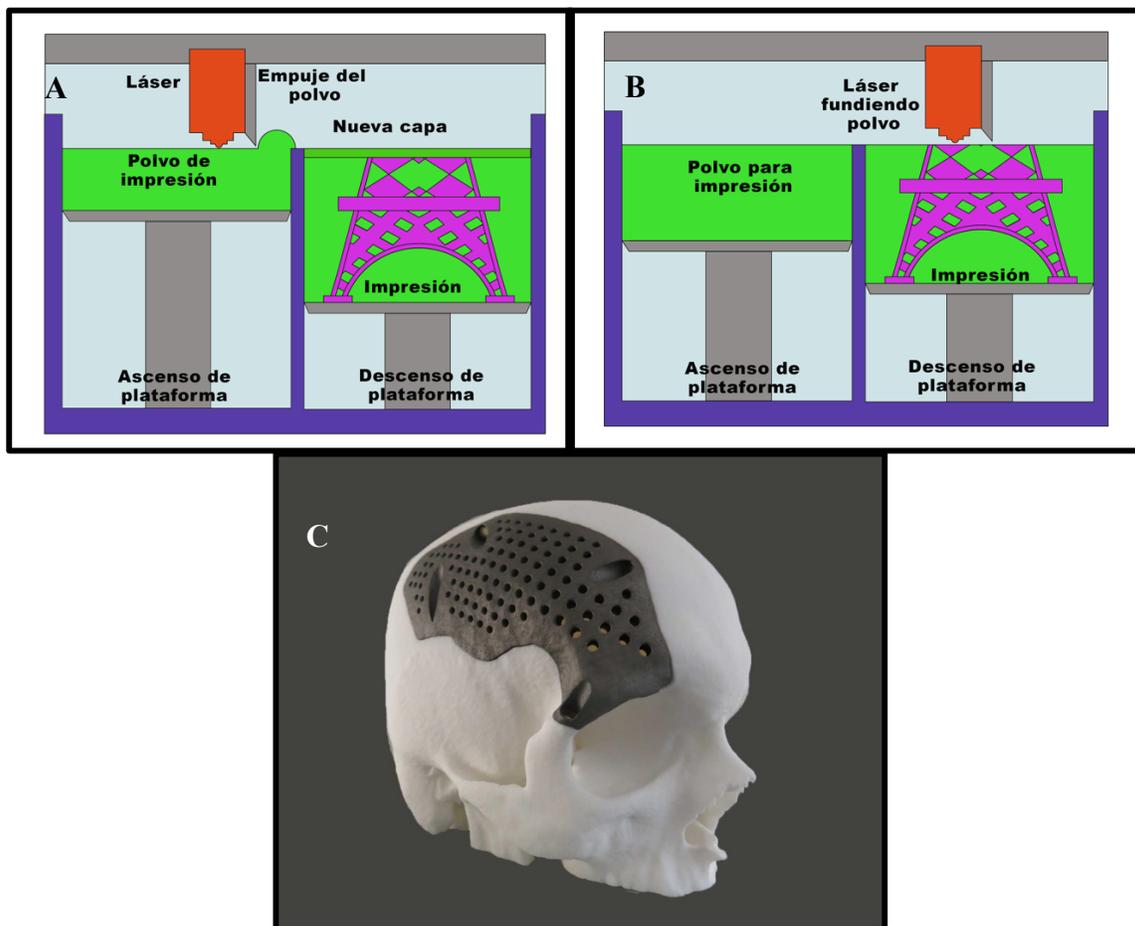


Figura 3. Esquemas que muestran el procesamiento de sinterizado, (A) colocación de polvo, (B) fundición de polvo añadido; (C) prótesis craneal generada con sinterizado, elaborada con Titanium 6Al-4V, amalgama de titanio, aluminio y vanadio.

Fuente: Plewa (2018).

2.1.2.4. Laminated object manufacturing (LOM)

La manufactura de laminación de objetos es una técnica basada en la sobre posición de láminas cortadas desde el perímetro de la pieza diseñada en CAD. Esta técnica usa un rodillo que hace desplegar y sobreponer láminas de papel, plástico o metal y con ayuda de un láser son cortadas por el contorno definido por el diseño. Cuando el diseño se termina de cortar, un rodillo hace girar la lámina para reemplazarla por una nueva y el proceso de corte y reemplazo se realiza continuamente hasta terminada la pieza (Palermo, 2013). La adhesión de cada lámina se realiza con algún adhesivo o por calentamiento térmico (Figura 4).

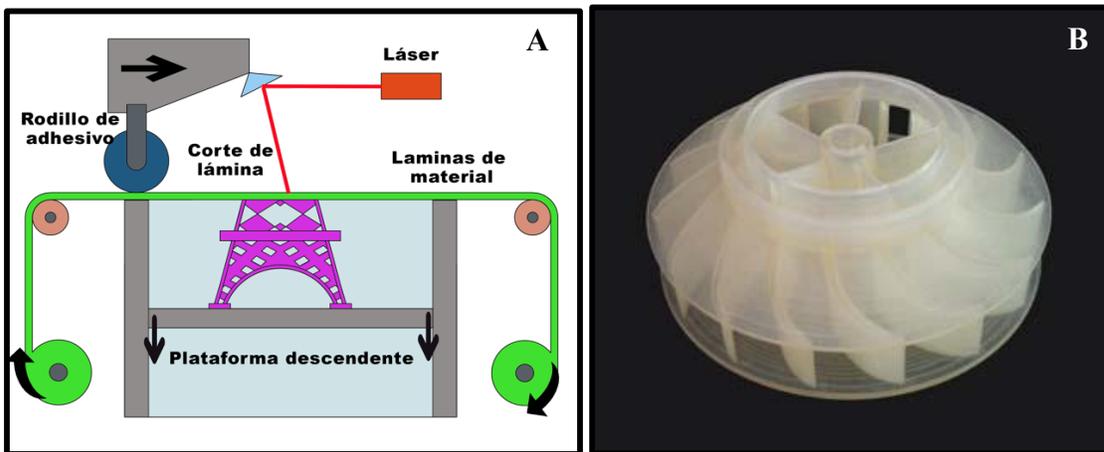


Figura 4. Esquema de funcionamiento de una impresora LOM (A); pequeña turbina impresa en una impresora LOM (B).

Fuente: Waterman (2010).

2.1.2.5. 3D Inkjet printing (3DP)

La impresión tridimensional por inyección de tinta es una combinación de técnicas que ha permitido generar modelos precisos y a color, del diseño elaborado en computadora (Figura 5). Este procesamiento mezcla la tecnología de sinterizado y la tecnología de impresión de tinta de una impresora tradicional para papel. Del mismo modo que en el sinterizado, una capa de polvo es asperjada con adhesivo con el mismo tipo de inyectores empleados por las impresoras de papel; el pegamento mantiene unidas a las partículas de polvo que posteriormente secará y formará una estructura sólida; a continuación, entrará en juego el resto de los inyectores encargados de aportar color. La expulsión de tinta se realiza de

forma coordinada en el perímetro de la figura formada por aspersiones de adhesivo y mediante escala cromática se disparan los tres colores principales, magenta, cian, amarillo, para la formación de más gamas de colores; posteriormente, una capa de polvo cubre la impresión bidimensional, y nuevamente comienza la aspersión de adhesivo y colorantes. Este proceso se repite hasta la finalización del modelo (Venkat, 2008).

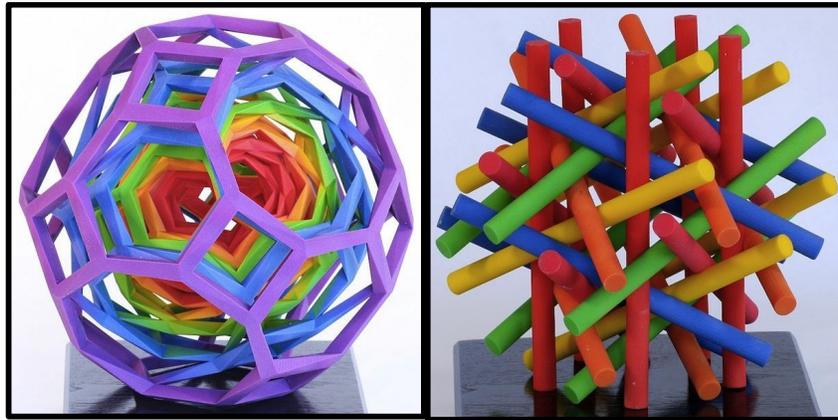


Figura 5. Esculturas realizadas a partir de modelos matemáticos, elaborada con impresora Zprinter 650, la cual lanza chorros de aglutinante y tinta sobre un polvo plástico para poder formar las piezas tridimensionales y a color.

Fuente: Fleming (2012).

2.1.3 Proceso de impresión

Aunque existan variedad de materiales y técnicas, para fabricar una pieza mediante impresión 3D, todas siempre llevarán operaciones comunes para el manejo y la correcta manufacturabilidad de las piezas que se imprimirán. Dichas operaciones comienzan desde el diseño del modelo y concluyen hasta la limpieza de la pieza final impresa. A continuación se describen los pasos (3D CAD Portal, 2012):

i) Diseño asistido por computadora (CAD)

Se diseña un modelo digital mediante un Software especializado, dependiendo del modelo a diseñar, por ejemplo piezas mecánicas o que necesiten precisión, requieren softwares de ingeniería, esculturas y formas humanas, podrían requerir software de modelado.

ii) Conversión a archivos STL (Standard Triangle Language)

El modelo producido en CAD, se guarda y se convierte a un archivo STL, archivo estándar adoptado por la mayoría de los sistemas de prototipado rápido; la característica principal

de los archivos STL es la transformación de la pieza diseñada en computadora a facetados triangulares que al juntarse forman una malla poliédrica aproximada del modelo elaborado en CAD que contendrá las coordenadas donde se encuentran los vértices y la normal de la cara que indica la dirección del objeto. Los archivos convertidos en archivos estereolitográficos carecen de curvaturas debido a que su superficie está constituida exclusivamente de facetados triangulares; por lo que una curvatura relativamente perfecta solo se trata de un mayor número de facetados, lo que implica mayor número de coordenadas y por lo tanto mayor peso en el archivo STL (Espinel, 2016).

iii) Acomodo de la pieza

Cuando el archivo STL está listo, se manda al software que controlará la impresora; ahí es donde se establecerán los parámetros de impresión como: volumen, cantidad de material, tamaño y la orientación; así como la localización de la pieza con respecto a la superficie. También se corroboran los parámetros y posteriormente el archivo se seccionará en diversas partes bidimensionales que contendrán las coordenadas de impresión, a este proceso se le conoce como fileteado. Del modelo fileteado se obtendrá un archivo que contendrá las coordenadas necesarias para que la impresora pueda interpretar las dimensiones y la dirección. Estos archivos fileteados son conocidos como G-code (código G), nombre como se le conoce al lenguaje de programación de las operaciones para máquinas de control numérico por ordenador (CNC) (Ventura, 2014) y en el caso de las impresoras a color también contendrá los archivos, RGB que se encargarán de colorear el perímetro de la pieza (Espinel, 2016).

iv) Manufactura del prototipo

La máquina interpreta las coordenadas que generará los movimientos de los ejes y de los extrusores o boquillas y construye capa por capa hasta que el modelo se haya completado.

v) Post procesamiento

Consiste en la remoción de imperfecciones y limpieza de materiales en exceso que son normales en el desarrollo de prototipos por estas técnicas. Cada máquina requiere en su prototipo un tratamiento exclusivo de limpieza de acuerdo al material empleado y el tipo de impresora usado y debe realizarse con sumo cuidado.

2.1.4. Situación nacional y mundial

Las ventas de impresoras 3D han incrementado en todo el mundo, su demanda se ha visto favorecida en la industria debido a que han permitido reducir los costos, incrementado la eficiencia y aumentado la innovación en los productos, permitiendo equivocarse con mayor rapidez al momento de realizar un nuevo producto y corregirlo. América del norte cuenta con el 40% del mercado de impresoras, Europa con el 28% y Asia pacífico con el 27%. México emplea esta tecnología principalmente en la industria automotriz y la aeronáutica, primordialmente para la fabricación de prototipado (Wohlers Report, 2015; Forbes México, 2017).

En México el costo de las impresoras 3D aún es elevado, pero gracias al movimiento “Maker” es posible fabricar y personalizar una impresora 3D a bajo costo ya que en internet existen foros y páginas de código abierto que permiten obtener la información necesaria para manufacturarla. En una entrevista con Alejandro Ruiz socio de Inky, empresa mexicana encargada de la comercialización de productos de impresión de tinta e impresión tridimensional, menciona que el mercado de la impresión 3D en 2017 ha incrementado sus ventas 300% en comparación al 2014, incluso sin la disminución de los precios de las impresoras 3D (Ruiz, 2017), atribuye este crecimiento a que la impresora 3D ha podido ser adoptada con facilidad por estudiantes y empresas de arquitectura e ingeniería; ya que les ayuda en la construcción de maquetas y prototipos más rápido que de la manera tradicional, algo que anteriormente podía llevar meses en ser elaborado ahora solo requiere de días e incluso horas. Otro campo que está sacando provecho de la tecnología de impresión 3D, comenta (Ruíz, 2017) es en la medicina al desarrollar férulas a la medida del paciente mediante el escaneo del área afectada, lo que conlleva grandes ventajas en comparación con las férulas de yeso, ya que dicha técnica mejora la movilidad y el aseo del paciente (Wohlers Report, 2015).

2.1.5. Futuro de la impresión tridimensional

El mercado de la impresión tridimensional está comenzando a surgir a pesar que lleva más de tres décadas existiendo, esto era debido que el costo de las impresoras y a patentes vigentes las hacia una tecnología exclusiva de la industria. En el 2009 vence la patente de la tecnología de impresión de modelado de deposición por fusión (Crump, 1989); la técnica

de impresión más empleada hoy en día; con esto los precios de las impresoras comenzaron a disminuir sus costos de fabricación y producción, ocasionando que las ventas y la difusión de las mismas se incrementará; con esta relativa accesibilidad a la tecnología se deduce un inminente crecimiento de la tecnología.

En el 2016, la tecnología de impresión tridimensional sólo está presente en 0.04% de la manufactura global, siendo su principal aplicación en el desarrollo de prototipados rápidos, pero se cree que eventualmente podrá acaparar el 5% de la manufactura global.

El mercado de la impresión tridimensional hasta 2016 fue de 7.3 billones de dólares se estima que para el 2020 el mercado hacienda hasta 20 billones de dólares (Wohlers Report, 2016).

En el 2018 las industrias comienzan a emplear con mayor frecuencia el uso de la impresora para manufacturar y prototipar. El uso de los plásticos se usa cada vez con menor frecuencia y se sustituye por metales, por lo que se cree que a largo plazo las impresoras que tendrán mayor predominancia en la industria serán las de tipo SLM. También la expectativa de crecimiento de las industrias debido al uso de impresoras aumenta y se intensifica más su uso (Sculpteo, 2018).

En la Figura 6 se muestra la curva de Rogers, la cual está dividida en cinco etapas, la campana, innovadores, adoptadores tempranos, mayoría temprana, mayoría tardía y rezagados; la curva representa el nivel de adopción que tiene una innovación con respecto a la población y permite visualizar la madurez de la innovación y su adopción en la sociedad, además permite predecir la adopción que tendrán la innovaciones en el futuro así como la influencia que imparte cada sector a sectores subsecuentes (Everett, 1983).

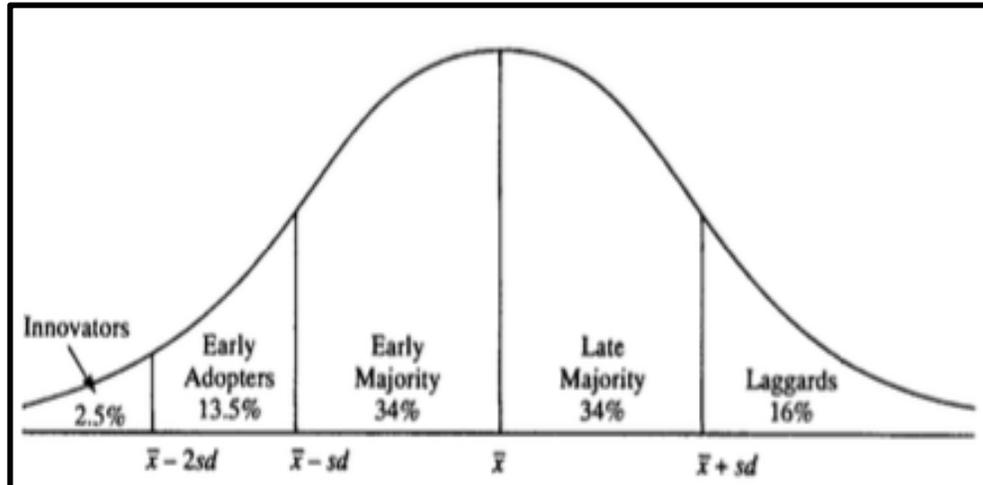


Figura 6. Curva de Rogers, según la teoría de la difusión de las innovaciones, la curva indicaría las etapas en que se encuentra una innovación con respecto a determinados sectores de la población.

Fuente: Everett (1983).

Si la curva de la tecnología de impresión se equipara al crecimiento que tuvieron los PCs en los años 80s, se puede estimar que para el 2040 todos los hogares de Estados Unidos tendrán una impresora (Terence, 2014).

La comercialización de impresoras 3D por internet, papelerías y tiendas de electrónica, se está volviendo tan común que parece ser una señal de que dicha tecnología cada vez se adentrará más en diversos sectores de la sociedad incluyendo hogares, volviéndose tan cotidianas como las impresoras de impresión en papel, indicando que la predicción de impresoras en todos los hogares para el 2040 podría volverse un hecho.

2.2. Concepto de impresión tridimensional de alimentos

Los libros y películas de ciencia ficción describen los electrodomésticos de las cocinas futuristas como dispositivos que pueden producir alimentos de forma casi espontánea con solo seleccionar un menú y presionar un botón, en la actualidad la tecnología por parte de diversas empresas e investigadores cada vez diluye más la ficción y la transforma en realidad, con el desarrollo de diversos dispositivos que pueden llegar a realizar la preparación de un alimento desde las materias primas. Dorna, es un brazo robótico modular que realiza diversas actividades de entre las que se encuentra la preparación de ensaladas (Kickstarter, 2017); robots más complejos inclusive pueden llegar a realizar la preparación platillos de restaurante, este sería el caso de los alimentos elaborados por Moley, Robot de

dos brazos automatizados que siguen las instrucciones de un Chef profesional, para lo cual, previamente se debe descargar la información para su manufactura; el robot incluso puede solicitar el pedido de las materias primas de forma automática (Cook's science, 2017). Pero también existe la tecnología que permite realizar alimentos mediante el uso de manufacturas rápidas a partir de cartuchos de ingredientes pre elaborados o también que pueden ser elaborados por el consumidor. Dependiendo de la cantidad de ingredientes puede derivar un producto simple o uno complejo; tal es el caso de dispositivos como PanCakeBot, que se encarga de realizar panqueques con algún diseño personalizado (3D Printing Industry, 2015); o Flatev, una máquina que realiza tortillas a partir de cápsulas de harina (The spoon, 2017); las máquinas que emplean más ingredientes también son más complejas por que conllevan mayores operaciones. Los dispositivos más representativos para la elaboración de estos alimentos es Foodini, una impresora de alimentos que emplea cartuchos comprados o recargables para decorar platillos o elaborar alimentos tridimensionales mediante la deposición de los ingredientes a través de un extrusor (Business insider, 2016); y ChefJet, impresora de la compañía 3D Systems que se especializa en la producción de caramelos empleando la técnica del sinterizado en polvo de azúcar con pequeñas aspersiones de agua y aglomerante para generar el alimento en 3D; esta impresora además tiene la ventaja de poder decorar la superficie de los dulces a color, mediante la aspersión de tinta en el perímetro de la figura en el mismo momento en que se manufactura la pieza. Sin embargo, a pesar de que la técnica de sinterizado genera figuras más precisas y complejas que la impresión por deposición, tiene la desventaja de no poder imprimir con polvos diferentes en la misma área de impresión por lo que su comercialización se limita a sectores que requieran mucha estética y azúcar en sus productos, como la repostería (Experimenta, 2014).

Del mismo modo que la impresión de plásticos, la impresión de alimentos basa su principio de funcionamiento en la generación de alimentos por extrusión o sinterizado de forma automatizada a partir de un modelo predeterminado desarrollado en computadora.

A diferencia de la impresión con materiales, la impresión con alimentos conlleva una serie de retos tecnológicos surgido de la diversidad de ingredientes, texturas, sabores y estructuras, lo que ocasiona una segunda variedad de problemáticas como es el caso de la conservación del alimento y la formulación correcta para la construcción del alimento impreso. No obstante, las dificultades aún no terminan, reducir los costos de producción y de venta son también un importante cuello de botella que no ha permitido el avance y

desarrollo de la tecnología, ya que entre mayor sea la cantidad de ingredientes que imprima una impresora, más grande tendrá que ser el equipo de impresión y por lo tanto la elevación de costos es inevitable. Estas dificultades han motivado a investigadores y facultades a generar y mejorar ideas para equipos que tengan la capacidad de producir alimentos de forma automatizada y personalizada. El concepto de generar alimentos automatizados ya tiene más de una década investigándose, y ha generado una enorme variedad de ideas. Nanotek instruments inc. patentó en 2001 un equipo de prototipado rápido para alimentos 3D, como por ejemplo para el diseño de un pastel de cumpleaños (Sun *et al.*, 2015b). Nico Klaber también realiza un avance al mezclar la cocina molecular con la impresión 3D y fue el detonante para el uso de multi-extrusores que aumentarán la variedad de alimentos. Posteriormente otros investigadores diseñaron cartuchos que permitirían personalizar aún más el alimento (y más adelante se generarán interfaces para la selección de las características del alimento, como cantidad, textura, forma entre otras propiedades. El Instituto Tecnológico de Massachusets (MIT); posteriormente introduce el concepto de gastronomía digital para impresión de alimentos, en donde plantea tres aspectos clave para la producción de alimentos automatizada, mezclado, modelado y transformación. Aunque el concepto propuesto por el MIT es el más cercano a la realidad sobre la automatización de alimentos, técnicamente su idea todavía es poco factible. En la tabla 1 se muestran diferentes propuestas de máquinas para la producción de alimentos, y compila las características y dificultades para llevarlas a cabo. Sin embargo, conforme el avance de la tecnología de impresión de alimentos se vaya realizando, muchos inconvenientes técnicos se irán resolviendo, del mismo modo que sucedió con la impresión 3D tradicional. El desarrollo además se potencializará cuando se comiencen a visualizar los mercados potenciales para su uso que van desde la preparación de alimentos para hotelería, cáterin, publicidad, hasta para la elaboración de alimentos para pacientes en los hospitales o incluso para uso doméstico, siendo estos dos últimos los mercados más importantes para los visionarios y emprendedores. Jeffrey I Lipton, entusiasta e investigador de la impresión de alimentos, menciona que existen dos razones principales para la personalización de los alimentos: salud y preferencia (Lipton, 2017).

Tabla 1. Métodos para la automatización de los alimentos elaborada por el MIT.

Método	Principal concepto	Diseño de plataforma	Dificultades
Virtuoso Mixer	Combinar y mezclar diversos ingredientes y controlar sus cantidades, tipos y fuentes.	+Capa superior: contenedor de almacenamiento de monitorización de temperatura, humedad y peso. +Capa intermedia: cámaras de procesamiento dedicado a mezclar, batir y moler. +Capa inferior: unidad de control con termoccontrol.	+Distribución y diseño de medidas entre las capas. +Limpieza de la máquina. +Minimización de residuos.
Digital Fabricator	Modelar y cocinar ingredientes combinados con formas específicas y dimensiones definidas.	+Refrigeración de cartuchos de alimento. +Tres cabezales de impresión/mezclado sobre la superficie de impresión. +Cámara de fabricación.	+Rellenado de cartuchos. +Limpieza de la máquina. +Fuente de los materiales, cabezal. de mezclado y sistema. de almacenamiento.
Robotic Chef	Transformar ingredientes existentes a nuevos sabores y patrones de diseño.	+Dos a cinco grados de libertad en brazos robóticos. +Un cabezal que localice transformaciones como cortes, perforaciones y dispensado vía jeringa.	+Diseño y programación para la fabricación de diversas formas en los alimentos. +Complicada manipulación.

Fuente: Sun et al. (2015a)

Esto significa que en el sector de la salud existe la posibilidad de poder producir alimentos a la medida de los pacientes o de acuerdo a sus requerimientos, controlando la cantidad de calorías, vitaminas, nutrientes, composiciones y muchos más. Un ejemplo donde podría desempeñarse la impresión de alimentos sería para la producción de platillos que pudieran prevenir las alergias alimentarias, debido a que en las últimas tres décadas se han incrementado el número de personas con alergias alimentarias especialmente en niños. Aproximadamente entre el 6 y 8% de la población infantil mundial ha comenzado a

presentar una alergia a causa de diversas fuentes de alimentos como: huevo, lácteos, trigo, nueces, soya y moluscos principalmente (DuToit *et al.*, 2016). Elaborar alimentos libres de alérgenos son solo una de las muchas aplicaciones en las que se ha pensado en el sector salud, ya que también se tiene pensado generar alimentos visualmente atractivos para niños o incluso alimentos que ellos mismos puedan diseñar y tienen el objetivo de hacer un alimento más estético que puede ayudar a mejorar el apetito de los pacientes y mejorar su condición médica.

La personalización de los alimentos debería tener un efecto de transformación beneficioso para la salud del ser humano permitiendo la reducción de los vectores de contaminación, evitaría las contaminaciones cruzadas, permitiría ajustar la dieta del consumidor de acuerdo al perfil del usuario e incluso poder planificar nuestros alimentos con semanas o meses de anticipación desde cualquier dispositivo móvil.

2.2.1 Categorías de impresión de alimentos

Las técnicas de impresión para alimentos pueden clasificarse en dos grupos generales, impresoras por deposición e impresoras por sinterizado. Las impresoras por deposición, generan alimentos a partir de la extrusión de ingredientes en estado líquido o semilíquido, como pastas, purés, o semilíquidos por atemperado; las impresoras por sinterizado generan estructuras alimentarias tridimensionales a partir de la fusión o adhesión de partículas de un alimento en polvo o mediante aspersiones de agua y aglutinadores (Godoi *et al.*, 2016).

2.2.1.1. Sinterizado

El sinterizado en alimentos emplea dos técnicas básicas para lograr la adhesión de las partículas, por aglutinadores y por calentamiento.

2.2.1.1.1. Sinterizado por aglutinación

El sinterizado por aglutinamiento realiza pequeñas aspersiones de agua con aglutinador sobre un fino polvo que puede estar constituido por diversos ingredientes como, azúcar, almidón o incluso chocolate; la estabilización del polvo se puede lograr a partir de la aspersión de agua, en el momento en que el líquido evapora las partículas se mantienen unidas a partir del aglutinante (Wang *et al.*, 2017; Godoi *et al.*, 2016). La técnica puede

variar dependiendo del ingrediente y el adhesivo. La ventaja del sinterizado por aglutinación es que puede generar productos con estructuras complejas y detalladas. Empresas como 3D Systems incluso han añadido un sistema a sus impresoras que permite colorear las piezas a partir de aspersiones de tinta sobre el azúcar. La desventaja que tiene la impresión por sinterizado es que de momento solo puede emplearse un solo ingrediente, por lo que limita su uso a repostería (Figura 7).

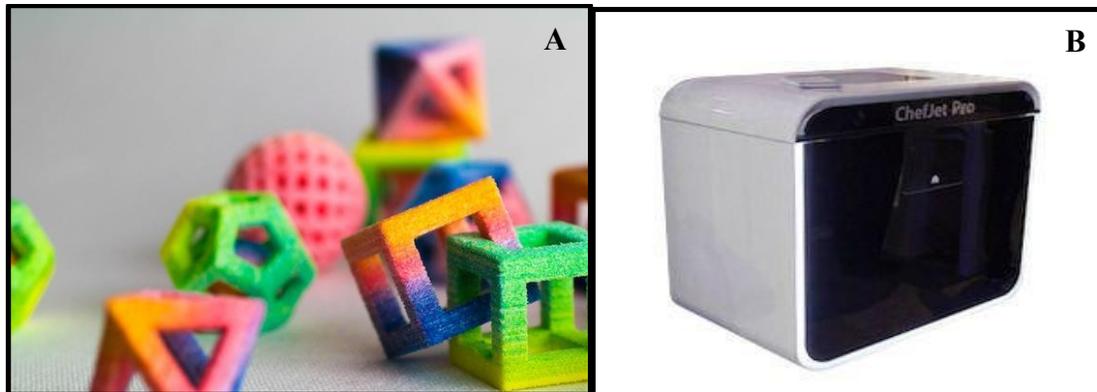


Figura 7. Resultado de la impresión por sinterizado de aglutinante (A); 3D systems ChefJet Pro (B), que además emplea un proceso para entintar el polvo similar a las impresoras sobre el papel.

Fuente: Streams (2014).

2.2.1.1.2. Sinterizado por calentamiento

El sinterizado por calentamiento usualmente se emplea en ingredientes que pueden fundirse y solidificarse rápidamente. En este caso el azúcar es el material que cumple estas condiciones. Para lograr derretir el azúcar se emplea un láser que va trazando el diseño sobre la capa de azúcar. Ya que el láser puede derretir con mucha facilidad el azúcar, el desarrollo de la pieza puede llevarse a cabo con mayor rapidez; también se pueden emplear pequeñas ráfagas de aire caliente que derriten las partículas de polvo (Wang *et al.*, 2017; Godoi *et al.*, 2016). En el instante en que el azúcar se ha enfriado, se logra generar estructuras sólidas y con mucha estabilidad (Figura 8).

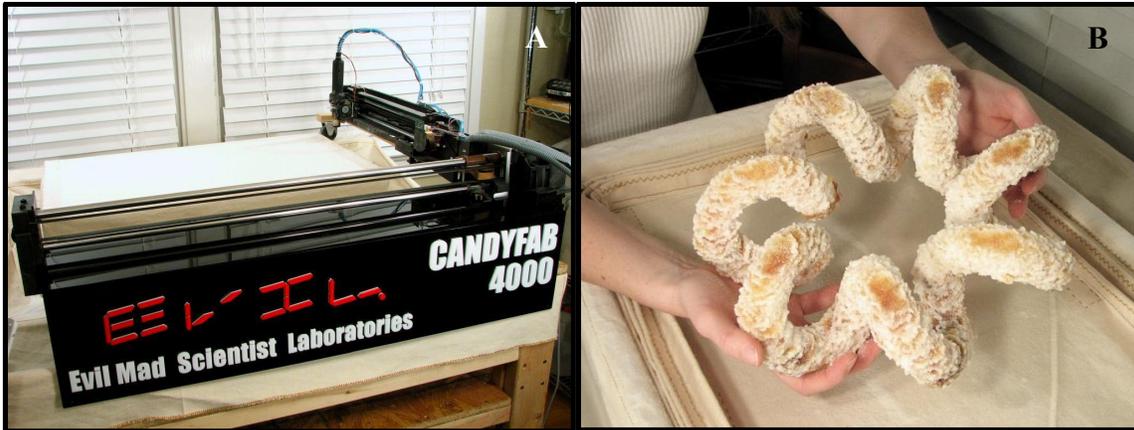


Figura 8. Impresora de azúcar CandyFab 4000 (A). Resultado de sinterizado por aire caliente usando CandyFab 4000 (B).
Fuente: Candyfab (2014).

2.2.1.2. Impresión por Chorro

La técnica de impresión por chorro realiza pequeñas descargas de alimentos semilíquidos gota a gota sobre una superficie con o sin movimiento hasta la formación de un diseño tridimensional o bidimensional. Esto se logra mediante una serie de boquillas neumáticas colocadas en varias hileras. Cuando las boquillas son activadas el alimento es liberado y cae por gravedad. La colocación de cada gota de alimento se irá dando de forma precisa por lo que el resultado es totalmente fidedigno al diseño digital (Godoi *et al.*, 2016). Este tipo de impresión es empleada para colocar un diseño personalizado en pizzas, pasteles o galletas o hacer alimentos tridimensionales desde ingredientes frescos (Figura 9).

2.2.1.3. Impresión por deposición

La impresión por deposición tiene mayor adopción para el desarrollo de alimentos impresos, sobre todo para los que son elaborados en tres dimensiones. Esto es debido a que tiene más ventajas con respecto al sinterizado. Por ejemplo: permite el uso de más de un ingrediente para el desarrollo de la impresión; tiene una amplia gama de alimentos que pueden ser impresos; e incluso existe la posibilidad de realizar la cocción de los alimentos dentro de la misma plataforma donde se imprime. La técnica de impresión por deposición ha tenido mucho desarrollo y ha implementado diversas herramientas para generar y adaptar alimentos (Godoi *et al.*, 2016; Sher, 2015).

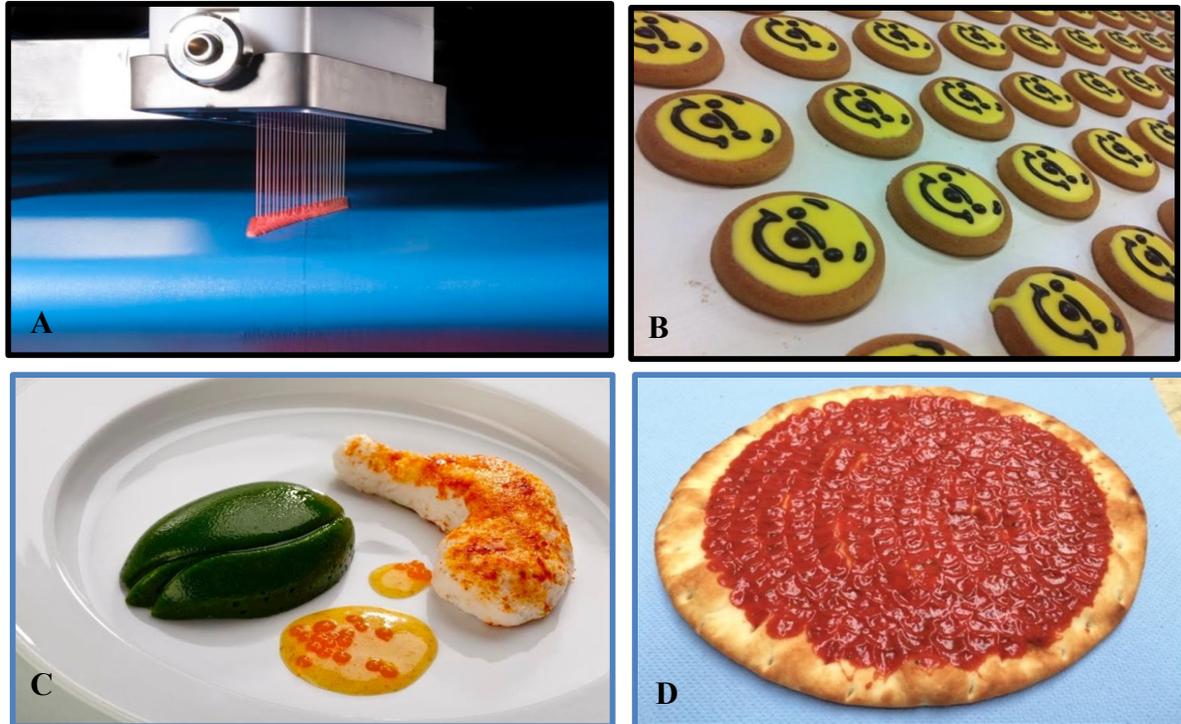


Figura 9. (A) Equipo de impresión por chorro, en donde son lanzados gotas de alimento. (B) Galletas con impresión de una cara de oso. (C) Impresión de alimentos tridimensionales fortificado con nutrientes. (D) Salsa de pizza distribuida correctamente sobre el pan con la técnica de chorro.

Fuente: 3ders (2014a); 3ders (2016a)

La impresión por deposición se puede clasificar de manera general por el tipo de extrusor empleado, siendo los más comunes la extrusión con pistón, por tornillo, presión de aire o combinaciones entre éstas (Figura 10).

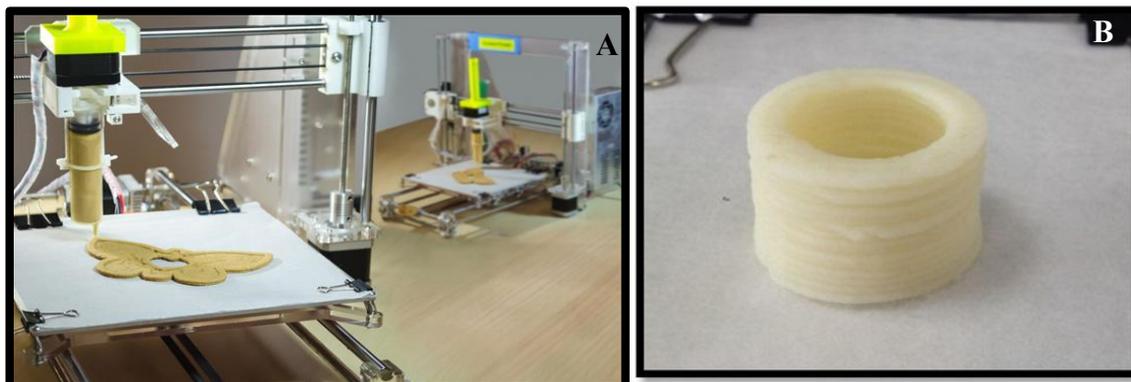


Figura 10. Equipo casero de impresión por deposición (A), imprimiendo con masa de galleta- Ejemplo de impresión de un alimento en 3 dimensiones con una impresora de deposición (B).

Fuente: 3ders (2015c).

2.2.2. Tipos de extrusión en impresoras de deposición

Los tipos de extrusión son principalmente categorizados en 3 tipos a continuación descritos.

2.2.2.1. Extrusión por pistón

Se logra a partir de un émbolo que empuja progresivamente un alimento hasta la boquilla del extrusor. Esta técnica en ocasiones puede estar acompañado de un sistema de calentamiento o enfriamiento en la parte exterior de la boquilla que permiten mejorar las condiciones de los ingredientes ya sea para aumentar la estabilidad o fluidez de los mismos (Sun *et al.*, 2015a).

2.2.2.2. Extrusión por tornillo

Un tornillo giratorio posicionado de manera vertical u horizontal va desplazando el alimento y lo empuja hasta la salida de la boquilla de extrusión, la boquilla también puede estar acompañada por un sistema que permita el acondicionamiento de la temperatura del alimento y que brinden fluidez y estabilidad. La dosificación del alimento es proporcionada por la rapidez del giro del tornillo. El alimento puede ingresar al tornillo por efecto de la gravedad o a partir de un sistema alternativo de empuje (3ders, 2017; 3ders, 2015d).

2.2.2.3. Extrusión por presión de aire

Esta se logra generando un aumento de la presión dentro del recipiente o zona donde se alberga el alimento, dicha presión obliga a desplazar al alimento hacia la boquilla del extrusor, el dosificado puede ser mayor o menor dependiendo de la cantidad de presión que es proporcionada. A menudo este método complementa a la extrusión de tornillo ya que hace ingresar el alimento hacia el tornillo giratorio por el empuje generado por la alta presión (Sun *et al.*, 2015a).

2.2.3 Tipos de impresoras de deposición

Existen cuatro tipos de impresoras básicas que pueden adoptar estas tres técnicas de extrusión, estas se identifican principalmente por la forma en que se desplazan sus elementos para poder realizar la impresión de los alimentos y son conocidas como, Cartesiana, Polar, Delta y SCARA.

La Tabla 2 muestra los distintos tipos de impresoras de deposición, su comparación entre

cada una de ellas y las ventajas y desventajas.

Tabla 2. Características de distintas impresoras de deposición.

Modelo	Movimiento	Área	Multi-extrusión	Manufactura	Costo
Cartesiana	Es veloz, pero se vuelve lenta conforme aumenta el peso sobre los ejes.	rectangular	Puede contar con más de un extrusor.	La manufactura es sencilla.	Entre mayor sea el área de impresión también el costo incrementará.
Polar	No es veloz.	circular			
Delta	Es veloz, pero puede generarse inercia si el extrusor es demasiado pesado.				
SCARA	Es veloz	personalizable		La manufactura no es sencilla.	Su costo es muy elevado.

Fuentes: Logan (2015); 3Dprinterpower (2018)

La Tabla 3 muestra una variedad de impresoras comerciales del mercado y las características básicas de cada una de ellas.

2.2.3.1 Cartesiana

Las impresoras cartesianas basan su movimiento en tres ejes, X, Y y Z. Los desplazamientos se realizan hacia la derecha izquierda, enfrente, atrás, arriba y abajo. Los movimientos de la plataforma de deposición pueden realizar los traslados hacia arriba (eje Z) mientras el extrusor se mueve en los ejes restantes (X, Y) o la plataforma puede hacer movimientos en Z y X, mientras el extrusor lo realiza en Y. Este modelo fue uno de los primeros en adoptarse para el desarrollo de alimentos y también es uno de los modelos más sencillos de calibrar. Uno de los principales problemas que hay en este tipo de impresión es acerca de los movimientos, que pueden llegar a ser muy lentos y más aún cuando el extrusor está encargado de cargar de un cartucho lleno de alimento, lo que podría

entorpecer aún más el desarrollo de las impresiones en 3D (Sun, 2017; Yusuf, 2015).

Tabla 3. Se muestran algunas de las impresoras que se encuentran en el mercado, así como sus principales características y fabricantes.

Empresa	Nombre	Modelo	Técnica	Extrusión	No. de extrusores	Área de plataforma	Imprime	Calentamiento
Natural Machines	Foodini	Cartesiana	Deposición	Pistón	Uno	25x16x12 cm	Purés, pastas, geles	No
3DSystems	ChefJet Pro	Cartesiana	Sinterizado	Aspersión de alcohol	Uno	25x35x20 cm	Polvos	No
Master	Delta	Delta	Deposición 2D	Presión de aire	Uno	15 cm diámetro	panqueques y espumas	Post calentamiento
PancakeBot	PancakeBot	Cartesiana	Deposición 2D	Presión de aire	Uno	65x33cm	Panqueques	Post calentamiento
ORD solutions	Ro Va Paste	Cartesiana	Deposición	Pistón	Dos	28x28x19 cm	Pastas, merengues, purés	No
WASP	Primo	Delta	Deposición	Tornillo y presión de aire	Uno	-	Pastas, purés	No
By Flow	Focus 3D	Cartesiana	Deposición	Pistón	Uno	21.5x22x16 cm	Pastas purés y	No
Print2Taste	Procusini 3.0 (Bocusini)	Cartesiana	Deposición	Pistón	Uno	60x60x65	Pastas purés y	Atemperado
Choc Edge	Choc Creator 2.0	Cartesiana	Deposición	Pistón	Uno	18x18x5 cm	Figuras de chocolate	Atemperado
The Candy Fabproject	Candy Fab 6000	Cartesiana	Sinterizado	Fusión con aire caliente	Uno	21x28x18 cm	Figuras de azúcar	Fusión por calentamiento
MiaC	Message in a cake	Cartesiana	Deposición	Tornillo y presión de aire	Dos	-	Pan tipo mármol	Post calentamiento
Michael Cornelissen	XOCO	Polar	Deposición	Tornillo	Uno	-	Figuras de chocolate	Atemperado

Fuente: 3ders (2015e); 3ders (2014c); 3ders (2014d); Smith 2016; 3ders (2014b); 3ders (2017); Reichelt (2018); 3ders (2015a); Windell (2009); 3ders (2016b); Armstrong (2016), CandyFab (2014); 3ders (2015).

2.2.3.2 Delta

Estas impresoras tienen tres columnas con una separación de 120°, en cada columna hay un carro sobre los cuales están unas varillas que soportan el cabezal de extrusión e imprime sobre una plataforma circular. El funcionamiento de estas impresoras se logra mediante el movimiento independiente de un carro en el eje Z. Dependiendo de la distancia que es recorrida por el carro sobre la columna esta tenderá a inclinar el extrusor sobre la plataforma. La perfecta sincronización de los ejes dará como resultado el movimiento paralelo y perpendicular entre el extrusor y la plataforma, lo que obliga a realizar una impecable calibración para el correcto funcionamiento. Las impresoras delta son más baratas, rápidas y sencillas de fabricar dando paso a que la producción de alimentos puede llevarse cabo de manera eficiente. Probablemente su mayor desventaja es que no puede imprimir gran cantidad de alimentos ya que su plataforma de impresión limita mucho ese aspecto (Sun, 2017; Yusuf, 2015).

2.2.3.3 Polar

Este modelo emplea coordenadas polares para generar la impresión. Su funcionamiento es a partir de una columna que desplaza un brazo con movimiento bidireccional en el cual se encuentra el cabezal de extrusión e imprime sobre una plataforma circular que va rotando conforme la impresión se realiza es decir de forma tangencial (eje Y), el cabezal de extrusión puede desplazarse en el eje Z, es decir hacia arriba y abajo, así como de izquierda o derecha en el eje X. A diferencia del resto de las impresoras esta puede generar círculos perfectos debido a su plataforma giratoria requiere de menos mantenimiento y mínima calibración. Tiene la ventaja de producir alimentos con mayor rapidez, cantidad y emplea menos espacio en comparación a otras impresoras (Sun, 2017; Yusuf, 2015).

2.2.3.4 SCARA

Selective Compliance Assembly Robot Arm (por sus siglas en inglés, SCARA) es un brazo robótico compuesto por dos extremidades que rotan independientemente y que funcionan como articulaciones, a partir de esos movimientos el brazo puede desplazarse sin ningún inconveniente sobre los ejes X y Y, mientras que el eje Z tiene la función de desplazar ambos brazos de arriba hacia abajo. La punta de uno de los brazos es la encargada de realizar la función de extrusión e impresión. El brazo inicialmente fue pensado para desarrollar otro tipo de actividades en la industria manufacturera y alimentaria como,

separación, selección y llenados de envases debido a que tiene movimientos rápidos y precisos, pero progresivamente se fueron encontrando otras aplicaciones para su uso, entre ellas la impresión de alimentos (Shariatee *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2017; Yusuf, 2015).

2.2.4 Alimentos impresos

El desarrollo de alimentos por impresión tridimensional no solo conlleva adaptar los mecanismos de impresión como Software o Hardware para el desarrollo de alimentos, parte clave para el correcto funcionamiento de una impresora alimentaria también implica el ajuste de los ingredientes alimentarios para que estos puedan interactuar de la mejor forma en el equipo de impresión y generar los productos sin contratiempos. Desarrollar ingredientes para emplearlos en impresoras alimentarias es un área en constante investigación, que consiste en poder ampliar el catálogo de materias primas óptimas para la impresión y tiene como objetivo producir alimentos más completos y variados que se asemejen a los elaborados de forma tradicional o incluso ir más lejos y realizar alimentos inimaginables.

Los grandes desafíos en la producción de alimentos para impresión son la reología de los ingredientes, la formulación exacta, la estabilidad del alimento impreso, la compatibilidad con post procesos como horneado o secado y finalmente la velocidad de impresión.

2.2.5. Descripción de parámetros

Los parámetros de impresión son las características que se configuran a una determinada figura o pieza para fijar su tamaño, su posición, el tipo de construcción, la velocidad y demás datos, en una determinada área para que permitan su correcta impresión. Existen gran variedad de parámetros para acondicionar las piezas a imprimir pero para el caso de impresión de alimentos no se requerirá usar todos ellos, solo los que determinen una pieza estable y nítida. Si se requiere posteriormente se pueden configurar el resto de los parámetros. Algunos de estos parámetros se pueden observar en la Figura 11.

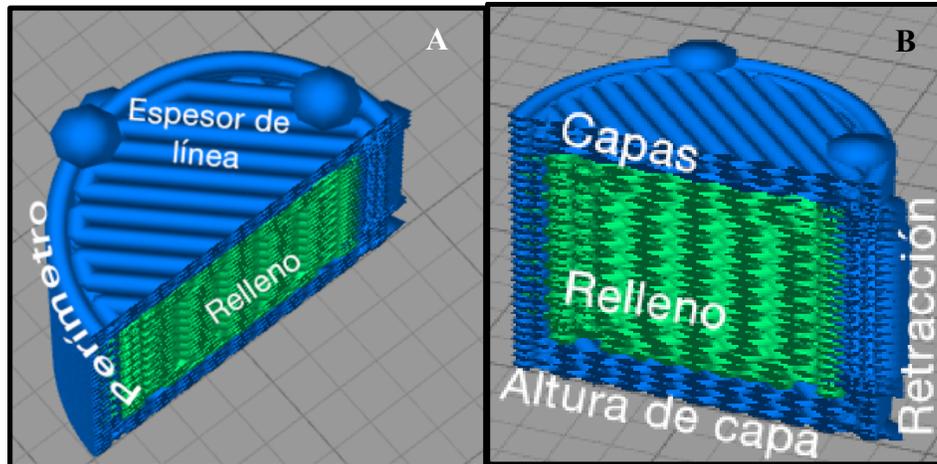


Figura 11. Algunos parámetros de extrusión reflejado en la impresión: perímetros (A) y capas (B).

Se cuenta con enorme cantidad de softwares en el mercado para controlar los parámetros de impresión, estos no son exclusivos de la impresión de alimentos pero se adaptan a la perfección a los requerimientos. Ejemplo de estos softwares son, Cura, Pronterface, Simplify3D, 3DPrinterOS, y muchos más. También es posible generar un código personalizado que describa las condiciones en las que se desea construir la impresión sin el uso de software especializado.

A continuación se describen los parámetros de mayor relevancia en la configuración y construcción de alimentos impresos.

2.2.5.1. Capas y perímetros

Durante el proceso de impresión de alimentos es importante conocer diferentes conceptos, los cuales se describen a continuación (Ingenio, 2015):

Altura de capa (Layer Height): Se define como la altura que tendrá cada deposición o capa. Entre más capas mayor detalle tendremos en la impresión pero en consecuencia los tiempos de impresión incrementan; por el contrario menos capas reducen el tiempo de impresión pero con ello la resolución de la pieza también disminuye.

Altura de la primera capa (First Layer Height): este parámetro define la altura de la primera deposición o capa generada por la impresora. Entre menor sea el parámetro con respecto a la altura de capa, mayor adhesión se tendrá en la superficie; sin embargo, la adhesión también dependerá del alimento. Sin la adhesión no está presente la pieza puede moverse conforme la impresión se vaya realizando.

Perímetros (Perimeters): define la cantidad de perímetros o paredes que puede contener el alimento diseñado, y si se desea se puede rellenar la pieza con puras paredes, haciendo al producto un alimento totalmente sólido.

Capas sólidas (Solid Layers): este comando permite decidir el número de capas sólidas en la parte superior e inferior del alimento diseñado. Si se desea el alimento se puede rellenar con varias capas inferiores y superiores volviendo la pieza diseñada en un alimento totalmente sólido.

Espesor de la extrusión (Default extrusion width): usualmente la boquilla tiene definida la anchura de la extrusión mediante la salida de la boquilla, pero con este comando es posible aumentar aún más la anchura, usando la sobre deposición.

Distancia de retracción (Retraction Distance): se trata de un comando que evita dejar material a la salida de la boquilla del extrusor, al retroceder el tornillo se regresará el alimento y se evita la extrusión en zonas donde no lo requiera.

2.2.5.2. Configuración de relleno

Es importante entender algunos conceptos relacionados con el relleno, los cuales se describen a continuación (Ingenio, 2015):

Densidad del relleno (Fill Density): parámetro con el que se logra rellenar porcentualmente los alimentos diseñados, donde 0% implica un alimento hueco y 100% significa un alimento macizo. Diseños con más relleno consumen más del alimento y por lo tanto su realización tardará más; por el contrario, diseños con menos relleno usan menos alimento y tardan menos.

Patrón de llenado (Fill pattern): Si la pieza llega a tener relleno, este podrá realizarse con un patrón geométrico, como un panal de abejas o líneas entrecruzadas.

Patrón de relleno parte inferior y superior (Top/Bottom fill pattern): también las capas inferior y superior tienen un patrón para cubrir sus superficies, pudiendo seguir patrones rectilíneos o en circunferencia.

2.2.5.3. Velocidades para parámetros

Algunos conceptos de diferentes tipos de velocidades se definen a continuación (Ingenio, 2015):

Velocidad de perímetros externos (External perimeters Speed): se trata de la velocidad a la que se imprime el exterior de la pieza o alimento. Es muy importante mantener la velocidad baja para que el exterior pueda imprimirse correctamente y lucir.

Velocidad de llenado (Infill Speed): definir este parámetro con una velocidad elevada permitirá generar piezas con mayor rapidez ya que al tratarse de la parte interna de la pieza no requiere que esté perfectamente detallada a menos que se requiera.

Velocidad de llenado de la capa superior (Top solid infill Speed): las capas superiores o finales de la pieza tendrán un patrón de llenado que será necesario imprimir a bajas velocidades, ya que esas partes deberán requerir lucir y verse uniformes y estables.

Velocidad de impresión por defecto (Default Printing Speed): se trata de la velocidad a la que la impresora realizará la impresión completa de la pieza o el alimento, más velocidad menor tiempo y menor detalle en la construcción, menos velocidad, pero mayor tiempo para la construcción y mejor detalle de la pieza.

Velocidad de la primera capa (First layer Speed): la velocidad de la primera deposición deberá ser menor con respecto a la velocidad por defecto, ya que la primera capa fungirá como un adhesivo que evitará que se mueva la pieza. Activar o desactivar este parámetro dependerá mucho de la adhesividad de cada alimento.

Velocidad de retracción (Retraction Speed): el comando permite acelerar o disminuir la retracción dependiendo del área que lo requiera.

2.2.6. Situación Social

La producción de alimentos impresos ha impactado de forma positiva en el desarrollo de alimentos y ha dado oportunidad a la generación de iniciativas que fomenten su uso en diversas partes del mundo principalmente en restaurantes. FoodInk es una propuesta de

restaurante en donde la mayoría de los alimentos se imprime, como bocadillos, postres o para la ornamentación de platillos; otro tipo de restaurantes también están comenzando a optar por introducir la tecnología de impresión de alimentos para aumentar la estética de sus alimentos y hacer más atractivos los platillos, tal es el caso de Culinary Lab, un área adjunta de 3D Systems en el cual se desarrollan alimentos totalmente nuevos e imposibles de generar de formas tradicionales (3ders, 2015f). La industria restaurante poco a poco ha estado dando oportunidad a la impresión de alimentos debido a que esta tecnología les permite explorar nuevas texturas y formas extravagantes que permiten resaltar sus platillos y destacarse de la competencia; a pesar de que el desarrollo de alimentos impresos en el sector restaurantero apenas está dando sus primeros pasos, se vislumbra un futuro prometedor que permitirá modificar para bien la forma que nos alimentamos.

Sin embargo, existen otros sectores prometedores en donde la tecnología podría desarrollarse, pero a falta de investigación, experimentación y presupuesto no han podido llevarse a cabo. Mediante la realización de 83 entrevistas generadas con apoyo del Nodo Binacional Universitario I-Corps 2017, se pudo realizar un profundo análisis sobre el comportamiento que tiene una tecnología disruptiva como lo es la impresión de alimentos en los mercados mexicanos y con ello conocer el grado de implementación y comercialización de la tecnología en México.

Los sectores en donde se realizaron estas entrevistas se enfocaron principalmente en restaurantes, banqueteras, comedores industriales, hospitales, reposterías, industrias de alimentos, escuelas de Gastronomía, chocolateras y fueron realizadas a chefs, investigadores, médicos, nutriólogos, empresarios, mercado logos, especialistas en alimentos y gerentes. En I-Corps el objetivo es poder conocer la viabilidad de una tecnología en un determinado mercado sin mencionar la tecnología, esto se logra conociendo a profundidad las inquietudes de los usuarios, gerentes, trabajadores, o consumidores, mediante diversas preguntas sobre su entorno de trabajo, y conociendo a detalle sus problemas más comunes. Las preguntas realizadas refirieron principalmente acerca de las nuevas tecnologías, los costos de las nuevas tecnologías, los motivos por los cuales convendría invertir en nuevas tecnologías, sobre tendencias en alimentos entre otras preguntas, pero todas ellas con referencia a tecnologías nuevas y mercados potenciales. Es importante aclarar que al omitir preguntas sobre la tecnología de impresión de alimentos 3D se evita sesgar la entrevista y con ello se permite ver el panorama completo de las problemáticas generales de las nuevas tecnologías con respecto a los mercados de interés

y la inserción de esas tecnologías. Por ejemplo: las cafeteras facilitan mucho la preparación de café e incluso ofrecen diversas modalidades para hacerlo, pero a menudo quienes las compran no logran aprovechar la totalidad de sus funciones por que resulta complicado y confuso por lo que al final el consumidor o deja de usar la cafetera o solo usa una función de las muchas proporcionadas por la cafetera. Y esas son las respuestas que se querían obtener para divisar la apertura que tiene un determinado sector sobre una tecnología relativamente nueva.

A continuación, se desglosan algunas de las opiniones generales proporcionadas por los profesionales de las áreas (Tabla 4).

Tabla 4. Opiniones generales acerca de las nuevas tecnologías implementadas en sectores de la industria alimentaria.

Sectores	Usuarios	Opinión
Restaurantes Banqueteras Cáterin Hoteles	Chefs Profesores de gastronomía Gerentes	-Las nuevas tecnologías no son perjudiciales, pero requiere de teoría y mucha práctica. -Las tendencias pueden ser pasajeras y muy costosas. -Es importante siempre estar a la vanguardia para ofrecer cosas nuevas a los comensales. -Los dueños de restaurantes quieren alimentos más atractivos y diferentes, porque esto permite competir entre los demás restauranteros y caracterizarlo.
Empresas de producción de alimentos al por menor Chocolateras Reposterías Panaderías	Reposteros Chefs Gerentes Desarrolladores Mercadólogos Productores Ingenieros	-Existen usuarios que solicitan productos personalizados, pero realizarlos es muy costoso para la empresa, ya que implica diseñar una nueva línea de producción o realizar gastos en equipos que solo se usarán una vez. - La demanda por productos orgánicos y naturales está incrementando, debido a que la tecnología nueva para producir alimentos en ocasiones se llega a asociar con productos sintéticos. -Algunos comercios rechazan el uso de nuevas tecnologías por que rompen la técnica tradicionalista de sus productos, sobre todo en la decoración. -La impresión de alimentos no puede competir con productos realizados masivamente, pero se enfoca en brindar una experiencia agradable al consumidor. -En la actualidad la apariencia está jugando un papel importante para la compra de un producto, pero la última decisión la tomará la función que provee el alimento y el sabor. -Últimamente está incrementando la gente que prefiere esperar para tener un alimento de calidad y apetitoso a la vista que la típica comida rápida.

Tabla 4. Opiniones generales acerca de las nuevas tecnologías implementadas en sectores de la industria alimentaria (Continuación)		
Sectores	Usuarios	Opinión
Hospitales Consultorios	Médicos Nutriólogos Dietistas Productores Chefs	<p>- Solo una minoría de los pacientes en los Hospitales podría emplear la impresión de alimentos como una opción para producir sus alimentos, ya que estos requieren un control estricto en su dieta y sus alimentos se basan en purés.</p> <p>-Una impresora puede ser usada en un Hospital para recobrar el apetito de las personas con un platillo atractivo, sobre todo para los infantes e incluso podría evitar traumas posteriores ocasionados por la comida de Hospital.</p> <p>-Tener un aparato automatizado para la producción de alimentos en un Hospital puede ser un lujo, en el que la prioridad radica en optimizar los recursos y atender a el paciente con alimentos nutritivos que lo ayuden a mejorar.</p> <p>-En sus hogares, muchos pacientes a menudo no siguen las dietas o parámetros prescritos por el dietista ya que no hay una forma eficaz de controlar sus hábitos alimenticios, a menos que sea por un constante monitoreo.</p> <p>-Muchos pacientes permanecen largos periodos de tiempo en los Hospitales, por lo que en ocasiones se aburren de recibir los mismos platillos, personalizar alimentos es una buena forma de evitar este problema. Pero no es una prioridad del Hospital.</p> <p>-Muchos padres descuidan la alimentación de sus hijos debido a que no cuentan con el tiempo para atenderlos y preparar alimentos, lo que les ocasiona problemas de sobrepeso y obesidad entre otros trastornos alimenticios. Poder generar alimentos saludables mediante impresión puede ser una forma viable de evitar estos problemas de salud.</p>

Fuente: ICorps (2017).

Cabe mencionar que el estudio anterior fue realizado para conocer la viabilidad del uso de esta tecnología en la elaboración de alimentos mexicanos. Por lo que a continuación se presentan las características químicas de dos granos de importancia económica, nutricional y tecnológica en México: maíz y frijol.

2.3 Origen del maíz

El cultivo del maíz tuvo su origen, en América Central, especialmente en México, de donde se difundió hacia el norte hasta el Canadá y hacia el sur hasta la Argentina. La evidencia más antigua de la existencia del maíz, de unos 7 000 años de antigüedad, ha sido encontrada por arqueólogos en el valle de Tehuacán, México. El maíz fue esencial en las

civilizaciones maya y azteca y tuvo un importante papel en sus creencias religiosas, festividades y nutrición. La supervivencia del maíz más antiguo y su difusión se debió a los seres humanos, quienes recogieron las semillas para posteriormente plantarlas. A finales del siglo XV, tras el descubrimiento del continente americano por Cristóbal Colón, el grano fue introducido en Europa a través de España (FAO, 1993).

2.3.1 Propiedades químicas del maíz

La composición química del grano del maíz depende de varios factores como las condiciones de cultivo, la temperatura, variedad y tipo de maíz, contenido de nutrientes, entre otros (Cowieson 2005; Herrera *et al.*, 1990). El maíz es una planta gramínea de alta productividad y que pertenece a la clase de las angiospermas. El grano se divide en tres partes fundamentales, pericarpio, endospermo y germen (Pérez, 2009), dichas partes se pueden apreciar a detalle en la figura 12.

- Pericarpio

Considerada la cáscara encargada de proteger la semilla de diversos agentes externos como insectos y microorganismos, y ayuda a favorecer la germinación de la semilla mediante el transporte de agua. Dicha cáscara, epicarpio, mesocarpio y endocarpio.

El pericarpio representa entre el 5 y 7 % del peso del grano y químicamente se caracteriza por su elevado contenido de fibra, 67% de hemicelulosa y 63% de celulosa (Pérez, 2009).

- Endospermo

El endospermo está conformado por una gran cantidad de células con gránulos que almacenan almidón, existen dos variedades de endospermo, el endospermo harinoso que se ubica alrededor del germen como una cubierta protectora, mientras que el endospermo vítreo cubre parcialmente el endospermo harinoso y abarca el resto del espacio del grano hasta las paredes de la aleurona, que forma la parte interna del pericarpio. El endospermo representa del 82 a 84% del peso seco del grano mayoritariamente conformado de carbohidratos como el almidón (Pérez, 2009).

- Germen

Está compuesto de dos secciones, axis embrionario y el escutelo, la función del germen es almacenar nutrientes y hormonas hasta la etapa de germinación donde serán movilizadas.

En el escutelo son almacenadas la mayoría de las células de tipo parénquima que contienen organélos o cuerpos de aceite y constituyen el 33 % del germen. De dicho porcentaje el 43 % es ácido linoléico, 36 % oléico, 16 % palmítico y el 1% pertenece a ácidos como el esteárico, linolénico, araquídico, y mirístico (Pérez, 2009).

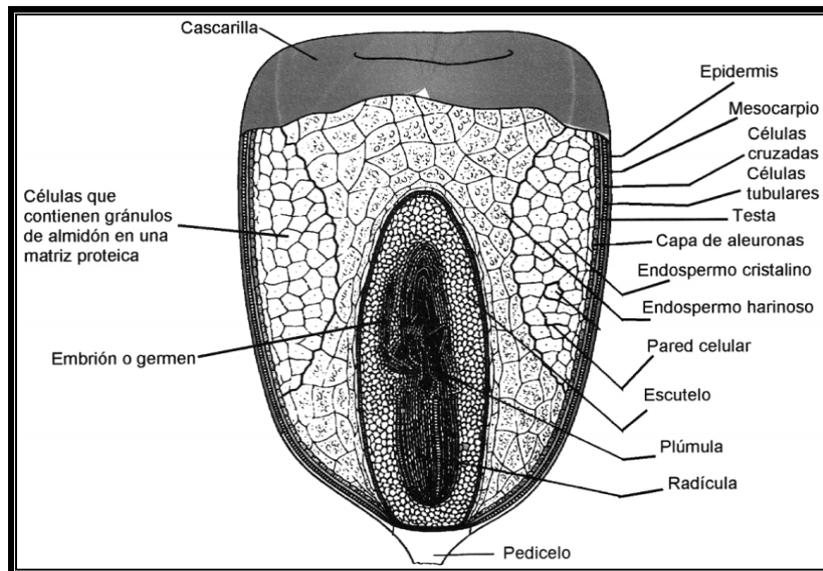


Figura 12. Esquema de las principales partes del maíz.

Fuente: Hoseney y Faubion (1992)

La composición química se muestra en la Tabla 5, y se observa que es rico en proteína y almidón, lo que ha permitido su uso en diversos productos alimenticios tradicionales de la dieta mexicana.

Por otra parte, en la Tabla 6 se muestra el tipo de proteína presente en este grano, en donde se observa mayoritariamente la presencia de proteínas como las prolaminas y glutelinas.

Tabla 5. Composición química proximal de las principales partes del grano de maíz.

Componente	Pericarpio	Endospermo	Germen	Total
Proteínas (%)	3.7	8.0	18.4	9.91
Lípidos (%)	1.0	0.8	33.2	4.78
Fibra cruda (%)	86.7	2.7	8.8	2.66
Cenizas (%)	0.8	0.3	10.5	1.42
Almidón (%)	7.3	87.6	8.3	71.5
Azúcar (%)	0.34	0.62	10.8	2.58

Fuente: Faroni (1993).

Tabla 6. Proteínas presentes en el grano de maíz.

Proteína	Proporción (%)
Albúmina	4-5
Globulina	5-6
Prolamina (Zeína)	50-55
Glutelinas	30-45

Fuente: Bemillier *et al.* (1984)

2.4 Origen del frijol

Las legumbres pertenecen a la familia vegetal *Fabaceae* o *Leguminosae*, el tercer grupo de plantas más numeroso del planeta, de distribución global y cuyo origen se presume hace alrededor de 90 millones de años, con un proceso de diversificación que habría comenzado en el Terciario temprano. Las leguminosas tienen capacidad de fijación biológica del nitrógeno, un hito natural que habría tenido y tiene gran relevancia en el enriquecimiento productivo de los suelos. Se consideran legumbres secas a las semillas deshidratadas comestibles de leguminosas que producen de una a doce granas de diferente tamaño, forma y color dentro de una vaina, ya sea para uso alimentario humano o como forraje animal (FAO, 2016).

2.4.1. Propiedades químicas del Frijol

La especie *Phaseolus vulgaris* es una planta originaria de Mesoamérica la cual tiene alrededor de 8 mil años cultivando, tiempo en cual la diversidad y cualidades de la semilla han incrementado. El frijol es una planta herbácea autógama, es de ciclo anual y se cultiva en zonas tropicales y regiones templadas. El ciclo vegetativo del frijol puede variar entre 80 y 180 días; dicho lapso se encuentra determinado por el genotipo de la variedad, hábito de crecimiento, clima, suelo, radiación y fotoperiodo (Rodríguez 2012).

La estructura externa del frijol está conformada por (Rodríguez, 2012):

-Testa: corresponde a la cáscara, su función consiste en proteger los cotiledones y el embrión del frijol.

-Hilium: es la cicatriz que permanece al desprenderse el funículo.

-Micrópilo: corresponde a una abertura natural existente en la semilla, y permite la absorción de agua para favorecer la germinación.

Rafe: Corresponde a un lóbulo donde se conjunta el funículo y los tegumentos externos del óvulo.

La estructura interna de la semilla es (Rodríguez, 2012):

-Cotiledón: son las zonas donde se almacenan las reservas principales de la semilla, su contenido está conformado principalmente de carbohidratos.

Embrión: el embrión se divide en diversas secciones, radícula, hipocótilo, epicótilo, plúmula y las hojas primarias.

En la figura 13 se pueden apreciar detalladamente las partes anteriormente descritas.

En la tabla 7 se muestra la composición química de distintas especies de frijol, donde se observa que esta leguminosa es rica en proteína, encontradas mayoritariamente en el embrión de la semilla y almidón almacenado principalmente en el cotiledón.

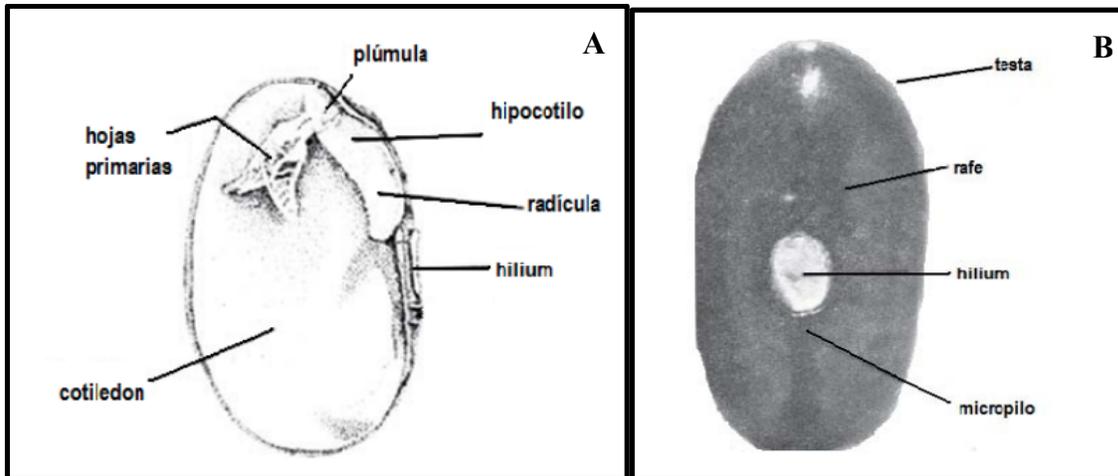


Figura 13. Estructura interna de frijol (A) y estructura externa de frijol(B).
Fuente: Centro Internacional de agricultura tropical, CIAT (1984).

Tabla 7. Composición química de distintas variedades de frijol.

Especie	Agua %	Proteína (%)	Lípidos (%)	Carbohidratos		Cenizas (%)
				Total (%)	Fibra (%)	
Frijol blanco	10.9	22.3	1.6	61.3	4.3	3.9
Frijol rojo	11.4	22.5	1.5	61.9	4.2	3.7
Frijol negro	11.2	22.3	1.5	61.2	4.4	3.8

Fuente: Faroni (1993).

- Proteínas

El frijol negro es una de las fuentes principales de proteína de algunas zonas de México, en especial en comunidades de bajos recursos. Los frijoles habitualmente se consumen con complementos tales como el maíz en las tortillas, dicho conjunto provee una fuente proteica de alto valor nutricional. En las proteínas del frijol prevalecen dos tipos de aminoácidos como se muestra en la Tabla 8, en menor cantidad son los aminoácidos de tipo aromático, mientras que los de mayor predominancia son los de tipo básico y azufrado (Loran, 2013).

Tabla 8. Composición proteica del frijol Bayo

Aminoácido (16 gr de nitrógeno)	% en masa seca
Lisina	7.30
Histidina	2.5
Treonina	3.87
Valina	4.62
Metionina	1.17
Isoleucina	3.73
Leucina	6.51
Fenilalanina	4.72
Triptófano	0.56
Tirosina	2.7
Arginina	5.87
Ácido aspártico	11.1
Serina	5.57
Ácido glutámico	16.27
Prolina	3.97
Glicina	3.31
Alanina	3.74

Fuente: León *et al.* (2011).

- Carbohidratos

La mayor cantidad de hidratos de carbono se concentra en el almidón y en menor cantidad en los azúcares como los monosacáridos, disacáridos y oligosacáridos. El conjunto de estas moléculas representa entre el 55 al 65%, encontrándose el almidón en un 50% con respecto al resto de las moléculas, además es un carbohidrato que puede ser completamente digerido y absorbido por el intestino delgado (Rodríguez, 2012).

- Fibra

La fibra comprende un grupo heterogéneo de polisacáridos tales como celulosa, hemicelulosa, pectina y de algunas otras sustancias que no corresponden al grupo de

carbohidratos, tales como la lignina, cuya característica genérica es que no pueden ser digeridos por el organismo humano, el contenido aproximado de fibra en la semilla de frijol variaría de 1.2% a 2.6% (Rodríguez, 2012).

- **Micronutrientes**

Las legumbres comestibles en general contienen cantidades apreciables de hierro y otros minerales, tales como calcio, fósforo y zinc, del cual los frijoles destacan en este elemento, con una cantidad que oscila entre los 21 y 54 mg/L (Rodríguez, 2012).

2.5. Productos típicos mexicanos e importancia

Al llegar Hernán Cortés y su ejército al imperio Azteca, quedó asombrado por la gran cultura culinaria que en esas tierras había. Ingredientes como maíz, chiles, frijol, jitomate, aguacates, calabazas, chocolate, guajolotes, faisanes, chapulines, jumiles, patos, perdices, gusanos de maguey no fueron suficientes como para que el reino español quisiera que el pueblo mexica quedará sometido; también fueron los utensilios y las técnicas como el molcajete, el metate, el molinillo, el comal, la barbacoa, los mixiotes y la nixtamalización. Con técnicas como el asado directo o indirecto y la cocción al vapor para realizar tamales dentro de ollas de barro envueltas en hojas de maíz o plátano, Mesoamérica empezó a generar la base de la cocina mexicana (Escofet, 2013)

Quizás los españoles lograron la conquista de México prehispánico, sin embargo, no es nada comparado con lo que el México prehispánico logró, conquistar el paladar de todo el mundo con su diversidad de productos; ingredientes icónicos como el jitomate en Italia, el ajonjolí en China o la vainilla en Francia, y muchos más, son productos de herencia mexicana (Escofet, 2013).

Debido al intercambio, la gastronomía mexicana prehispánica evoluciona a la comida mexicana actual, mediante la mezcla de diversas culturas, que da inicio por el mestizaje, perfeccionándose por los aromas de las especies de Oriente y refinándose por las técnicas culinarias más sofisticadas que dejó la breve permanencia francesa en México (Palazuelos, 2010).

Sin embargo, las bases de la comida mexicana prevalecen y se fortalecen a través del tiempo. Platillos coloniales como los chiles rellenos ya existían en los banquetes náhuatl, solo que los rellenaban de jumiles, carne de iguana, frijoles, chapulines en vez de queso, y al igual que nosotros los consumían en tortilla (Escofet, 2013).

Es interesante saber que a pesar de la gran diversidad de mezclas culinarias entre culturas, nosotros aún estemos fuertemente arraigados a los alimentos de nuestros antepasados, con productos tan sencillos y a la vez nutritivos como los tlacoyos, los sopes, las tlayudas, los tamales, que son productos que aún hoy en día tienen vigencia y predominancia en cada esquina de la capital de México con excelente aceptación y con modificaciones mínimas a sus recetas centenarias, por ejemplo en la Figura 14 se observan unos tamales elaborados de la forma tradicional e industrializados corroborando la demanda que tiene este alimento y el intento de la industria para aprovechar ese mercado.



Figura 14. Tamales elaborados de forma tradicional (A) y Tamales empacados de la marca “Costeña” como una forma de modernizar un producto tradicional (B).

Fuente: (Galeana, 2016 y Industria Alimenticia, 2016)

“El futuro de la comida mexicana no está en las tendencias llamadas “fusiones” internacionales... sino en el estudio de sus antiguos productos, recetas y métodos culinarios, fuente generosa de ideas, sabores y texturas. Y, naturalmente, en encontrar la forma de ponerlos al alcance de todos” (De´Angeli, 2011).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollo de alimentos por deposición, mediante el desarrollo y la evaluación de diferentes formulaciones en una impresora tridimensional, para que pueda generar impresiones de alimentos personalizadas.

3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

Objetivo particular 1

Diseño de una impresora tridimensional Delta Kossel con dos extrusores independientes, mediante la utilización de programas de dibujo especializados en el diseño mecánico para que genere la deposición de alimentos.

Objetivo Particular 2

Desarrollo de las formulaciones alimentarias que cumplan con las características de viscosidad y estabilidad que permitan ser empleadas en la impresora tridimensional.

Objetivo Particular 3

Evaluar las condiciones iniciales de los alimentos (viscosidades) y las condiciones finales como las características sensoriales, aroma, apariencia, sabor (evaluación sensorial).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Diseño de una impresora tridimensional Delta Kossel.

A pesar que existen empresas que ya comercializan la tecnología de impresión de alimentos, así como los productos producidos por la misma, aún se encuentra en una fase experimental debido a que muchos de los problemas que presenta no han sido resueltos de forma eficiente, tales como: la forma para recargar alimentos en la impresora, la velocidad de impresión y la extrusión de los ingredientes, son algunos de los muchos puntos que constantemente se están mejorando.

Los criterios que se tomaron en cuenta para el diseño de la impresora Delta Kossel fueron los siguientes:

- Diseño conceptual
- Requerimientos

Además, basándose en el tipo de alimento y la cantidad a producir se consideró los siguientes elementos:

1. Modelo de impresora
2. Área de impresión
3. Tipo de extrusión
4. Tipo de recarga de alimento

Cuando cada elemento de la impresora se seleccionó; entonces se procedió a ensamblar cada una de las piezas y posteriormente se establecieron las características de movimiento de cada uno de los ejes, así como de la extrusión para cada alimento, a continuación, se enlistan las características más importantes:

1. Velocidad de los ejes
2. Velocidad del extrusor
3. Caudal del alimento
4. Exactitud
5. Precisión

6. Repetibilidad

Para la experimentación se construyó una impresora que exclusivamente realizará dos funciones, posicionar los ejes en espacios tridimensionales y realizar la extrusión. Esta última función fue considerada la de mayor prioridad, concentrando la atención en la velocidad del extrusor que generará el caudal.

Las características tomadas en cuenta para el diseño de la impresora fueron:

1. Ejes de impresión rápidos
2. Área de impresión amplia y altura baja
3. Multi-extrusión
4. Manufactura sencilla
5. Bajo costo
6. Tipo de recarga de alimento

Estas características se comparan con los diversos equipos de impresión de alimentos que existen en la actualidad con la finalidad de determinar el modelo más adecuado. Concluyendo que la mejor opción para el desarrollo de alimentos es empleando la tecnología de SCARA. Sin embargo, el acceso a esta tecnología está limitada por el costo y la manufactura, por lo que se descartó y se optó por las otras opciones: Cartesiana y Delta. Tanto las impresoras Cartesianas como las Delta fueron posibles candidatos, por consiguiente se tuvo que tomar en cuenta un último criterio para la selección final. En internet se encontró mucha información que ayudó a manufacturar la impresora desde la electrónica, la mecánica y el diseño; sitios de “Open Source”, foros y páginas Web que brindaron la ayuda necesaria para diseñar una impresora sin tener que partir desde el inicio en toda la fabricación, lo que permitió ahorrar tiempo y mejorar los diseños ya establecidos. Actualmente el proyecto RepRap es una de las principales organizaciones de “Open Source” que se ha encargado de desarrollar constantemente el diseño y funcionamiento de las impresoras con el objetivo de crear impresoras 3D capaces de autoreplicarse, esto permite a los usuarios poder explotar la tecnología mediante Licencia Pública General de GNU que permite disponer modificar y compartir los diseños de las impresoras RepRap de manera gratuita (Ávila *et al.*, 2013). De esta forma pudo encontrarse un amplio catálogo de impresoras e instrucciones para su manufactura, lo que me permitió comparar los modelos Delta con respecto a los modelos Cartesianos en precio y materiales. Tomando en cuenta estos aspectos se descartó la impresión cartesiana y se optó por la impresión Delta como

la opción para la experimentación del presente proyecto. Los principales criterios para la selección de la impresora Delta con respecto a una Cartesiana fueron los siguientes:

1. Menor cantidad de piezas
2. Menor cantidad de ensambles
3. Menor precio
4. Facilidad para realizar modificaciones posteriores

La primera actividad a realizar fue la búsqueda de archivos de “Open Source” que facilitó el diseño y construcción de la impresora, sin la necesidad de iniciar desde lo básico y ajustando las condiciones que se requieren para la experimentación. A partir de esta recolección se tomaron los mejores diseños y se descartaron otros hasta obtener un aglomerado de información suficiente con el que se inició.

Entre la información recolectada se logró encontrar un manual elaborado por 3DigitalCooks para la fabricación de una impresora alimentaria tipo Delta Kossel llamada “Pinya3” de la que se basó parte de la configuración de la electrónica (3DigitalCooks, 2015). También se encontró un instructivo detallado de una impresora Delta Rostock llamado, “Rostock mini” elaborado por Bwevans (RepRap, 2012). Y finalmente un manual excelentemente detallado elaborado por eMotion Tech de una impresora mini Delta Rostock llamada μ delta (Soury *et al.*, 2015), con estos manuales ya se tuvo un punto de partida para poder diseñar.

La impresora Rostock es un modelo de impresora que antecede al modelo Kossel y se diferencia únicamente por el movimiento del carril, es decir, la impresora Rostock emplea rodamientos que se desplazan a través de dos varillas de acero (RepRap, 2012); sin embargo, por su dificultad para ajustar correctamente este tipo de carriles se rediseñó un nuevo modelo basado en carro con tres ruedas que se desplazan sobre un riel, a este modelo se le conoce como Kossel (RepRap, 2015). La selección de un modelo Kossel para una impresora en alimentos fue la mejor opción para manufacturar, debido a que el carril además de tener mejor desplazamiento y ajuste, presenta mayor soporte y estabilidad en la parte inferior y superior de los soportes (Instructables, 2015).

4.1.1. Análisis funcional de impresora

El funcionamiento de una impresora alimentaria de deposición básicamente radica en el traslado de alimento de una zona de almacenamiento, ya sea tanque, cartucho, o empaque

hasta una zona de expulsión que se posiciona en un área específica del movimiento de los ejes en el espacio tridimensional.

Lo primero que se tomó en cuenta para el diseño fue realizar un análisis funcional que permitiera descartar partes sin relevancia o de bajo impacto y darle prioridad a los elementos principales los cuales estarían encargados de llevar los procesos críticos que serían vitales para el correcto funcionamiento de la máquina (Zamora, 2015). La impresora alimentaria que se diseñó prescindió de cocción, panel digital e inicialmente se planeó que tuviera un solo extrusor de impresión para verificar su correcto funcionamiento con respecto a la entrada y salida de alimento, posteriormente se añadió un segundo extrusor en la experimentación.

Para lograr la impresión de alimento es importante poder coordinar dos operaciones esenciales, la dosificación de alimento y el posicionamiento tridimensional, a partir de ellas es posible lograr la correcta extrusión del alimento y colocarla en el lugar indicado mediante coordenadas tridimensionales. La extrusión de alimento implica desplazar el alimento de un área de almacenamiento hasta la zona de extrusión y posteriormente generar la deposición, para ello se emplean dos tipos de fuerza, la presión de aire que desaloja el alimento de la zona de almacenamiento y la fuerza mecánica ejercida por el motor que produce la rotación del tornillo sinfín que empuja el alimento que viene de la zona de almacenamiento hacia la boquilla. Por otra parte, el posicionamiento tridimensional se logra mediante la introducción de datos que serán procesados e interpretados en información que permita la actuación de cada uno de los dispositivos de forma paralela, como se muestra en la Figura 15.

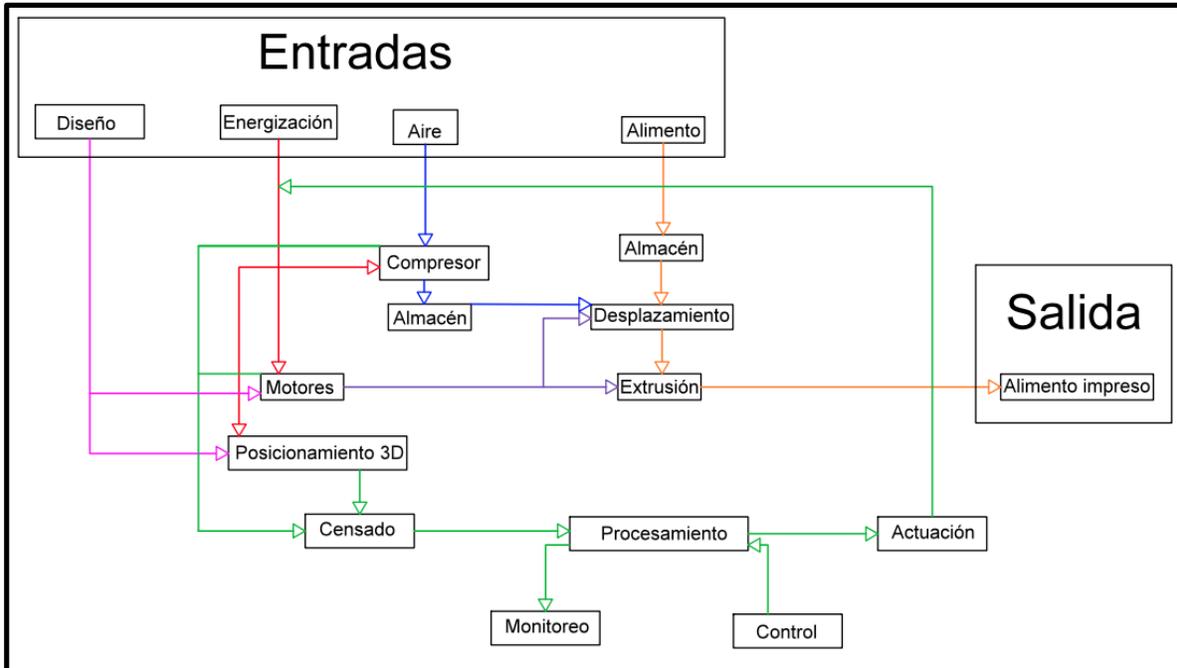


Figura 15. Diagrama de funcionalidad de la impresora de alimentos.

4.1.2. Diseño, selección y prototipo

Ya establecidos todos los parámetros de diseño y planteado el análisis funcional se procedió a generar los primeros prototipos en papel y posteriormente emplear un Software de diseño, Inventor 2016 y Fusión 360 2017 para elaborar un modelo tridimensional de las piezas que requirió la impresora y posteriormente un ensamble, con el que finalmente se realizó la renderización del diseño.

4.2 Diseño de alimentos

Los alimentos que impresos fueron diseñados en el software de diseño Fusión 360, (2016). Posteriormente se importó el diseño a un archivo poligonal (STL) y se transfirieron a otro software que permitió interpretar el diseño y transformarlo a coordenadas (código G-code), en este caso se empleó el software Repetier 2015 que se trata de un programa encargado de la gestión, análisis y configuración de los archivos para impresión 3D, el cual tiene cargado a su vez un fichero de laminación en este caso Slicer, su función es seccionar la pieza tridimensional en coordenadas bidimensionales con el que se pudo generar un archivo G-code que interprete la impresora.

Se diseñaron tres tipos de geometrías de alimentos para tres etapas distintas en el proceso de impresión cada una correspondiente a la etapa de evaluación de los extrusores. En la primera etapa se necesitó evaluar los extrusores, por lo que se requirieron alimentos con geometrías simples; en la segunda etapa se calibraron los extrusores y fue necesario usar geometrías tridimensionales con dimensiones de fácil medición; cuando la evaluación y la calibración se realizaron se procedió a realizar alimentos con geometrías más complejas. Los alimentos de geometrías simples sirvieron exclusivamente para evaluar el funcionamiento del equipo de impresión, principalmente el posicionamiento tridimensional, los extrusores y las presiones. Para esta etapa se emplearon diseños sencillos, por ejemplo, geometrías tridimensionales sin muchas altura o diseños bidimensionales como letras o dibujos. En este caso se usaron letras, como la que se muestra en la Figura 16.

Para la calibración se emplearon alimentos tridimensionales con geometrías simples, debido a que se requiere evaluar diversas características, como las dimensiones de la pieza, el peso y la semejanza entre impresiones y en todos los casos los ajustes de impresión deben ser idénticos sobre todo si se tratan de diversas formulaciones ya que ayudará a visualizar el comportamiento de los ingredientes con respecto a una forma geométrica establecida. Para este caso se emplearon cubos de 3 cm, ya que estos permiten visualizar rápidamente la estabilidad del alimento impreso y su realizar su medición.

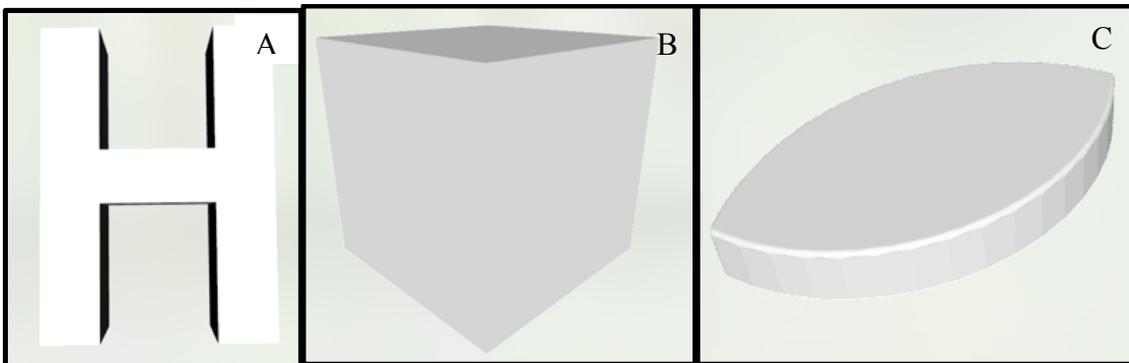


Figura 16. Ejemplos de geometrías que pueden emplearse en la impresión para las primeras etapas: letras o figuras bidimensionales sencillas (A) para la prueba de la impresora y geometrías tridimensionales para la calibración (B, C).

Para la última etapa es posible emplear figuras de mayor complejidad para probar las formulaciones que presentaron el mejor comportamiento textural y comprobar su viabilidad

estructural. Aquí se pueden usar esculturas, piezas de mayor tamaño o geometrías más complejas, como se muestra en la (Figura 17).



Figura 17. (A) 3DBenchy, geometría que se emplea en la calibración de impresoras; (B) una simple taza; (C) busto de Albert Einstein.

Fuente: LSMiniatures (2015); Angelcadiz (2017); Creative Tools (2015).

4.3 Desarrollo de las formulaciones alimentarias para impresora tridimensional.

Los alimentos 3D deben tener fluidez al transportarse y estabilidad al depositarse, por lo que todos los alimentos antes de ingresar a la impresora deben ser acondicionados.

A continuación, se describe el acondicionamiento de dos ingredientes, frijoles y maíz, para la impresora, modelo Delta Kossel, con extrusión de tornillo sin fin.

4.3.1. Formulación y preparación de masas iniciales

Las masas iniciales se usaron para probar los extrusores de la impresora por lo que en esa etapa se usaron diversas clases de masa, inicialmente se emplearía maíz seco o fresco para después molerlo, pero era demasiado complicado realizar todo el procedimiento. También se empleó masa de maíz preparada, obtenida de una tortillería local, en ese caso la masa de maíz fue excesivamente dura y espesa, imposible para uso en impresoras 3D; por lo que se rebajó la masa con agua en una proporción de 65% de masa con respecto a un 35% de agua, con esto la masa quedaría perfectamente acondicionada para los extrusores de la impresora logrando tener la fluidez en el transporte de la masa y además estabilidad en las deposiciones del extrusor, pero no se usó la masa de tortillería por que no conocemos los porcentajes exactos para elaborarla y pueden oscilar sus características.

Por lo tanto, se empleó harina de maíz empaquetado (marca Maseca “antojitos”, 1 kg) para simplificar los procesos. En el reverso del empaque se especifican las instrucciones para la realización de masa de maíz para la generación de tortillas, indicando que se deben emplear 2 tazas de “MASECA antojitos” (Figura 18) y 1 ½ taza de agua, en porcentaje es 42.85% de agua y 57.15% de harina de maíz pero en peso esto es 46.19 % (40 g) de harina de maíz y 53.81% (46.6 mL) de agua, siendo la medida en peso más exacta, tomamos ésta como el estándar para el desarrollo de las formulaciones posteriores. Cabe destacar la existencia de otra bolsa de harina marca “MASECA” con diferente comportamiento, a la seleccionada, ya que la absorción de agua es distinta, así como la textura, la consistencia y la granulometría.



Figura 18. Empaque de harina de maíz, “MASECA antojitos”.

Para realizar las masas, se propuso mantener constante la cantidad de harina en 40 gramos e ir subiendo la cantidad de agua en 10 mililitros, es decir, 40 gramos de harina de maíz y mezclarlo con una cantidad determinada de agua, 50, 60, 80, 90, 100, 120. Se hizo de este modo por que se partió de la fórmula base de la receta del empaque, también se realizó la masa del empaque para comparar su textura con el resto de las formulaciones de masa. La harina fue tamizada con mallas Tyler 40 y 60 obteniéndose de 1 kilogramo de harina de maíz un promedio de 75% de partículas retenidas en malla 40 y 25% en malla 60, pero únicamente se empleó la harina de la malla 40.

La Tabla 9 muestra las formulaciones de masa de maíz que se realizaron para la obtención de una mezcla con las características requeridas de fluidez y estabilidad. La muestra M es la proporción de harina y agua que sugiere el empaque, debajo de esa formulación se encuentran las condiciones límite para la formación de una masa sin que quede arenosa.

Tabla 9. Formulaciones de masas en diferentes proporciones para el uso en impresora.

Formulación	Harina (%)	Agua (%)
Fórmula M	46.2	53.8
Fórmula 2	40.0	60.0
Fórmula 3	33.3	66.7
Fórmula 4	30.8	69.2
Fórmula 5	28.6	71.4
Fórmula 6	26.6	73.4
Fórmula 7	25.0	75.0

- **Procedimiento**

Para obtener las masas se tomó una probeta de 100 mL con la cantidad de agua determinada para cada masa y se pesaron 40 gramos de harina de maíz. A continuación se tomó un tercer recipiente donde se mezcló el agua y la harina, primero se agregó la harina, posteriormente se adicionaron los mililitros requeridos de agua a temperatura ambiente (25 °C), y con ayuda de una espátula se mezcló hasta generar un aglomerado homogéneo. Inmediatamente se vierte el resto del agua y se volvió a mezclar.

Es muy importante que el mezclado sea uniforme, ya que eso permitió homogeneizar bien la masa y evitó la formación de grumos, porque éstos pueden generar obstrucciones parciales o totales en la salida del extrusor, impidiendo la correcta impresión. Obtenida la masa se procedió a insertarla en los cartuchos de almacenamiento del alimento. Para lograrlo la masa se depositó sobre plástico film, se envolvió en el plástico y posteriormente se enrolló en los laterales del empaque hasta la formación de un salchichón, de este modo

los empaquetados pueden ser almacenados a temperatura ambiente hasta su uso en la impresora.

Para insertar el alimento de los empaques en los cartuchos se cortó uno de los laterales del empaque y se estrujó hasta llenar el cartucho. El cartucho estaba parcialmente sellado. Eso significa que la parte contraria a la introducción del alimento se cubre con plástico film al cual se le perforó un pequeño orificio o varios para poder drenar el aire en el momento en que la masa ingresó al cartucho. De este modo se logró llenar la totalidad del cartucho con la masa y también se evitó la salida de la misma (Figura 19).

El cartucho se enroscó en el extrusor y finalmente se colocó la tapa donde se encontró la válvula de ingreso del aire del compresor. Cuando la presión del aire empuja el alimento, entonces romper el plástico film. Saliendo del cartucho el alimento inmediatamente ingresa al tornillo y finalmente hacia la boquilla. El alimento depositado deberá ser lo suficientemente estable para mantener la forma que se genere con la impresión.

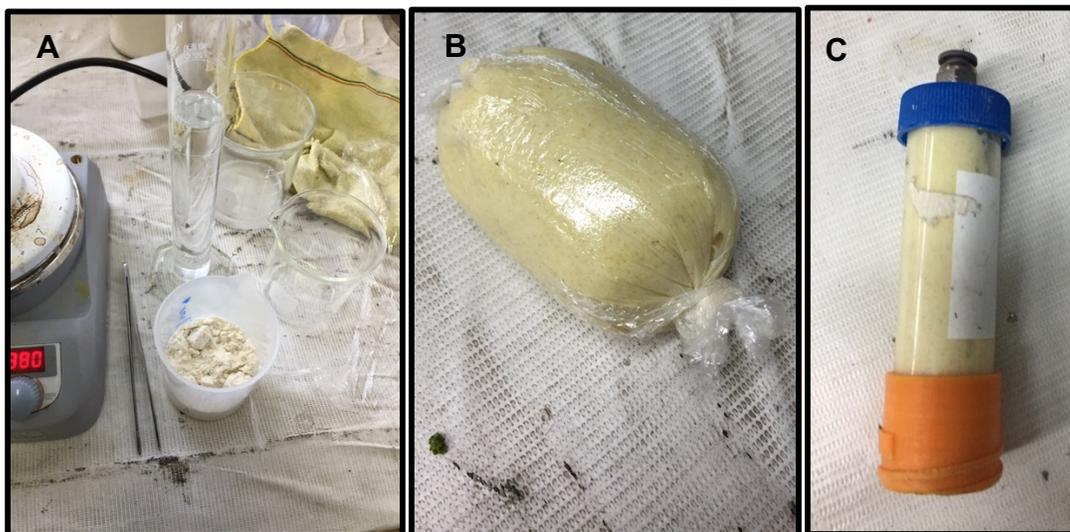


Figura 19. Preparación de masas: (A) Pesado de ingredientes, (B) masa formada y (C) masa en cartucho.

4.3.1.1. Evaluaciones rápidas

Para seleccionar las masas con las mejor estabilidad y fluidez se realizaron unas sencillas pruebas para determinarlo.

4.3.1.1.1 Evaluación de fluidez

La manera en que fue evaluada la fluidez y estabilidad de forma rápida y sencilla, fue a partir de la extrusión de cada una de las masas con una jeringa de 60 mL, esta técnica permitió observar el flujo de salida de la masa por la boquilla de 2 mm de la jeringa y fue una forma de asemejar la extrusión que se presentaría con los extrusores de esa forma se descartaron rápidamente las formulaciones no idóneas.

Para el experimento la jeringa se cargó con 50 gramos de masa y se empujaron 2 mL de forma progresiva por 5 segundos hasta vaciar todo el contenido de la misma.

4.3.1.1.2. Esfuerzo

Para tener un estimado del esfuerzo generado en el empuje del émbolo de la jeringa se realizó una pequeña evaluación que consistió en colocar la jeringa con la base del émbolo sobre una balanza y empujar hasta que se logró expulsar 2 mL de forma progresiva por 5 segundos 5 segundos de material el peso obtenido se convirtió a Newtons. Para esta evaluación se empleó una balanza con una escala límite de 500 g y una jeringa de 60 mL.

4.3.1.1.3. Estabilidad

Por último, se evaluó la estabilidad de las masas mediante una prueba que consiste en depositar 2 mL de masa durante 5 segundos sobre el centro de un dibujo de un cuadrado de 30 mm sobre una superficie plana, dicha deposición se realizó nuevamente con el uso de una jeringa de 60 mL. La deposición generada debe tener una altura mínima de 20 mm y se tomó el tiempo que le tomó a la deposición antes de desplomarse, si la estructura se mantuvo más de un minuto se consideró una masa estable, menor a ese tiempo fue tomada como inestable.

4.3.2. Formulación y preparación de masas finales

Posterior a la evaluación de las masas se procedió a seleccionar las mejores formulaciones con los parámetros que establecimos anteriormente y se añadieron 3 nuevos ingredientes,

dos para mejorar su textura y apariencia (aditivo 2, aditivo 1) y uno para mejorar su sabor (sal).

El procedimiento para elaborar las reformulaciones se describe detalladamente a continuación:

Procedimiento

Con la probeta se midió 100 mL de agua y después se agregó a un vaso de precipitado de 200 mL, el vaso se colocó en una parrilla magnética magnética y se agitó a 80 °C. Además se agregó un 1 gramo de sal .En otro vaso de precipitado se pesó el aditivo que utilizado para retener el agua, cuando se alcanzaron los 80°C se agregaron los ingredientes hasta disolverlos. El tiempo promedio para su disolución fue de 10 minutos para cada uno. Cuando los aditivos estuvieron completamente disueltos, se dejaron enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente de 25 °C. Posteriormente se pesaron 40 gramos de harina de maíz y se agregaron a cada una de las disoluciones de aditivos evitando la formación de grumos. Finalmente la masa generada se depositó sobre un plástico film para cubrirla y formando un salchichón que se colocó en los cartuchos. Cuando los cartuchos estuvieron listos se procedió a la impresión de las masas reformuladas con las que se realizó una evaluación sensorial de cubos de 20 mm rellenos de cubos de frijoles de 10 mm y fueron calentados en un horno eléctrico a 250 °C por 12 minutos. La evaluación sensorial tuvo como objetivo si la adición de sal, y los aditivos 1 y 2, generaban alguna modificación en el sabor, olor o apariencia de los productos impresos y con ello contemplar el grado de aceptación de los mismos.

4.3.3 Preparación de frijoles para impresora

El procesamiento de los frijoles fue ligeramente distinto al acondicionamiento de maíz, primero fue necesario cocinar los frijoles hasta que la leguminosa obtuvo una consistencia suave y pastosa. Para la cocción se emplearon 4.5 litros de agua por cada kilogramo de frijol y 8 mL de aceite de cocina, ya sea de girasol u oliva. Los ingredientes se introdujeron en una olla express, y dependiendo de la flama el tiempo de cocción fue entre 105 y 120 minutos. Posteriormente se agregaron 10 gramos de sal, se mezcló y se calentó por 10

minutos para asegurar la disolución de la sal, nuevamente se dejó enfriar y a continuación se separaron el caldo de los frijoles con ayuda de un colador.

A continuación los frijoles separados fueron macerados hasta deshacer las partes más sólidas de los frijoles, se colocaron en una bolsa con cierre hermético, retirando el aire, y se cerró la bolsa para después aplastar los frijoles hasta obtener una consistencia pastosa. Después la pasta de frijol se sacó de la bolsa y se hizo pasar por un colador con malla de entre 1 y 2 mm de espesor (Figura 20).

Anteriormente se había intentado moler los frijoles con una determinada cantidad de agua en la licuadora, pero eso ocasionó una modificación enorme en la consistencia de los mismos que los volvió más fluidos.

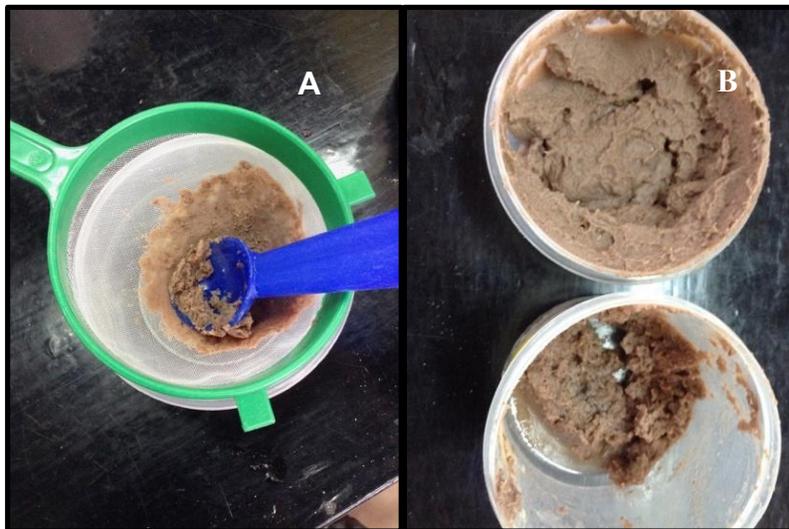


Figura 20. Frijoles filtrados (A) para retirar y deshacer grandes partículas con la finalidad de mejorar la fluidez (B).

Para simplificar el proceso se emplearon frijoles de lata de 580 g (marca La Costeña); los cuales también fueron filtrados a través del colador con orificio de entre 1 a 2 mm. La finalidad de este proceso se debe a que la maceración previa no eliminó por completo las cascarillas ni los sólidos. Es muy importante que la pasta esté perfectamente molida de lo contrario se generan obstrucciones parciales o totales en la salida del extrusor, impidiendo la correcta impresión. Finalizando el proceso de filtración se obtuvo una pasta de frijoles con mucha consistencia, suave, sin fluidez pero con mucha estabilidad y maleabilidad. Obtenida la pasta de frijoles se procedió a insertarla en los cartuchos de almacenamiento del alimento, para lograrlo la pasta se depositó sobre plástico film y se enrollaron los laterales del empaque hasta la formación de un salchichón, de este modo los empaquetados se almacenaron refrigerados hasta su uso en la impresora.

Para insertar el alimento de los empaques en los cartuchos, se cortaron uno de los laterales del empaque y se estrujaron hasta llenar el cartucho con 60 mL de frijoles. El cartucho estaba parcialmente sellado eso significa que la parte contraria a la introducción del alimento se cubrió con plástico film, al cual se le perforó un pequeño orificio o varios para poder drenar el aire en el momento en que la pasta ingresó al cartucho, de este modo se logró llenar la totalidad del cartucho con la pasta mientras se expulsa el aire y también se evitó la salida de la misma (Figura 21).

El cartucho se enroscó en el extrusor y finalmente se colocó la tapa donde se encuentra la válvula de ingreso del aire del compresor. Cuando la presión del aire empuja el alimento, entonces se rompió el plástico film, saliendo del cartucho el alimento inmediatamente ingresa al tornillo y finalmente hacia la boquilla; el alimento depositado fue lo suficientemente estable para mantener la forma que se genere con la impresión.

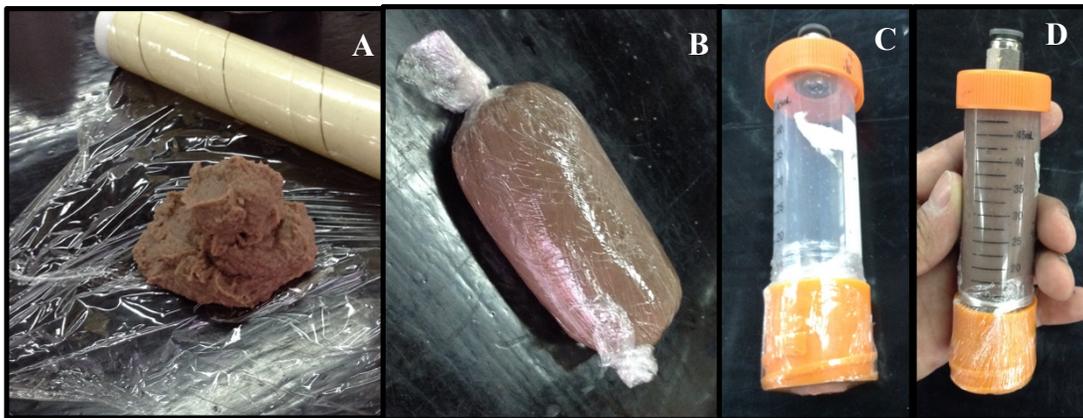


Figura 21. Procedimiento para preparación de la muestra: frijoles en plástico film (A), formación de un salchichón (B), cartuchos preparados (C) y llenado del cartucho para su posterior extrusión (D).

4.4 Aspectos relacionados con inocuidad del diseño de impresora 3D para alimentos.

El PLA, material con el que fueron elaborados la mayoría de las piezas impresas es considerado inocuo, ya que su origen proviene del maíz, sin embargo, colorantes u otras características, pueden migrar al alimento, para la evaluación sensorial se empleó un filamento grado alimenticio certificado por la FDA denominado HDglass, elaborado de PETG (tereftalato de polietileno glicolizado) (Kevinp, 2018). Otro factor a considerar fueron las boquillas para imprimir el filamento ya que usualmente son elaboradas en latón, aleación que en ocasiones puede contener residuos de plomo y que también puede contaminar el

alimento (Locker, 2017), por tal motivo en la evaluación sensorial también se usó una boquilla de acero inoxidable para las impresiones plásticas, de ese modo se evita transmitir la contaminación de la boquilla al plástico impreso, y del plástico al alimento, sin embargo aún existe un problema al usar piezas plásticas impresas, las estrías (Figura 22).

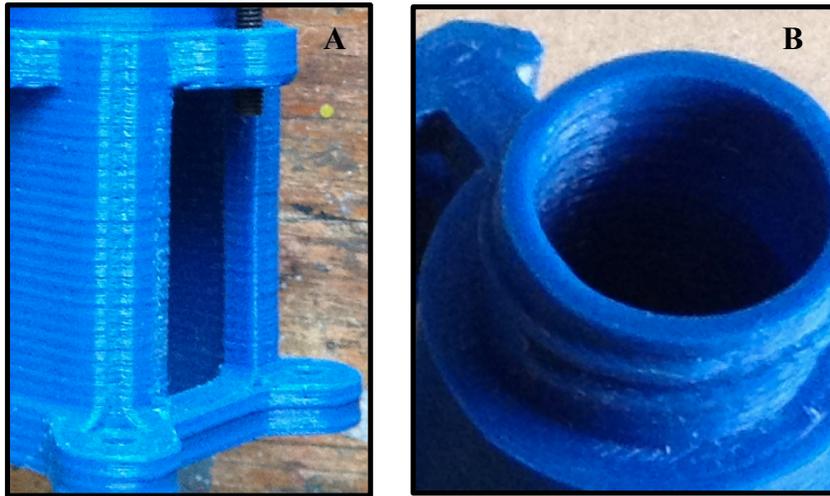


Figura 22. Estrías de las impresiones plásticas, donde se acumulan microorganismos: vista lateral (A) y vista superior (B).

Las estrías son las líneas remanentes que se mantienen después de que el plástico es depositado, estas son pequeñas y pueden ser importantes albergues de microorganismos donde se acumulan progresivamente (Kevinp, 2018). El diseño de los extrusores actual tiene recovecos donde la acumulación de microorganismos se puede llevar a cabo sin inconvenientes por lo que realizar un lavado es insuficiente, a esto se le suma la gran permeabilidad que tiene el plástico ocasionando la filtración de agua y alimento dentro de la geometría impresa de plástico, garantizando la contaminación al alimento; las piezas que presentan este problema son el cañón, el soporte de cartucho y las boquillas. Las diversas soluciones que se propusieron para el problema conllevan un contratiempo, tales como, los recubrimientos epóxicos grado alimentario que requieren de ajustar la geometría para ingresar el recubrimiento; la desinfección no ingresaría por completo a la pieza ya que es parcialmente hueca; la esterilización deformaría el plástico a causa de la temperatura; y la construcción de un extrusor de acero inoxidable o la impresión de extrusores similares requiere de mucho tiempo para ajustar. Sin embargo con anterioridad se imprimieron 6 copias idénticas del cañón, 6 del soporte de cartucho y 6 boquillas, 3 para cada extrusor, las primeras réplicas se usó exclusivamente para evaluación para cada extrusor y las 4

réplicas restantes para el sensorial, 2 para cada extrusor. Después de usar cada pieza, se lavaron con agua y jabón, posteriormente se introducían en alcohol de 95° por 5 minutos para después retirarlos y secarlos para volverlos a usar. A futuro es recomendable fabricar boquillas exclusivamente de acero inoxidable.

4.5. Evaluar la estabilidad del alimento obtenido a partir de la impresora mediante características físicas y características sensoriales.

Para la medición de las viscosidades aparentes de los alimentos se empleó el Reómetro, HAAKE Rotovisco RT 20 con un plato de 35 mm (PP35), por 120 segundos a una frecuencia de 24 (1/s), medido a 25 ° C. La muestra colocada entre la superficie y el disco tuvo una altura de 1 mm (Figura 23).

Los productos terminados fueron evaluados sensorialmente por un grupo de panelistas no-entrenados de acuerdo a la siguiente prueba sensorial. Para la primera corrida se realizaron 30 muestras, 10 muestras de masa sin aditivo, 10 con aditivo 1 y 10 con aditivo 2, y repartidas a 10 personas. Cada cartucho de masa puede imprimir 5 cubos rellenos de 20 mm con cubos de frijoles de 10 mm con un peso promedio de 10 gramos, mientras que los cartuchos de frijoles pueden imprimir hasta 8 cubos de 10 mm por cada cartucho. Cuando la masa se agotaba del cartucho se intercambiaba el extrusor (cañón, soporte y boquillas) por el reemplazo, mientras las otras piezas del extrusor se lavaban y se reposaban en alcohol por 10 minutos. En total se realizaron 6 cambios para los extrusores de masa y 3 para los extrusores de frijoles.

Para la segunda y tercera corrida el proceso fue exactamente el mismo, se realizaron 30 impresiones para 10 personas, 3 muestras de masa para cada usuario.

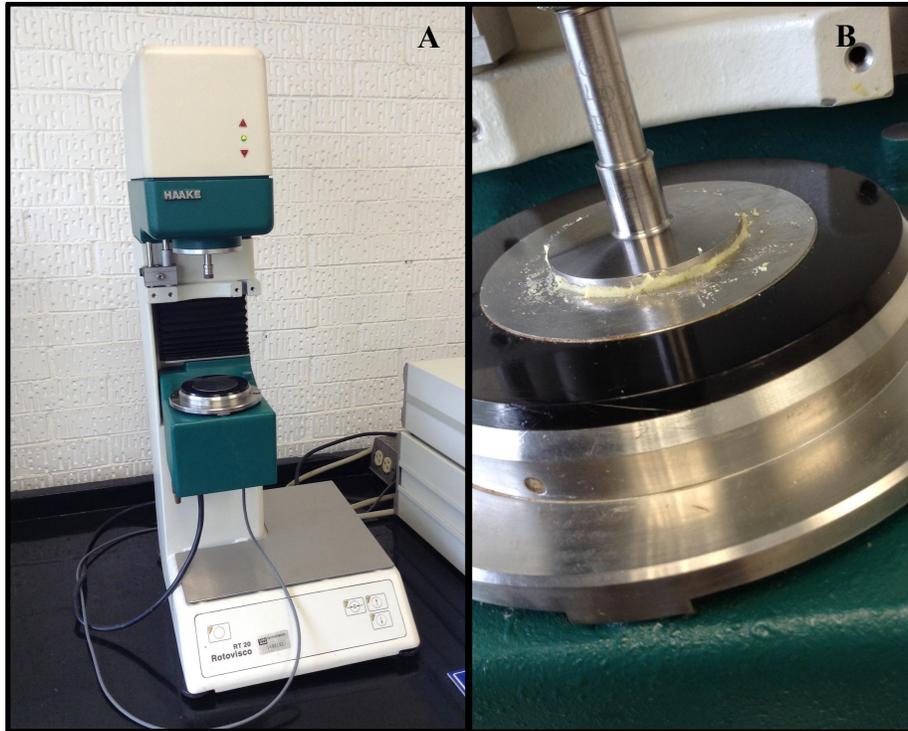


Figura 23. Reómetro empleado para medir las viscosidades aparentes de las masas y los frijoles:
(A) Reómetro y (B) medición de las masas.

La Figura 24 muestra la hoja de evaluación de los productos que se dio a los jueces no entrenados para el sensorial.

4.6. Análisis estadístico

Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), diseño factorial 2^2 y comparación de rango múltiple aplicando un nivel de significancia del 5%.

Evaluación sensorial				
FES Cuautitlán, Ingeniería en alimentos				
Nombre:				
Edad:				
Genero:				
Instrucciones: indique el nivel de gusto y disgusto que tiene de los siguientes productos, marcando con un 7 el de mayor agrado y 1 el de menor agrado.				
MUESTRA		437	123	De las 3 muestras que se te presentaron, ¿cual fue la mejor para ti? ¿Por qué?
Apariencia				
olor				
Dureza				
Adhesividad				
Sabor				
Observaciones:				

Figura 24. Hoja de evaluación sensorial.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Diseño de una impresora tridimensional para alimentos tipo Delta Kossel.

El diseño se presentó como una impresora que pueda producir alimentos prototipo, es decir, generar de 3 a 5 alimentos de 5 mm de radio, esto debido a que el área de impresión que se pensó es circular y pequeña, lo que dificulta la impresión de geometrías diversas. Además, la altura de los alimentos no debe sobrepasar los 5 mm, la razón, es que alimentos mayores a esa altura tienden a colapsarse por su propio peso si no tiene la formulación adecuada. Si el prototipo de los extrusores y alimentos empleados de la impresora funcionan se podrá escalar una impresora de mayor tamaño.

5.1.1. Diseño de dispositivos y partes de la impresora 3D

Las piezas primero se diseñaron en papel. En la Figura 25 se muestran los bocetos del agarre de la banda dentada, los carros para los carriles y el extrusor doble. Posteriormente se diseñaron en computadora. La Figura 26 muestra algunas de las partes diseñadas en software que previamente fueron diseñadas en papel. Posteriormente cuando todas las piezas se diseñaron en computadora se realizó un ensamble de la impresora que permitió visualizar previamente el resultado, con ello además se pudieron ajustar piezas que no coincidían o ajustaban y visualizar errores antes de realizar la manufactura de las piezas. En la Figura 27 se muestra el ensamble de la impresora 3D renderizado. Finalmente, las piezas que lo requirieron fueron impresas y se probaron en las áreas que les correspondía. Si la pieza no ajustaba simplemente se rediseñaron y se volvió a probar.

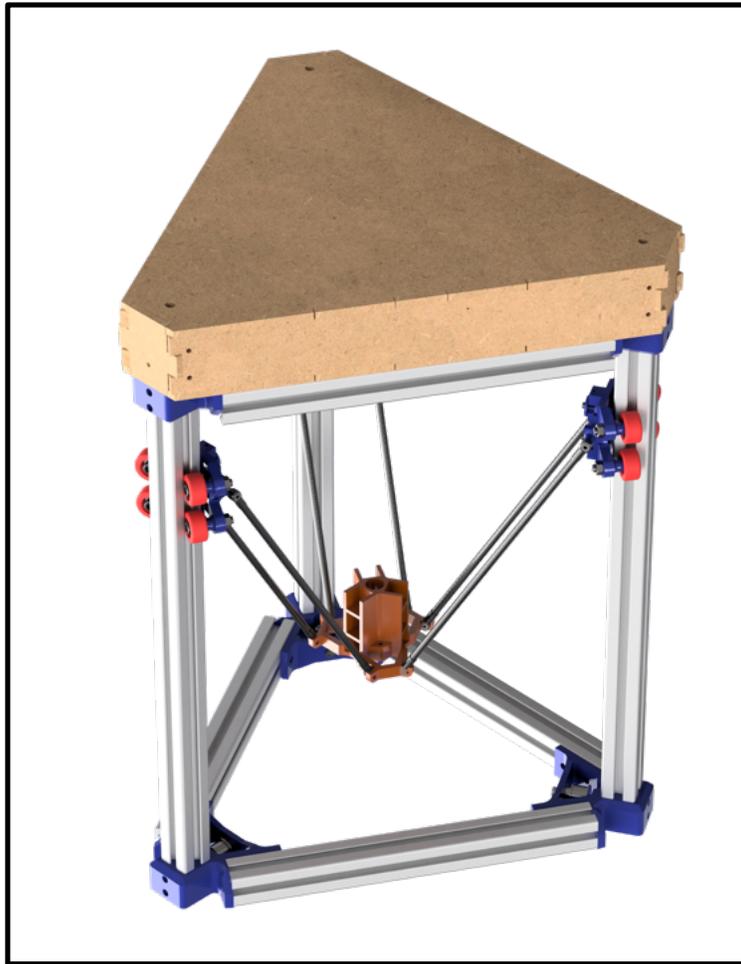


Figura 27. Renderizado del modelo de la impresora, realizado en Fusion 360.

Las piezas de unión entre perfiles de aluminio, el soporte de los brazos, algunas piezas del extrusor y los carros fueron diseñados en Inventor 2016 y fueron impresas en PLA (ácido poliláctico) con 40% de relleno hexagonal y 1.5 mm de perímetro, asegurando resistencia y ligereza (Figura 28). La impresora 3D empleada fue de manufactura casera, modelo cartesiano, tipo Prusa. Para la caja de control se usó MDF de 6mm de espesor; la cual fue diseñada en Autocad 2015 e Inventor 2016 y el material fue cortado con láser. La electrónica del equipo (los motores de pasos, el controlador, y la fuente de poder), se colocó en la parte superior, como modo preventivo en caso algún derrame de agua o fuga de los extrusores o cartuchos de alimento.

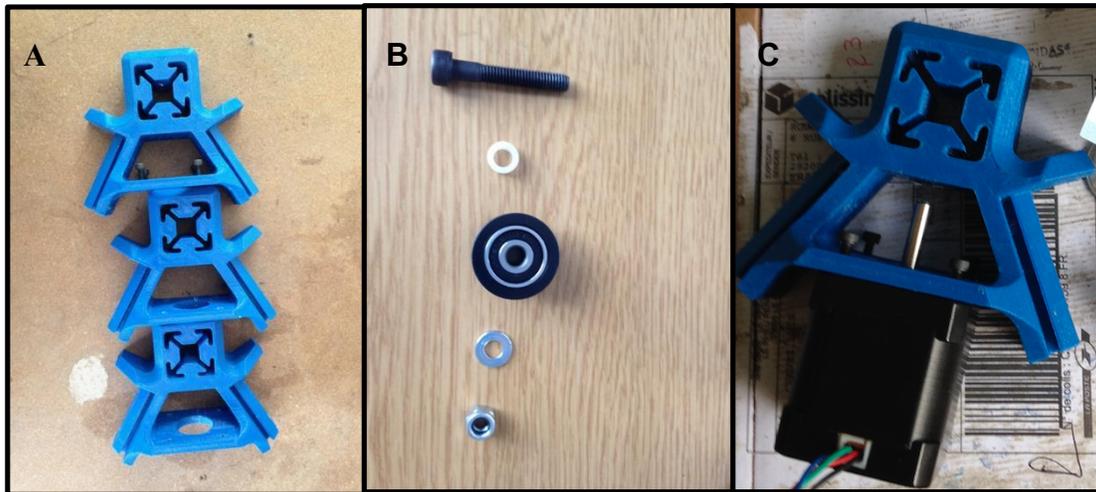


Figura 28. (A) Base de los rieles impresas con impresora 3D en PLA; (B) piezas para los rodamientos de las bandas dentadas; (C) motor atornillado a una de las bases de rieles.

La impresora requirió de colocar tres columnas de perfil cuadrado de aluminio de **28x28 cm de área** que fungieron como rieles y soportes de la caja de control **y cada riel o moldura contó con unas medidas de 50 cm de largo**, cada perfil se ensambla a una base de plástico impreso en PLA que posteriormente se ajustó a dos perfiles más de aluminio en forma horizontal; los perfiles de aluminio de la base tienen un largo de 30 cm y se conectan entre las piezas de las dos torres restantes para la formación de un triángulo equilátero. Este procedimiento se realizó de igual forma en la parte superior de las columnas hasta la formación de un prisma triangular regular (Figura 29).

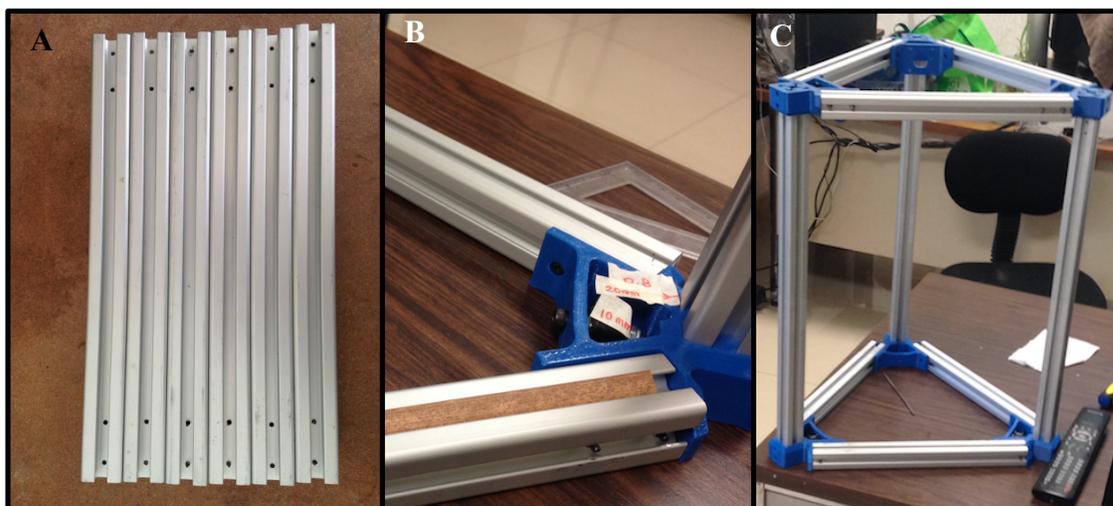


Figura 29. (A) Perfiles de aluminio de 28x28 cm; base de unión de perfiles impresa en PLA; (B) prisma triangular regular, (C) estructura primordial de las impresoras Delta.

Los brazos de la impresora son los que ayudaran a soportar y desplazar el extrusor, estos tienen el 80% de longitud respecto a los perfiles de aluminio de la base, es decir 24 cm de longitud.

Para realizar los brazos, inicialmente se emplearon tuberías de aluminio de diámetro externo de 6 mm y diámetro interno de 3 mm. Para conocer la resistencia de los brazos con respecto a la fuerza ejercida por los motores, se realizó una simulación con Inventor Fusión 360, 2017, en el que se aplicaron esfuerzos de compresión, tracción y flexión, con una magnitud de 9 N que equivale al doble de la fuerza total ejercida por un motor. El brazo de aluminio resistió perfectamente a esfuerzos de tracción y compresión sin generarse modificaciones en el material; con un esfuerzo de flexión de 9 N, la tubería puede doblarse sin alcanzar la deformación permanente (figura 30); se necesitan 20 N de esfuerzo de flexión para deformar permanentemente la tubería de aluminio. Para asegurar la resistencia a dichos esfuerzos se emplearan tuberías de fibra de carbono. No se pudo realizar la simulación en fibra de carbono debido a que el software no cuenta con las propiedades físicas de ese material.

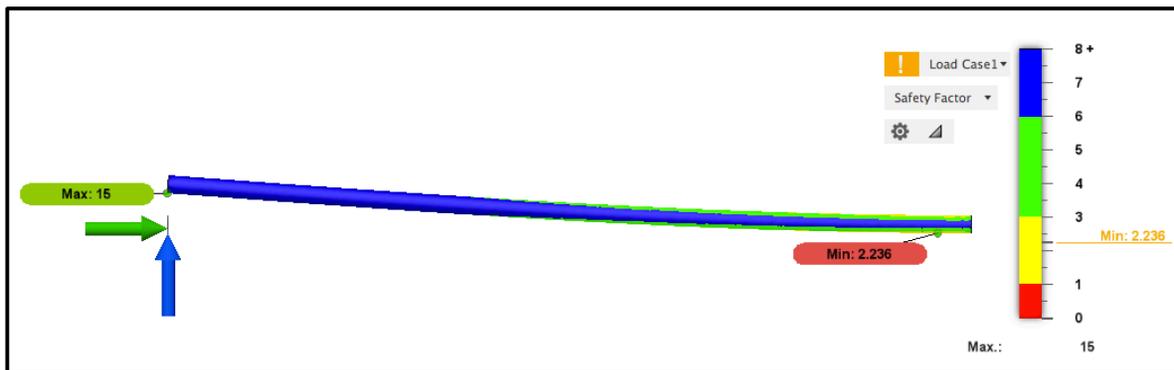


Figura 30. Simulación de deformación por esfuerzo de flexión y compresión de 9 N a tubería de aluminio de 6 mm.

El diseño de carro empleó cuatro ruedas dispuestas en par a cada lado con una inclinación de 60° con respecto a la horizontal del carro, que ayudó a la rueda a aferrarse y desplazarse suavemente por el riel.

El carro se diseñó con la zona que sostendrá a los brazos para soportar el extrusor y el cinturón que dará movimiento a los carros mediante el motor, todo en una sola pieza funcional con acoplamiento a tornillos y engranajes de agarre, así como sus respectivas ruedas (Figura 31).

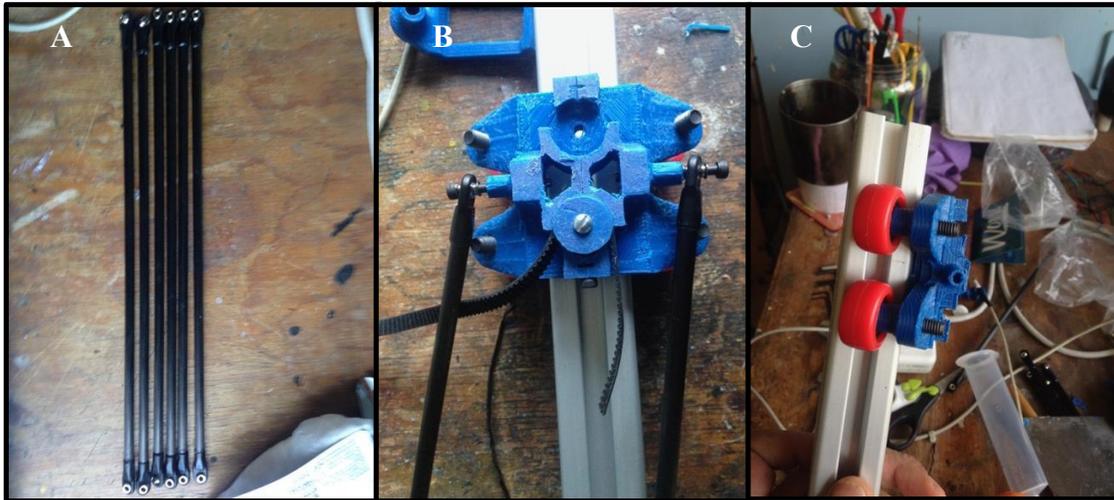


Figura 31. (A) Varillas de fibra de carbono que fungirán de brazos para el soporte de extrusores; (B) carro para riel donde sobresalen los brazos; (C) llantas de carro donde se desplazan por el riel de manera suave y firme.

Para desplazar los carros sobre las torres se empleó una banda dentada con 2 mm de separación entre diente y diente, que encaja con un engranaje de aluminio de 20 dientes que estará posicionado en el husillo del motor a pasos. A lo largo de la calibración se encontró un error de diseño sin trascendencia o afectaciones en la experimentación, y que se corrigió en posteriores diseños, se trata de un ligero tambaleo de la impresora al momento de realizar una impresión; para corregir este fallo se requirió la colocación de un doble perfil de aluminio en la base de la impresora que evitó el vaivén y sostuvo firmemente las torres de la impresora. Antes de colocar la caja de control en la parte superior de la estructura de aluminio se procedió a probar la electrónica, tarjetas de control y motores.

Para evaluar los motores y sensores se usó la tarjeta de control (Smoothieboard 5x) pero antes de eso, se evaluó el correcto funcionamiento de la tarjeta de control comprobando la comunicación entre la computadora (MacBook 2012, 13 inch). La tarjeta cuenta con una serie de LEDs en colores verde, rojo y naranja, que indican que la energización y la comunicación se han realizado. Posterior al encendido de LEDs aparece un icono en el escritorio de la computadora que contiene los archivos primordiales para el control de la tarjeta, como código fuente, parámetros de control y software para el manejo de la impresora como Pronterface y Repetier. Ambos softwares fueron utilizados pero Pronterface en mayor medida debido a que se usó para calibrar los parámetros, como

velocidad, área de impresión, medidas de la impresora, medidas de los brazos, tipo de impresora, entre otros y en la Figura 32 se muestra la interfaz del software.

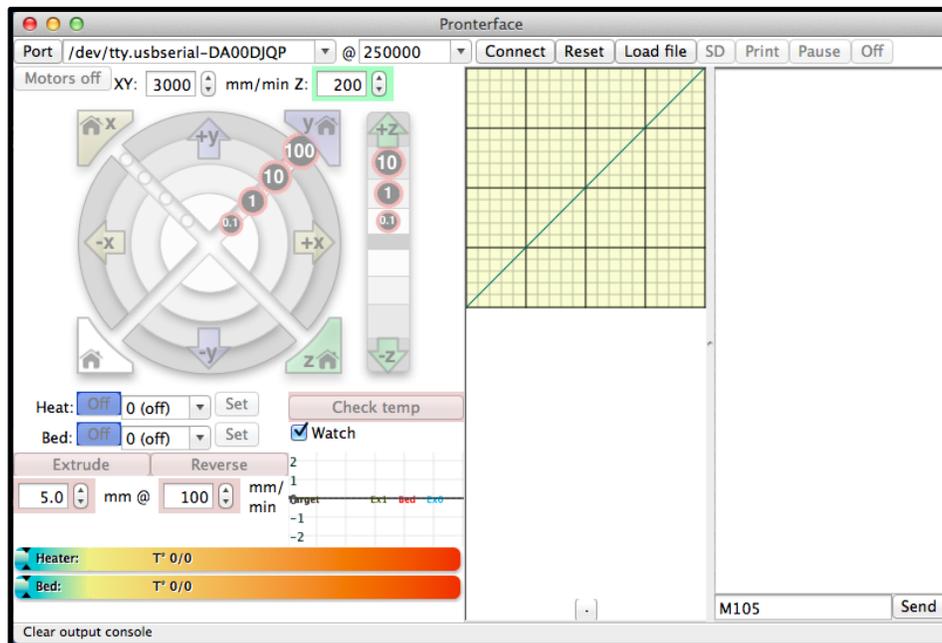


Figura 32. Interfaz de Pronterface. Lado derecho de la interfaz, control manual; parte central, área de impresión; lado derecho, introducción de comandos.

Fuente: re3D (2014).

Cuando la comunicación de la tarjeta se estableció se procedió a acceder a la misma con el software Pronterface 2015, a partir del cual se establecieron todos los parámetros necesarios para el funcionamiento de la impresora, como la altura del extrusor con respecto a la plataforma de impresión, el largo de los brazos, la altura de la impresora, el área de impresión factible y el centro de la extrusión. En la Figura 32 se muestran algunos de estos parámetros. Cuando ya se han introducido esos valores en la tarjeta se procedió a realizar la calibración de los motores y los sensores de paso se verificó que el funcionamiento se realice conforme se establece en los parámetros. La modificación de código fuente no fue necesaria debido a que los parámetros de control ya se encontraban establecidos en un archivo dentro la memoria mini SD de la tarjeta y dicha modificación puede darse el archivo o desde el software de control.

La configuración de los parámetros puede realizarse dentro del archivo principal de control o mediante la inserción de parámetros G-code (código G) en el área de introducción de comandos del software Pronterface.

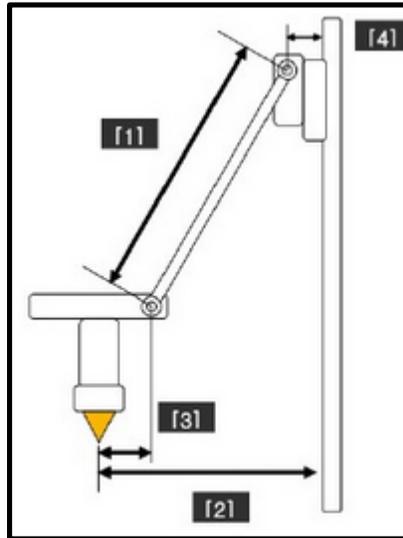


Figura 33. Esquema de brazo de impresora Delta con los parámetros básicos para definir: 1-Largo de brazo; 2- Radio factible; 3- Radio del centro; 4- Desfase.

Fuente: 3D printers Hanoi (2016).

Para las impresoras cartesianas las coordenadas se interpretarían en coordenadas cartesianas, para el caso de las impresoras Delta se usan funciones trigonométricas basada en los ángulos que se generan entre las tres columnas que serán las áreas límites donde los brazos podrán movilizarse, ese límite genera una circunferencia donde podremos definir el área de impresión (Figura 34).

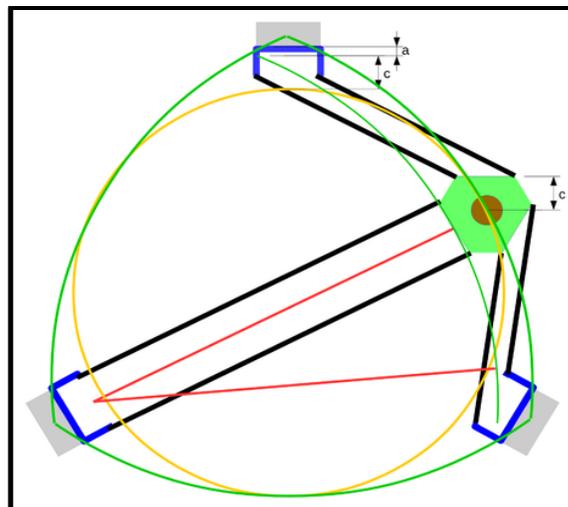


Figura 34. Esquema que muestra el alcance de los brazos de la impresora Delta. En verde se muestra el área que podría ser accesible sin obstáculos. En amarillo el área que realmente puede ser empleada.

Fuente: RepRap (2016)

Cada una de las torres de la impresora Delta está situada en una posición angular con respecto al centro, las cuales definiremos como Alfa, 210°, Beta, 330° y Gamma, 90°. El área de impresión se localizará dentro de los ángulos anteriormente definidos y su diámetro se estableció en 34 cm; sin embargo el área de impresión factible disminuyó conforme se fueron realizando los ajustes. Para poder situar las coordenadas cartesianas en el área de impresión circular se emplearon las ecuaciones de la Tabla 10, en donde se aprecian los resultados.

Tabla 10. Conversión de coordenadas angulares a cartesianas para cada una de las columnas de la impresora.

Fórmula	Alfa	Beta	Gamma
$X=Ri(\cos(A_n))$	-147.22	147.22	0
$Y=Ri(\sin(A_n))$	-85	-85	170
<p>Dónde: R_i = es el radio de impresión en mm A_n = ángulo de la torre</p>			

Fuente: 3D printers Hanoi (2016).

Los datos se introdujeron en los parámetros de control y se evaluaron el funcionamiento de los motores; así como los sensores de paso. Una vez que se colocaron todas las piezas de la impresora se realizó una calibración que permitió verificar si el conjunto de brazos estaba al nivel de la plataforma en todas las torres y también si el área factible de impresión fue la adecuada.

5.1.2. Diagrama de la tarjeta

La tarjeta controladora seleccionada fue Smoothieboard 5XC en lugar de Arduino debido a que este no permite usar más de un extrusor sin el riesgo de sobrecalentarse. La ficha técnica de Smoothieboard menciona que es posible agregar incluso 4 extrusores, algo que será útil en el futuro si se requiere aumentar el número de ingredientes. La tarjeta emplea control numérico y es gestionada con comandos en código G (Figura 35).

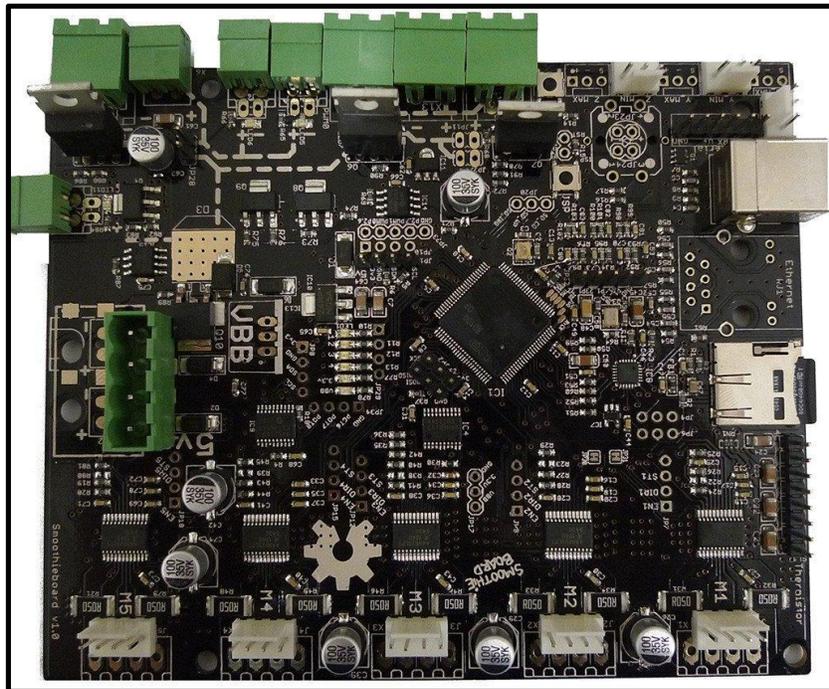


Figura 35. Tarjeta de control Smoothieboard 5xc para impresora 3D

Una vez ingresados los parámetros en la tarjeta al software Pronterface se guardaron con el comando M500 y se procedió a realizar la energización de la tarjeta con una fuente de poder para evaluar los motores de paso (Figura 36).

La tarjeta controladora Smoothieboard se conecta a una fuente de poder de 12v, los motores de pasos y los finales de carrera también son conectados en su respectiva terminal y en correcto orden, de lo contrario el funcionamiento podría fallar, ocasionando diversos errores como, impresiones “espejo” o daño en las bandas o carros. La tarjeta de control cuenta con una memoria miniSD en donde se almacena el firmware y también es posible albergar los archivos de impresión, así como el código fuente.

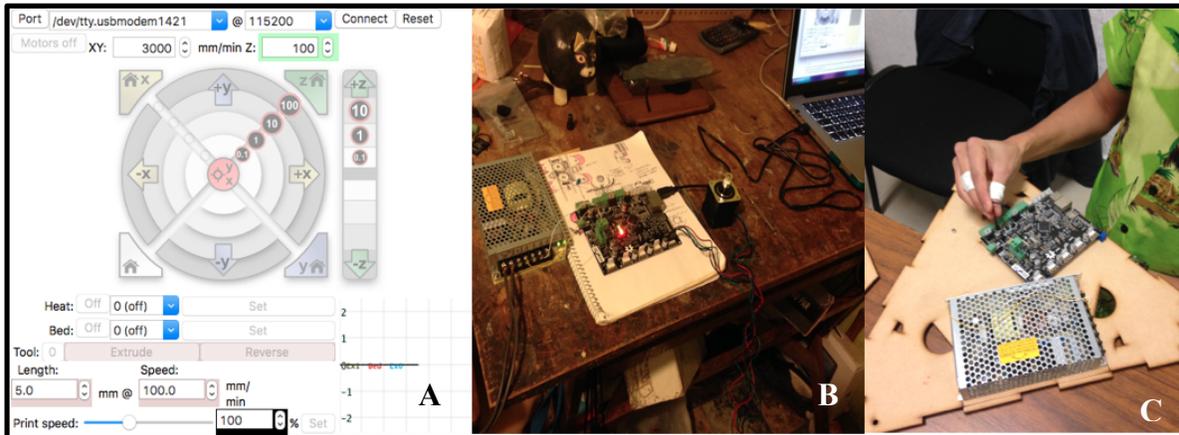


Figura 36. (A) Introduciendo comandos en pronterface. (B) Energización con fuente de poder y prueba de motores. (C) Instalación de electrónica en la base de la caja de control.

5.1.3. Calibración de los motores de las torres.

Cuando toda la electrónica se ha probado se procedió a calibrar los motores de las torres encargados de movilizar los brazos y los extrusores, para ello fue necesario tener en cuenta las características del motor, en este caso se usaron motores a paso de dos fases, de 200 pasos, y cada paso equivale a 1.8° . La tarjeta Smoothieboard cuenta con controladores A5984 que se encargan de dividir los pasos en micropasos, en este caso en 32 micropasos por cada paso y una revolución de 12.5 mm en el husillo y su torque es de 0.45Nm. Estas características fueron útiles para calcular el número de pasos que debe recorrer el motor para mover la banda dentada direccionalmente o el tornillo del extrusor. El movimiento del extrusor no requiere de estos cálculos, más adelante se verá.

Para realizar el movimiento del brazo de la impresora es necesario movilizar el cinturón dentado y para mover el cinturón se requiere hacer rotar un engranaje a una determinada velocidad, por lo que se debe especificar al motor la velocidad que se requiere para generar el movimiento adecuado sin averiar los cinturones dentados o los mismos motores. La ecuación 1 a continuación mostrada permite calcular la velocidad idónea o en este caso pasos por milímetro para cada motor y engranaje seleccionado. Cabe aclarar que el engrane que se empleó fue uno de 20 dientes y la banda dentada tiene una distancia entre diente y diente de 2 mm correspondiente al engranaje, clasificada como GT2.

Fórmula para los motores para el movimiento de la banda dentada

$$P_{pm} = \frac{\left(\frac{360}{Gp}\right)(mp)}{(Bd)(Nd)} \dots\dots Ec. 1$$

$$P_{pm} = \frac{\left(\left(\frac{360}{1.8}\right) \cdot (32)\right)}{(2) \cdot (20)} = 160$$

Ppm=160 pasos por milímetro

Dónde:

Ppm= Pasos por milímetro

Gp= Grados de movimiento por cada paso

Mp= Micropasos por cada paso valor dado por el driver

Bd= Distancia entre diente y diente de la banda dentada en milímetros

Nd=Número de dientes en el engranaje

Fuente: Prusaprinters (2017).

Ingresado los parámetros básicos y evaluados los motores se procedió a instalar en la estructura de aluminio, pero antes de eso se instalaron los motores, los cinturones, los carros, los engranajes y los brazos. Como se aprecia en la Figura 37, la caja de control se diseñó en MDF y la altura de la caja fue de 12 cm y entradas para las conexiones, el diseño no sufrió muchas modificaciones desde el boceto elaborado en computadora. Para verificar el movimiento correcto de los motores se introducen comandos para encender los motores, movilizar los carros para cada una de las torres y hacerlos chocar con sus respectivos sensores de corte de paso. Esta evaluación permitió ubicar un error en la conexión de los sensores que ocasionó un fallo en la dirección de los motores.

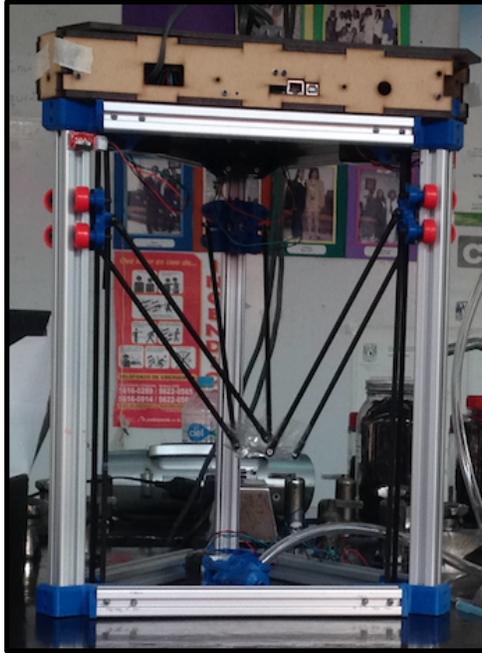


Figura 37. Ensamblado final de la impresora, sin extrusor.

5.1.4. Zona de presión

Los alimentos que se emplearon en impresión 3D fueron estables a la deposición y fluidos al transporte; sin embargo, demasiada fluidez en el alimento hizo carecer de estabilidad en la deposición y se generaron alimentos desparramados, por ello es necesario emplear alimentos con fluidez a los esfuerzos altos. Para poder expulsar el alimento de los cartuchos fue necesario generar un empuje que permitió desplazar el alimento a través de las tuberías hasta el extrusor, ya que la fuerza de gravedad era insuficiente. La Figura 38 muestra el sistema básico para el empuje del alimento, consiste en un pequeño compresor de 1/8 de HP conectado a un contenedor que almacena la presión, manteniéndola a 50 lb/in², el tanque además de funcionar de almacenamiento también fungió como distribuidor hacia los distintos extrusores. Al tanque de almacenamiento se le adaptó un manómetro de 300 Lb/in² que permitió conocer la presión que es almacenada y además la cantidad de presión que es empleada para desplazar cada alimento. La fluidez del alimento, el largo de la tubería, el diámetro de la tubería y la velocidad del tornillo sinfín son las características más importantes que se deben tomar en cuenta para contrarrestar la fricción y seleccionar la presión más adecuada que permita el desplazamiento más óptimo de los alimentos semilíquidos. Debido a que la experimentación se cambió constantemente las

formulaciones de los alimentos fue necesario ajustar la presión de forma manual para obtener la presión más adecuada para cada uno, que induzca su desplazamiento del contenedor de almacenamiento hacia las tuberías. En comunidades de diseño de impresoras para la extrusión de porcelana como “Make Your Own Ceramic 3D Printer” (Pagace, 2017) recomiendan emplear presiones entre los 2 y 3 bares (29 a 43.5 Lb/in²), pero la presión oscila de acuerdo a las condiciones de la pasta cerámica. Para la experimentación se realizaron pruebas de presión que comenzaron a partir de las 15 Lb/in², incrementándola hasta 50 Lb/in².

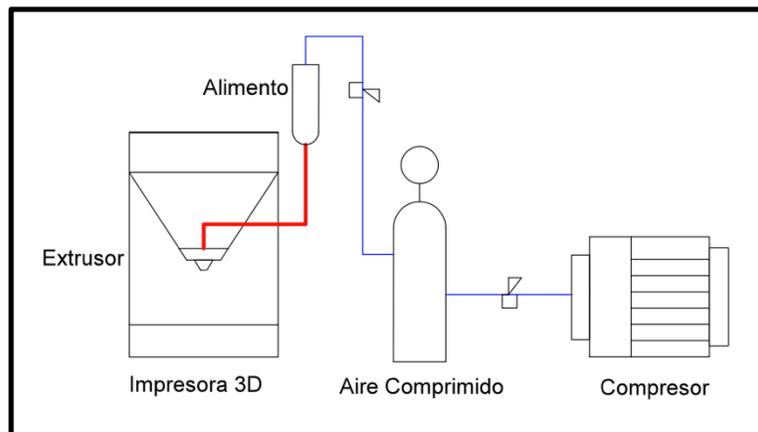


Figura 38. Conexiones entre el compresor, la zona de almacenamiento y el cartucho de alimento.

5.1.5. Zona de almacenamiento

La zona de almacenamiento debe cumplir ciertos requisitos para poder mantener el alimento en óptimas condiciones y al mismo tiempo ser un dispositivo que facilite la expulsión del alimento a través de los extrusores. Los requisitos más importantes se detallan en el siguiente listado:

- 1- Soportar una presión superior a 50lb/in².
- 2- Materiales grado alimenticio.
- 3- Boquilla de drenado de alimento inocua.
- 4- El aire que entre en contacto debe ser inerte.
- 5- Hermético a luz y humedad.
- 6- Acoplamientos fáciles de instalar y desinstalar.

Para la experimentación es posible descartar las condiciones del aire, debido a que no produce modificaciones relevantes sobre el alimento, además el tiempo de exposición del alimento con el aire será escaso.

Para los primeros cartuchos de alimento se emplearon termos o cantimploras que a menudo están elaboradas de aluminio recubierto de plástico inerte al interior del envase, a los cuales se les adaptó una boquilla para la entrada de aire y una salida para la expulsión de alimento, cada extremo contaba con mangueras de vinilo elástico transparente; la conexión que suministra el aire a presión conecta a un tanque de almacenamiento de aire comprimido y la otra manguera va directo a la entrada del extrusor.

Estos tienen capacidad de almacenar 500 mL de alimento semilíquido, y cumple con las condiciones establecidas previamente. Conforme se fueron realizando las experimentaciones se fueron encontrando las fallas en el diseño del tanque de almacenamiento y realizando mejoras en la marcha (Figura 39).

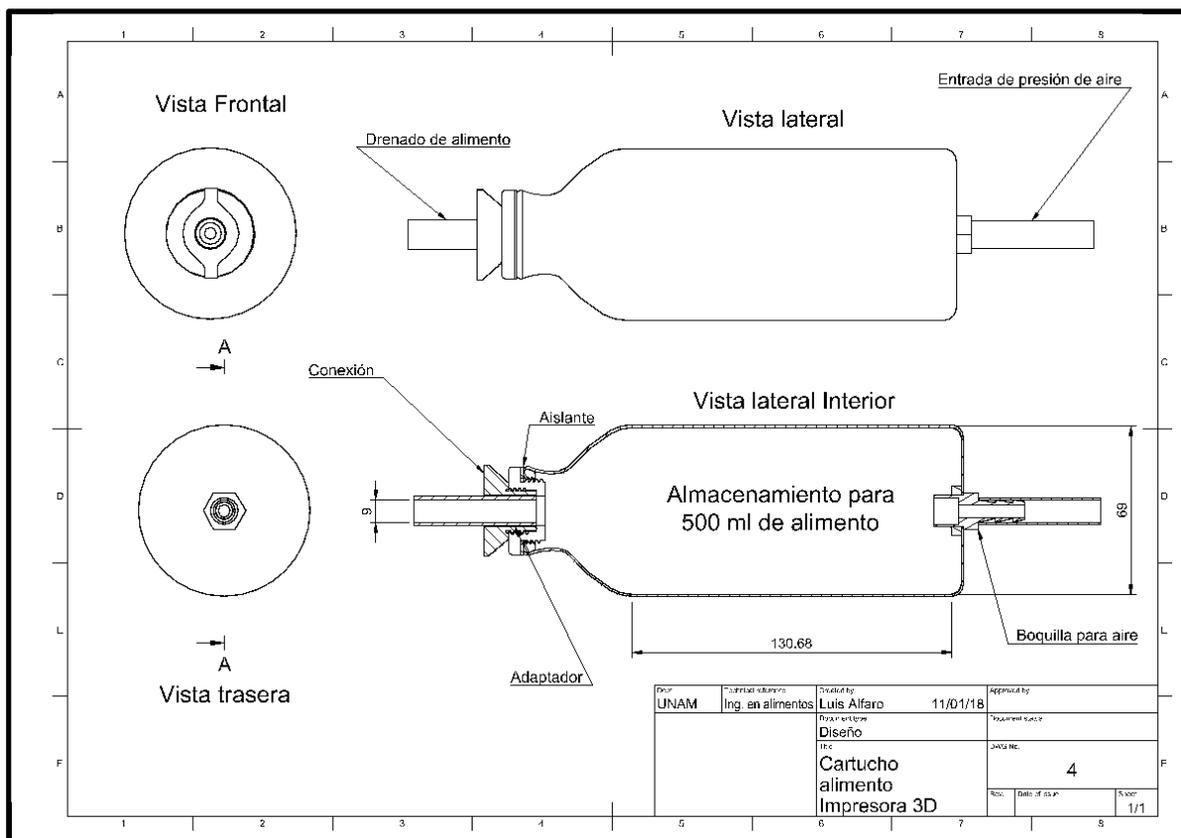


Figura 39. Diseño de las conexiones para el tanque de almacenamiento.

5.1.6. Primer prototipo de extrusor

En el caso del extrusor de tornillo su funcionamiento se basa en un tornillo sin fin, al cual se le suministra alimento por empuje a presión que será desplazado por el movimiento rotatorio del tornillo hacia la boquilla. Del mismo modo que la extrusión por pistón, la extrusión por tornillo también presenta el inconveniente de no poder extruir el alimento en gran cantidad si no es desde el exterior, en tal circunstancia compararemos cuan eficiente es suministrar alimento por cartucho pequeño ubicado dentro de la impresora con respecto a un cartucho externo grande colocado en el exterior de la impresora.

La configuración del extrusor se realizó mediante el software Pronterface y para la calibración se introdujo una velocidad inicial de 20 rpm en el tornillo. El diseño del extrusor fue realizado en Fusión 360 2017 e Inventor 2015 y se manufacturaron con impresora 3D (tipo Prusa) en filamento PLA (Figura 40) para los primeros prototipos y filamento PETG para los diseños finales. La fijación del extrusor al centro se realizó con tornillos que lo mantuvieron estable conforme se realizó la impresión del alimento. Se realizaron 4 extrusores diferentes que fueron evolucionando conforme se ubicaban fallas, sin embargo, se presentará solo el primer y segundo prototipo de extrusor, el resto de los extrusores se mostraran parcialmente. El primer prototipo de extrusor se centra a una base que se atornilla a los brazos de la impresora Delta y se programa con coordenadas de inicio en las coordenadas 0, 0.

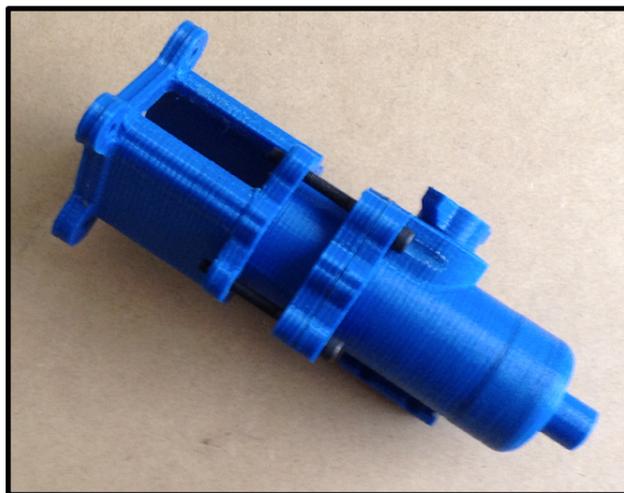


Figura 40. Diseño de primer prototipo de extrusor de tornillo, fabricado con impresión FDM en PLA.

Para evaluar el funcionamiento del extrusor se ensambló toda la impresora y se conectaron las mangueras al compresor y estas a su vez al tanque de presión y posteriormente al extrusor (Figura 41). Se realizó una formulación prueba con masa de tortillería disuelta en proporciones de 30% de masa de maíz con 70 % de agua y se aplicó una presión inicial de 15 Lb/in² que logró desplazar el alimento de forma lenta y progresiva hacia el extrusor.

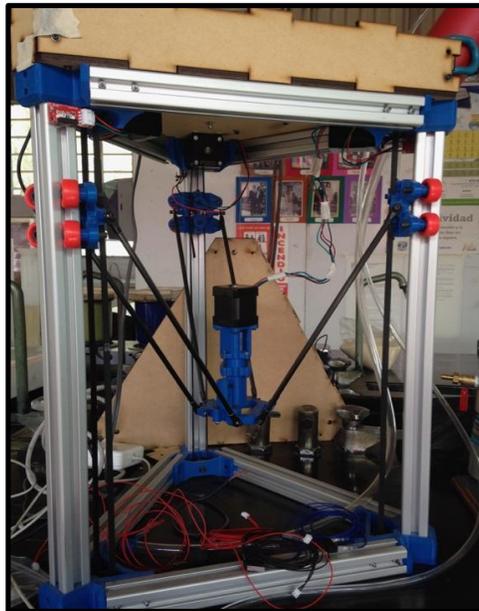


Figura 41. Instalación completa de la impresora 3D de alimentos, con el extrusor y la conexión al tanque de presión.

La primera evaluación requirió que el movimiento del tornillo se mantuviera estático en todo momento para visualizar alguna fuga ocasionada por el paso de la masa por las conexiones y el extrusor, inmediatamente realizada la prueba se encontraron dos derrames de masa en la conexión de la manguera hacia el extrusor y otro en la punta del extrusor donde se encontró goteo constante, para solucionar estos derrames se disminuyó la cantidad de agua en 35% y se añadió un empaque en la entrada del extrusor. Posteriormente se repite la operación de extrusión con la formulación de la masa modificada y se eliminan las fugas.

Para la siguiente evaluación se hizo pasar la nueva formulación de masa de maíz a través de las conexiones y el extrusor, pero en esta ocasión se configura la velocidad de rotación del tornillo a 20 rpm mediante el uso del software Pronterface 2015 y a una presión de 15 lb/in². Para la extrusión se emplea una boquilla de 4 mm de ancho elaborada con una punta desechable de pipeta. No se encontraron fugas en esta prueba.

En la siguiente evaluación se realizó la extrusión de masa, pero esta vez se empleó harina de maíz de la marca “MASECA antojitos” para realizar la masa, la proporción fue de 35% de harina y 65 % de agua. En esta ocasión se realizó la impresión de una figura, una geometría ovoide de largo, ancho y alto de 5 x 3 x 1 cm, respectivamente, que fungió como el alimento (Figura 42). Una vez realizada la impresión de la masa se diagnosticaron las fallas.

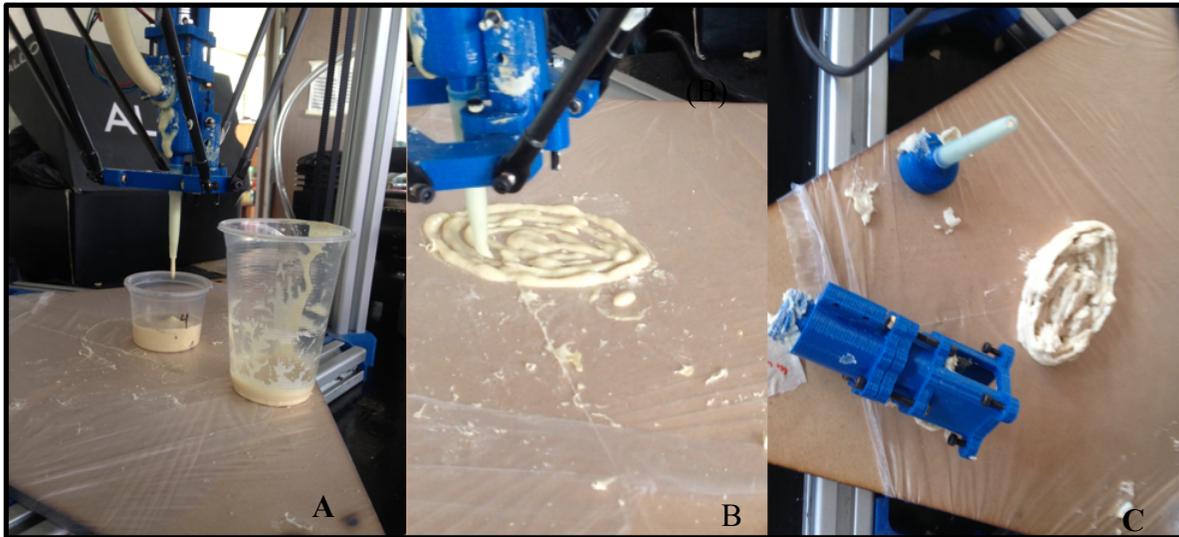


Figura 42. (A) Evaluación de la presión con tornillo a 20 rpm. (B) Impresión de geometría con tornillo a 20 rpm. (C) Resultado de la impresión.

Esta evaluación se realizó con contratiempos debido a que se conjuntaron dos tipos de obstrucciones, una en la manguera de suministro, la cual se dobló al momento de generar la impresión bloqueando la salida de alimento; la segunda obstrucción la ocasionó un empaque que se desprendió de la zona central del extrusor introduciéndose en el vástago del tornillo, generando la disminución de velocidad para después detenerse por completo (Figura 43). Corregidos esos problemas se repite la impresión, esta vez con resultados favorables.

Una vez realizada la impresión se procede a desinstalar el cartucho de alimento, desensamblar el extrusor, limpiarlo, lavarlo, ensamblarlo y nuevamente repetir el proceso de impresión.

Después de haber realizado tres repeticiones se logró ubicar una serie de problemáticas en el extrusor, siendo la más destacada la generada por la tensión entre las piezas y el tornillo en movimiento, lo que generó una fractura en el tubo del extrusor. Otras fallas que entorpecieron el funcionamiento del extrusor, fueron:

- a) El prolongado tiempo de desensamblado y ensamblado.
- b) Fugas en la parte del cople.
- c) Piezas innecesarias del extrusor.
- d) Omitir el uso de tornillos para ensamblar las piezas del extrusor.
- e) Empaques innecesarios en el extrusor.
- f) Plástico quebrantado ocasionado por la tensión en el hermetismo.

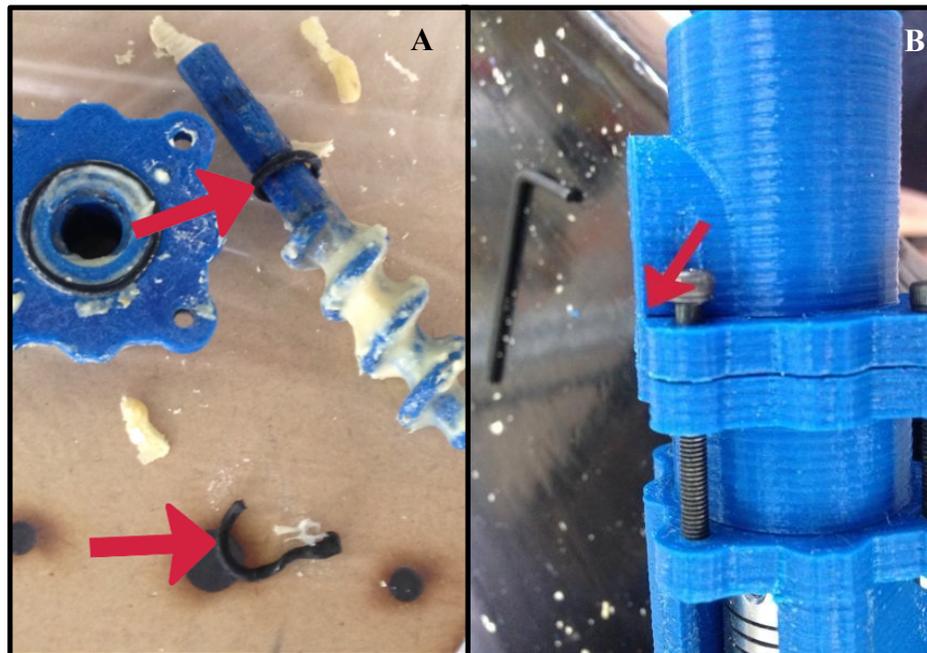


Figura 43. Obstrucción ocasionada por empaques (A). Rompimiento de extrusor debido a la tensión (B).

5.1.7. Segundo prototipo de extrusor

Las mejoras que fueron añadidas en el segundo extrusor fueron principalmente para efficientizar su lavado, disminuir la tensión en las conexiones y aumentar la fuerza del extrusor, a continuación, se enlistan las mejoras (Figura 44):

- Bisagras retráctiles, permiten desensamblar el cañón de la base con mayor rapidez.
- Disminución del largo del vástago del tornillo.
- Acoplamiento magnético que permite retirar rápidamente el extrusor del centro.
- Conexión a manguera con entrada vertical, facilita la entrada de alimento al extrusor.

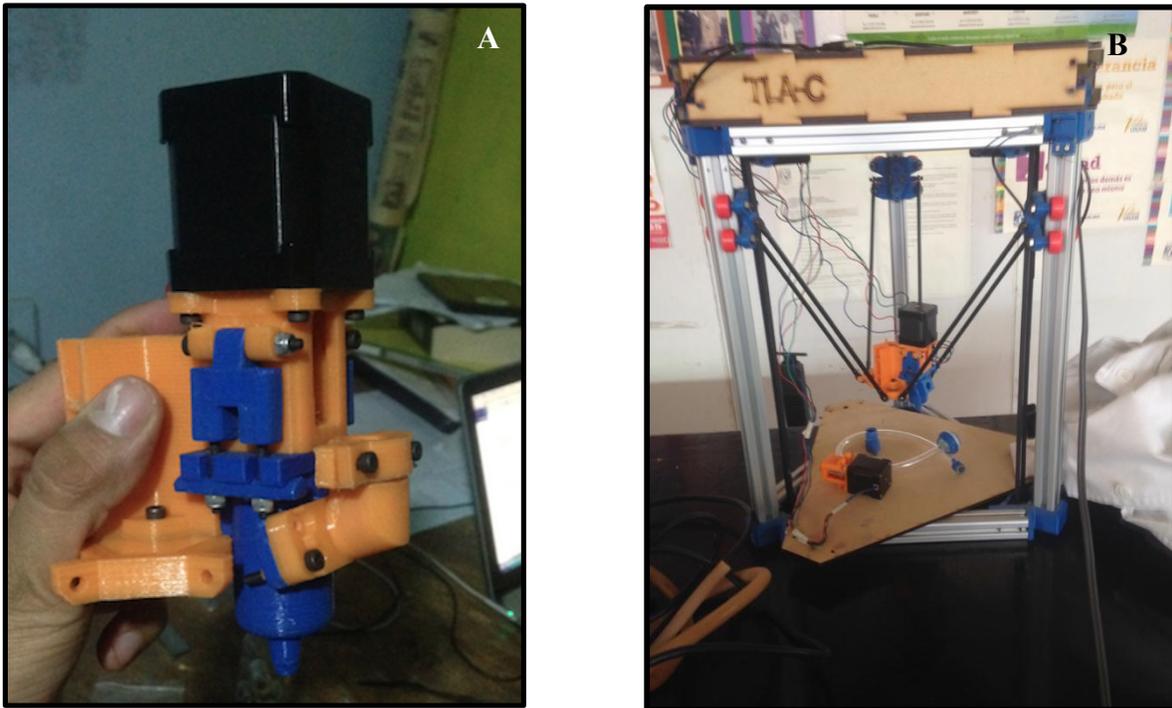


Figura 44. Segundo prototipo de extrusor con las mejoras (A) y Extrusor instalado en el centro de la impresora (B).

Una vez más se procedió a realizar la impresión de alimento con el nuevo extrusor con masa con 35% de harina y 65% agua y con presión de 15 lb/in², en esta ocasión se realizó la impresión de cuatro letras que formarán la palabra “HOLA”, la finalidad fue comprobar el funcionamiento del extrusor. También se sustituyó la boquilla pipeta desechable y se diseñó una nueva boquilla de 3 mm de ancho. Al finalizar la impresión se determinó que la marcha del extrusor fue la correcto a pesar de que la impresión no fue nítida, eso debido principalmente a que de momento se usó una formulación aleatoria para comprobar el extrusor. Posteriormente la palabra impresa fue calentada en horno eléctrico a 150 °C por 90 segundos, con el que adquirió una textura más estable y atractiva (Figura 45).

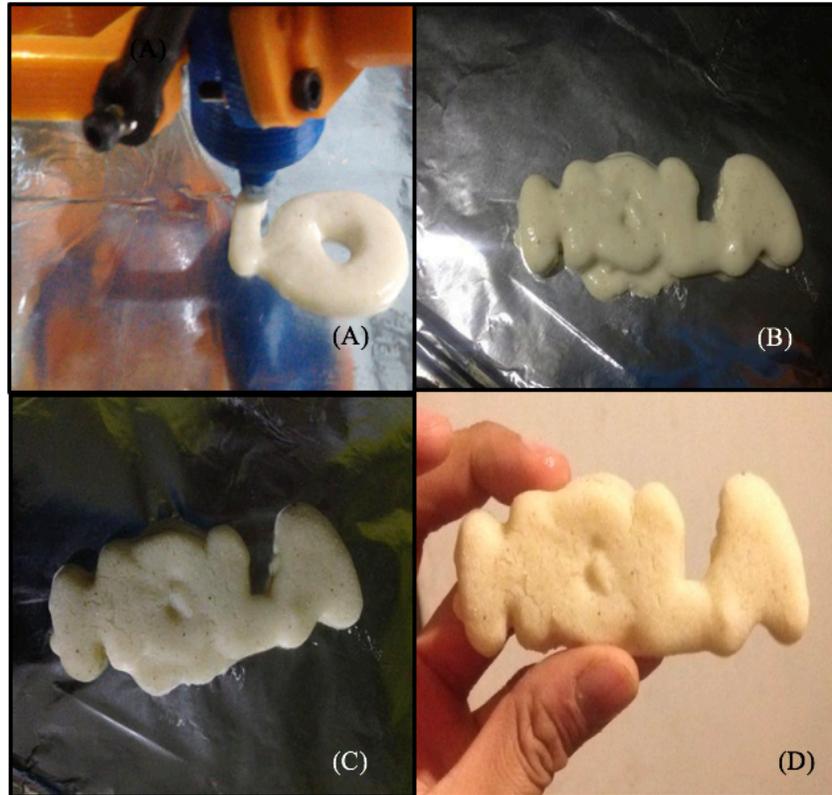


Figura 45. (A) Iniciación de la impresión con masa 65% agua, 35% harina de maíz. (B) Impresión concluida. (C) Impresión calentada en horno eléctrico a 150°C por 90 segundos. (D) Después del calentamiento la impresión se puede tomar fácilmente con las manos.

A pesar de que el segundo prototipo de extrusor diseñado resolvió la mayoría de fallas de su predecesor, las fugas de alimento se siguieron presentando, sin encontrar una forma eficaz de suprimirlas por completo. Estas fugas se presentaron sobre todo en la parte entre la unión del vástago del motor y el vástago del tornillo; ya que el alimento sube desde la entrada del alimento. Esta fuga es preocupante porque puede subir más allá del vástago del motor e introducirse al motor, por lo que se deben tomar precauciones; esta filtración se debe a que la presión se acumula mucho y la rotación del tornillo no tiene la suficiente velocidad para despresurizar rápidamente la presión a través de la expulsión de alimento por la boquilla, por lo que una solución fue aumentar la velocidad del tornillo.

5.2. Doble extrusión

Para realizar la extrusión de otro ingrediente se pensó en dos ideas factibles: generar un nuevo extrusor con multiconexión de cartuchos o dos extrusores totalmente independientes

que manejan sus propios cartuchos de alimento (Figura 46). La primera opción resultó ser la mejor decisión, ya que presentaba gran cantidad de ventajas en comparación a los extrusores independientes, tales como menor peso, compatibilidad, menos ensambles y menos piezas entre otras ventajas, sin embargo, se elige realizar los extrusores de forma independiente debido a que la multiconexión ocasionaría mezclas entre ingredientes ya que se emplea una sola boquilla para extruir todos los ingredientes.

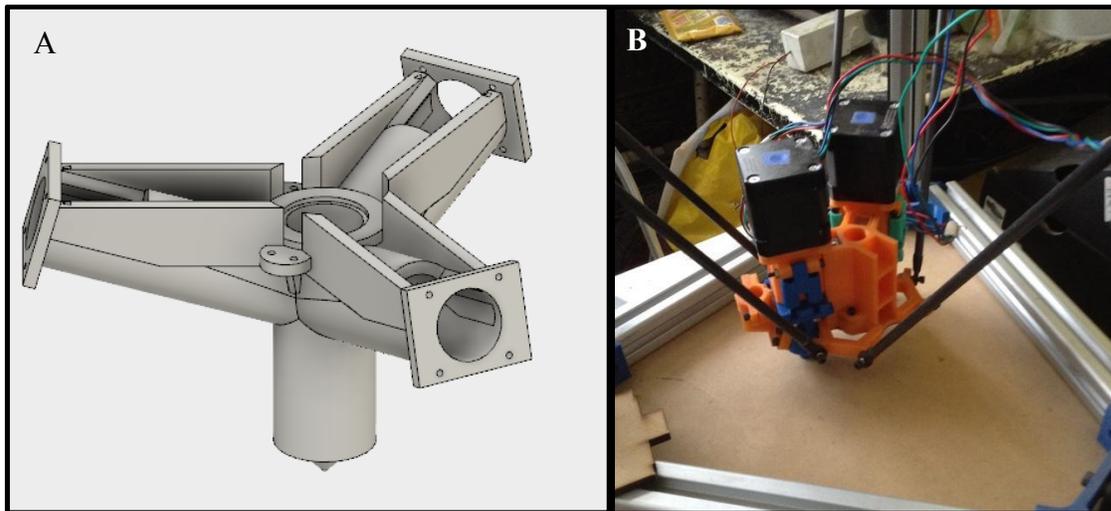


Figura 46. Prototipo de extrusor de multiconexión, varias entradas, una sola salida un solo motor (A). Extrusores independientes, un motor para cada ingrediente (B).

Entonces usar dos extrusores independientes con su propio motor implica colocarlos en la misma base donde se colocaba un solo extrusor anteriormente, por lo que se rediseñó la base y los acoplamiento. Esta modificación generó una separación con respecto al centro entre ambos extrusores y por lo tanto entre las boquillas, debido a ello se debe establecer la nueva ubicación de las boquillas. Inicialmente, la primera boquilla estaba ubicada en la coordenada (0, 0), es decir en el centro, la nueva ubicación para cada boquilla ahora estaría posicionado en las coordenadas (30, 18.5) para el primer extrusor y el segundo extrusor tiene una posición de (-30, 18.5) (Figura 47).

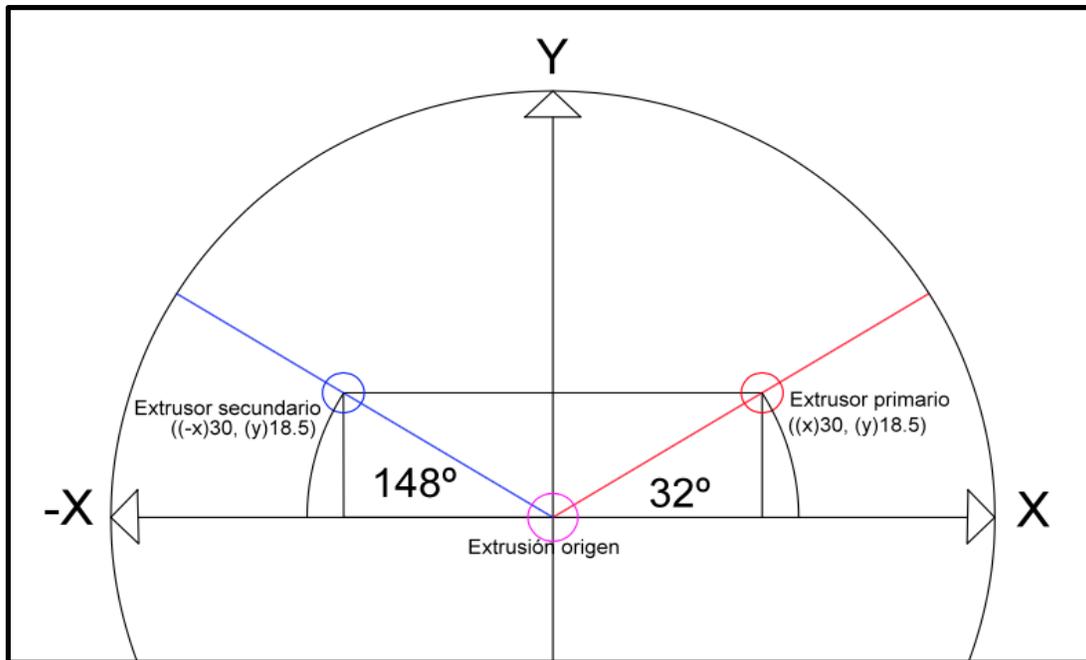


Figura 47. La ubicación actual de las dos boquillas con respecto a la boquilla colocada al inicio de la experimentación.

Una vez más se realizó la corrida con la impresora, pero esta vez se ponen en marcha ambos extrusores y se realizó una impresión de prueba, que contuviera dos ingredientes, en este caso se realizó nuevamente la forma geométrica ovoidal con las mismas medidas, pero utilizando un relleno de frijoles de la marca la “Costeña, frijoles negros refritos”. La masa fue preparada a 65% de agua y 35% de harina de maíz “MASECA antojitos” y para los frijoles se empleó una lata de frijoles a los que se disuelve en 10% de agua con la finalidad de hacerlos lo suficientemente fluidos para atravesar la manguera y las boquillas. Posteriormente el alimento impreso se calentó a 150° C por 4 minutos en un horno eléctrico. El resultado de la impresión fue exitoso, ambos extrusores se comportaron de forma satisfactoria y generaron la expulsión de alimento en las coordenadas indicadas y en el tiempo establecido por el Software que fue de 5 minutos, por lo que ambos extrusores quedaron listos para la calibración, lo que permitió el mejoramiento de la impresión del alimento (Figura 48).



Figura 48. Primer resultado de alimento impreso usando dos extrusores sin calibración. El exterior está elaborado de masa de maíz 35% harina, 64% agua y los frijoles disueltos en 10% de agua.

5.2.1. Resumen de problemas de corrida uno con dos extrusores.

Como se puede observar en la figura 49, aún fue necesario ajustar la cantidad de agua en la masa; ya que ésta decae por los bordes y se esparce por toda la superficie sin proveer una forma estable en ninguno de los dos ingredientes.

Otro problema observado fue en el tornillo que propulsa en exceso el alimento, ya que la distancia de las cuerdas del tornillo es de 10 mm, eso tiende a suministrar mayor cantidad de producto del que gestionamos con el software. Otro inconveniente que reaparece son las fugas en el acoplamiento del motor y en la salida de la boquilla lo que significa que la presión de aire suministrada es excesiva o es obstruida, que a su vez deriva del movimiento lento del tornillo, u obstrucciones no contempladas como resultado de ese problema se generan deposiciones excesivas de masa en áreas no programadas.

Los problemas presentados se corrigen parcialmente mientras se diseña el tercer prototipo de extrusor que corrija totalmente el contratiempo, mientras tanto se realizan 3 impresiones más en las mismas condiciones, que corrobora el correcto funcionamiento de los extrusores, los brazos, las impresiones y los sensores. Con las posteriores pruebas del

extrusor se logró ubicar las causas de la fuga y el aumento de presión, el problema proviene de las características de la harina y obstrucciones de las mangueras por un mal diseño.

5.2.2. Calibración de los extrusores

Calibrar un extrusor significa, aprovechar la velocidad y fuerza de arrastre del tornillo y el empuje del aire para hacer las deposiciones de alimento más estables y nítidas posibles, pero solo con determinadas consistencias en los alimentos. Para poder realizar la calibración de los extrusores fue necesario variar entre diversas formulaciones de masas, velocidades del tornillo y presiones y además mantener constantes ciertas características en los extrusores, como:

- 1- Diámetro de salida de la boquilla (2 mm)
- 2- Características del tornillo, cuerda, canaleta, diámetro, largo (80 mm largo, cuerda 4 mm, canaleta 3 mm, diámetro 8 mm)
- 3- Área de ingreso de alimentación (20 mm)

Cuando dichas características se mantienen constantes entonces se puede proceder a manipular la masa a partir de la variación de la presión y la velocidad del tornillo, de la cual se obtendrá una respuesta que será la resolución y similitudes que tiene la deposición de la masa, con respecto al diseño elaborado en computadora, principalmente dimensiones y forma.

Una vez los parámetros se hayan calibrado entonces se puede proceder a variar las constantes anteriormente enlistadas con la finalidad de mejorar la resolución y similitud de las impresiones alimentarias con respecto al diseño en computadora.

5.2.3. Tercer y cuarto prototipo de extrusor

El tercer prototipo de extrusor añadió las características de calibración y se rediseñó por completo para poder ajustarlo a las medidas del tornillo, también se rediseñó la conexión con las tuberías de alimentación y se minimizaron el número de piezas empleadas para su ensamble con respecto a los primeros diseños.

Las boquillas se diseñaron con rosca de tal forma que se facilite el intercambio de las mismas, haciendo más sencillo su cambio y limpieza y la abertura de salida de la boquilla es de 2 mm. Anteriormente se usó un tornillo sin fin elaborado con impresión 3D, para el nuevo diseño se trata de una pija de acero inoxidable 304, de 8 mm de diámetro, 80 mm de largo, canaleta de 3 mm de largo y cuerda de 4 mm. Se rediseño la conexión con la zona de alimentación mediante una abrazadera y una pieza plástica que permitiera el agarre. Sin embargo, la conexión no resistió más de tres impresiones y reventó debido a la presión (Figura 49) a causa de esto se decidió emplear cartuchos más pequeños para sustituir el tanque de 600 ml, ya que para la experimentación no se llegaba a utilizar toda la masa del contenedor de almacenamiento.

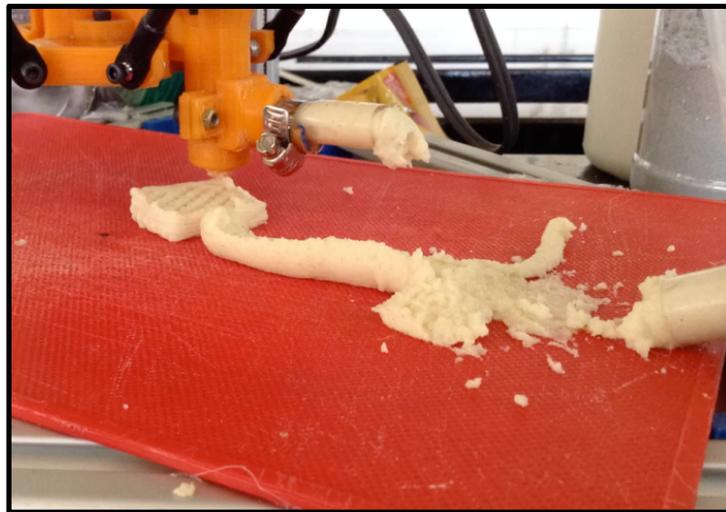


Figura 49. Explosión de la conexión por la presión debido a un mal diseño.

Para el cuarto prototipo de extrusor se añadieron cartuchos pequeños para el almacenamiento del alimento hecho de un tubo de plástico de 60 mL que se colocó en la parte posterior del extrusor, la conexión del cartucho al extrusor se elaboró de una sola pieza en donde los cartuchos se añaden enroscándose y fueron manufacturados con impresora 3D en PLA. A los cartuchos además se añade una tapa rosca con una conexión neumática para facilitar el acoplamiento con las mangueras de presión.

Para que los cartuchos puedan contener el alimento sin derramarlo se debe agregar un plástico film perforado en la salida del cartucho que se desprende al someterse a la presión (Figura 50).



Figura 50. Cartucho con rosca y conexión neumática (A). En la salida se añade un plástico film perforado para facilitar el desalojo de alimento con la presión y evitar que salga o se esponga (B).

5.3. Formulaciones alimentarias

Desarrollar alimentos para impresoras de deposición no tiene mucha complicación siempre y cuando se cumplan dos características: fluidez en el transporte y estabilidad en la deposición.

Si el alimento fluye se puede facilitar el transporte desde el recipiente de almacenamiento, a las tuberías y hasta la salida del extrusor es importante que haya un ligero agarre entre el alimento y las paredes del extrusor de lo contrario el tornillo no podrá desplazar el alimento correctamente.

Además, una vez que el alimento salga de la boquilla debe mantener estabilidad para poder generar las geometrías establecidas, perder la fluidez es el primer paso para lograrlo; modificar la fluidez del alimento a la salida de la boquilla puede lograrse con concentraciones de agua que permitan fluir con esfuerzo y estabilizarse al retirar la tensión, otras opciones implican añadir tratamiento térmico, o un aditivo.

Como se vio en el primer capítulo, la impresora inicialmente fue evaluada en condiciones aleatorias con el fin de verificar que el funcionamiento de la impresora y de los extrusores fuera el correcto; una vez logrado ese paso se procede a realizar la calibración de cada uno de los extrusores que empleara cada alimento, la calibración requiere de evaluar las características de extrusión con respecto a las cualidades del alimento por lo que es

necesario preparar diversas formulaciones del alimento y extruirlas hasta obtener la formulación con mejor comportamiento en deposición y fluidez.

El primer producto a emplear es harina de maíz blanco, marca “MASECA antojitos”, que fue preparada como se describe en la metodología (apartado 4.3).

Cuando se evaluó la masa preparada con las especificaciones del empaque, se obtuvo una masa que no tenía las condiciones para poder pasar a través del extrusor, debido a que su consistencia no permitió la fluidez en las tuberías del extrusor, de hecho, ninguna concentración de agua en mL menor o igual a las especificaciones del empaque funcionaron en el extrusor, por lo que se comenzaron a descartar estas formulaciones en el transcurso de la experimentación (Figura 51).



Figura 51. Masas de harina en diferentes proporciones.

En pruebas preliminares se observó que la cascarilla de la harina de maíz empaquetado y otros fragmentos gruesos del maíz, obstruían constantemente las boquillas de los extrusores, por tal circunstancia se realizó un tamizado (con malla Tyler 40 de la harina obteniéndose de esta una harina más fina, a partir de la cual la consistencia de la masa mejoró y se evitaron las obstrucciones, como se puede observar en la Figura 52.



Figura 52. Tamizado de harina de maíz con malla Tyler número 40 (A). Se visualiza la cascarilla y trozos de grano de maíz muy gruesos, estas partículas representaron casi el 25% del empaque y fueron causantes de las obstrucciones (B).

5.3.1. Evaluaciones en las masas iniciales.

Las técnicas para seleccionar rápidamente las masas más adecuadas para la impresora se basan en emplear una jeringa para extruir estas masas y medir la facilidad con la que fluyen o se estabilizan y se describen en el apartado 4.3.1.

5.3.1.1. Fluidéz

Una de estas técnicas consiste en la extracción de la masa en un recipiente donde se pudo visualizar la forma en que se depositan las masas, las formulaciones más viables se usaron en la impresora (Figura 53), siendo las concentraciones de agua entre los 66.7 hasta 75% de contenido acuoso las más adecuadas para extruir. Formulaciones iguales o por debajo del 64% de agua requieren mucho esfuerzo para extruir la masa. Sin embargo, las masas entre 69.2 y 71.4% de agua fueron las formulaciones que se acercan aún más a las condiciones de estabilidad y fluidéz, cada una de estas formulaciones está al límite de las consistencias que se buscaban.

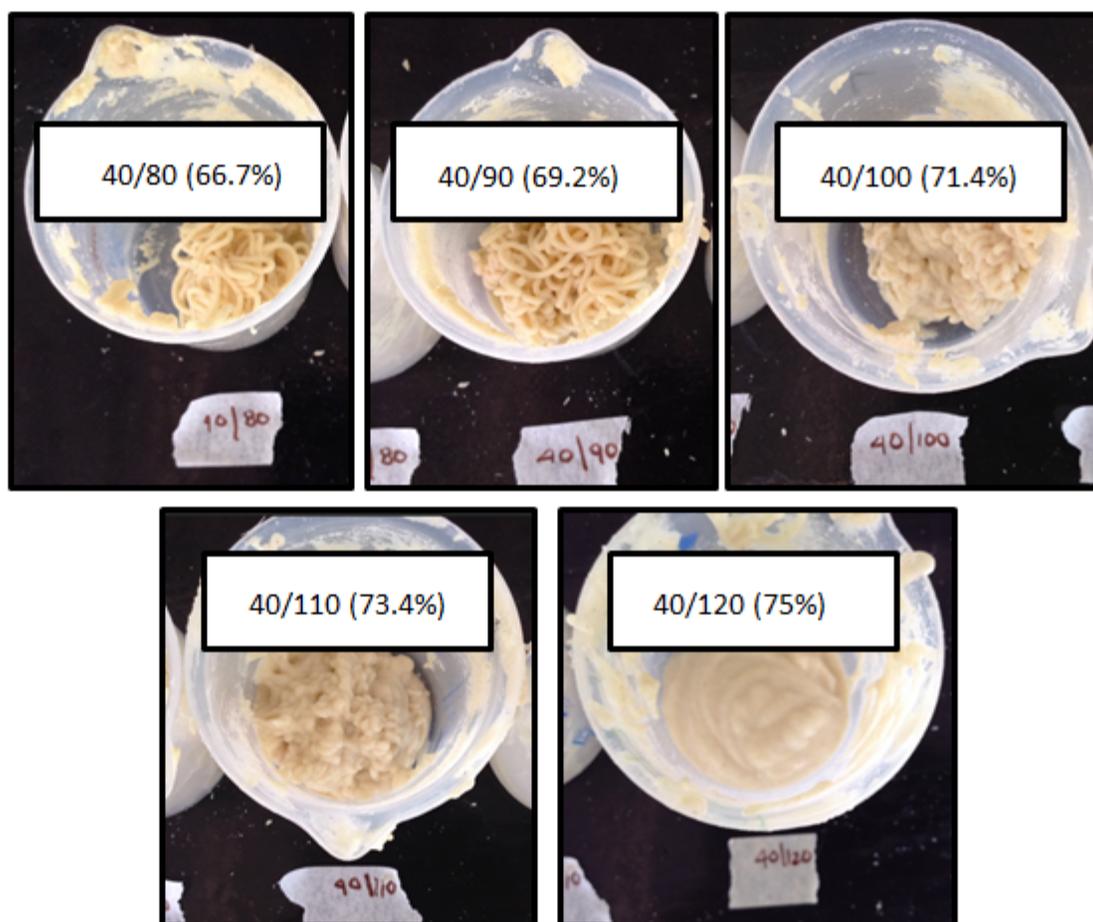


Figura 53. Resultado de la extrusión de masa, formulaciones elaboradas con harina y 66.7, 69.2, 71.4, 73.4 y 75% de agua. Las masas con mejor aspecto tienen 69.2 % y 71.4% de agua.

5.3.1.2. Esfuerzo

El esfuerzo necesario para expulsar estas masas se intentó medir con la técnica descrita en el apartado 4.3.1.1.2. Se logró notar que la técnica del apartado 4.3.1.1.2. no funcionó para masas con contenido de agua menor al 68%, debido a que fue imposible desplazar el émbolo de la jeringa o no se movía lo suficiente debido a que la masa estaba demasiado espesa casi dura por lo que el alimento extruido fue, nulo en consecuencia la balanza no podía registrar el peso, y por lo tanto los esfuerzos no se pudieron calcular; por arriba de ese porcentaje se comenzaron a observar los esfuerzos requeridos para lograr la expulsión de la masa, en la Tabla 11 se muestran los resultados de esfuerzo.

5.3.1.3. Estabilidad

Con la misma jeringa empleada para medir la fuerza de empuje del alimento se realizó un tercer experimento, descrito en el apartado 4.3.1.1.3. Esta evaluación consiste en amontonar el material extruido por la jeringa de una sola descarga con el objetivo de observar su estabilidad, masas que pierden su forma en menos de un 1 minuto tiempo fueron descartadas para el uso en la impresora (Figura 54).

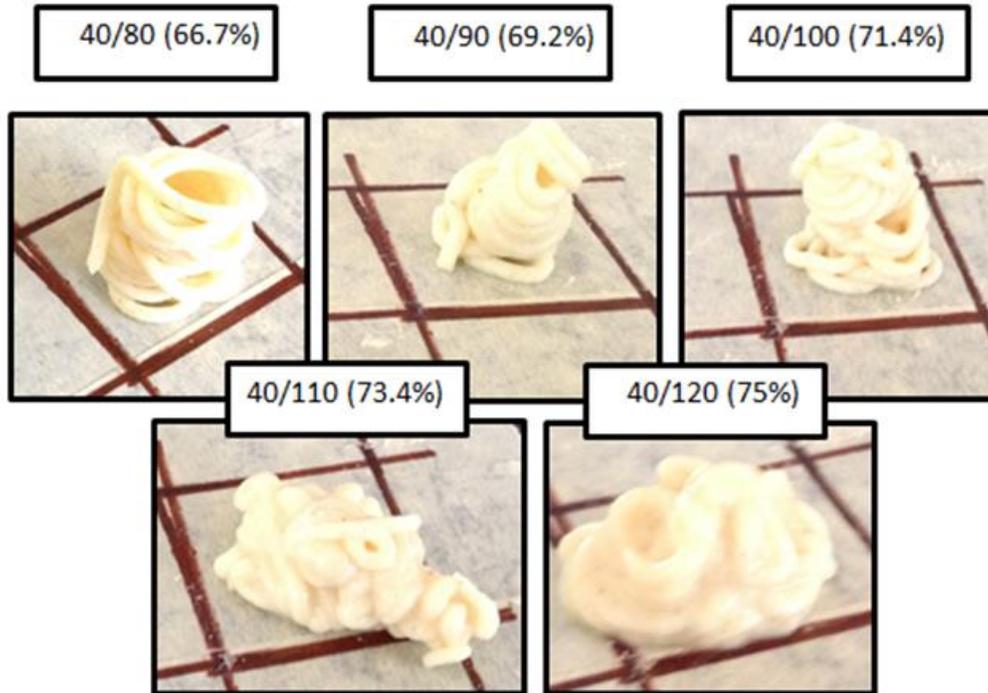


Figura 54. Prueba para observar decaimiento en las masas y estabilidad. Las formulaciones son elaboradas con harina y 66.7, 69.2 71.4, 73.4 y 75% de agua. Las masas con mejor aspecto tienen 69.2 % y 71.4% de agua.

Las muestras con mejor estabilidad observable fueron las de 66.7, 69.2 y 71.4% de agua, las cuales mantuvieron estabilidad en el lapso de tiempo establecido, no se apreció decaimiento, ni liberación de agua. La muestra de 73.4 y 75% decayeron antes de haber transcurrido un minuto, la última muestra además liberó mucha agua.

En la Tabla 11 se muestran las diversas masas evaluadas, a partir de las evaluaciones y también se pueden observar las formulaciones que se descartaron basándose en las evaluaciones realizadas, quedando la fórmula 4 y 5 como las mejores para emplearse para la impresora.

Tabla 11. Resultados de las evaluaciones realizadas a las formulaciones de las masas.

Formulación	Harina (%)	Agua (%)	Fluidez	Estabilidad	Newtons	Selección
Fórmula M	42.85	57.15	Descartada	Aceptable < 1 min	Sin datos	Descartada
Fórmula 2	40	60	Descartada	Aceptable < 1 min	Sin datos	Descartada
Fórmula 3	33.3	66.7	Aprobada	Aceptable < 1 min	Sin datos	Descartada
Fórmula 4	30.8	69.2	Aprobada	Aceptable	1.1564 N	Aprobada
Fórmula 5	28.6	71.4	Aprobada	Aceptable	1.0584 N	Aprobada
Fórmula 6	26.6	73.4	Aprobada	Descartado	0.833 N	Descartada
Fórmula 7	25	75	Descartada	Descartado	0.752 N	Descartada

Tanto la formulación 4 y 5 presentaron comportamiento de fluidez y estabilidad aceptables, por lo que fue necesario experimentar con dichas concentraciones para seleccionar el mejor comportamiento a la extrusión. La formulación 4 se caracteriza por tener una excelente estabilidad, mientras que la fórmula 5 tiene buena fluidez; se contempló usar una formulación intermedia para así aprovechar las propiedades de ambas formulaciones, sin embargo, al final se prefirió usar la fórmula 5, debido a que al tener más humectada la masa podríamos evitar la desecación de la masa mientras se realiza la impresión.

A la par del uso de la harina de la formulación 5 se usaron otras dos harinas totalmente distintas a la seleccionada por evaluación. Las otras harinas empleadas fueron: harina “Maseca clásica” y harina azul (obtenida de un tianguis local). Pero se descartaron para simplificar el proyecto.

5.3.2 Preparación de muestra de frijoles

Mientras la masa de maíz fungió como el alimento estructural principal, los frijoles tuvieron una función secundaria, es decir ornamental o de relleno y no estructural, por lo que no fue necesario que presentarán estabilidad como la masa, sin embargo, sí debían tener una moderada fluidez. En experimentaciones preliminares se licuaron los frijoles con 25 % de agua, pero se obtuvieron frijoles excesivamente líquidos, si usaba menor cantidad de agua no se podía realizar el mezclado correctamente. Por lo que se introdujeron frijoles con 10% de agua en una bolsa de sello hermético, ahí se estrujaron y aplastaron hasta obtener la consistencia deseada, sin embargo, cuando se evaluó en el extrusor los frijoles obstruyeron la boquilla ya que esa mezcla contenía pequeñas cascarillas o pedazos de frijol entero. Para solucionar este problema se decidió primero hacer pasar los frijoles por una rejilla o malla plástica de un colador, donde las medidas de los orificios oscilaban entre 1 y 2 mm de ancho. Notamos que realizado esta filtración no era necesario mezclarlos con agua en una bolsa hermética y que podían ingresar de ese modo al extrusor sin que se percibieran inconvenientes posteriores. Al medir los esfuerzos desde la jeringa se notó que los frijoles con cascarilla requerían 1.1 N para ser expulsados, mientras que los frijoles filtrados requirieron 0.5 N.

5.3.3. Acondicionamiento de muestras para impresora

Una vez obtenidas las muestras de alimento se procedió a insertar el alimento en los cartuchos de almacenamiento del alimento, para lograrlo cada pasta o masa se depositó sobre plástico film, se envolvió en el plástico y posteriormente se enrollaron los laterales del empaque hasta la formación de un salchichón, de este modo los empaquetados pueden ser almacenados o refrigerados hasta su uso en la impresora.

Para insertar el alimento de los empaques en los cartuchos, se cortaron uno de los laterales del empaque y se estrujaron hasta llenar el cartucho. El cartucho estuvo parcialmente sellado eso significó que la parte contraria a la introducción del alimento se cubre con plástico film al cual se le perforó un pequeño orificio o varios para poder drenar el aire en el momento en que la pasta ingrese al cartucho, de este modo se logró llenar la totalidad del cartucho con la pasta mientras se expulsa el aire y también se evitó la salida de la misma (Figura 55).

Posteriormente el cartucho se enrosca en el extrusor y finalmente se coloca la tapa donde se encontrará la válvula de ingreso del aire del compresor. Cuando la presión del aire empuja el alimento, entonces romperá el plástico film, saliendo del cartucho el alimento inmediatamente ingresará al tornillo y finalmente hacia la boquilla; el alimento depositado será lo suficientemente estable para mantener la forma que se genere con la impresión. Cuando los alimentos estuvieron preparados en sus cartuchos entonces se procedió a la preparación de la impresora.



Figura 55. (A) Las muestras se colocaron en papel film y se envuelven, quedando como un “salchichón”(B). Posteriormente los alimentos se insertan con una duya formada por el empaque al cartucho de la impresora (C).

5.4 Preparación de la impresora

Una vez que los alimentos estén colocados en el extrusor se procede a preparar la impresora, comenzando desde el diseño del alimento, la configuración del alimento y finalmente la impresión del mismo.

5.4.1 Diseño de alimentos

Diseñar alimentos para impresora es posible por dos rutas, la primera puede ser desde la realización de un diseño en un software CAD, posteriormente se filetea a código G; el segundo método puede llevarse a cabo desde el mismo código y solo será necesario escribir cada una de las coordenadas y extrusiones de lo que se desee imprimir.

Para nuestro caso se empleó el primer método y para realizar los diseños de los alimentos se empleó Fusion 360 2017, y se realizaron dos cubos de 30 mm y de 10 mm, que fueron utilizados para la calibración de los parámetros de impresión y también para la calibración

de los extrusores. Posteriormente otros cubos fueron diseñados, uno de 30 mm con su interior hueco con la finalidad de poder ser rellenado con el otro cubo de 20 mm del segundo ingrediente, en la figura 56 se muestra el diseño inicial.

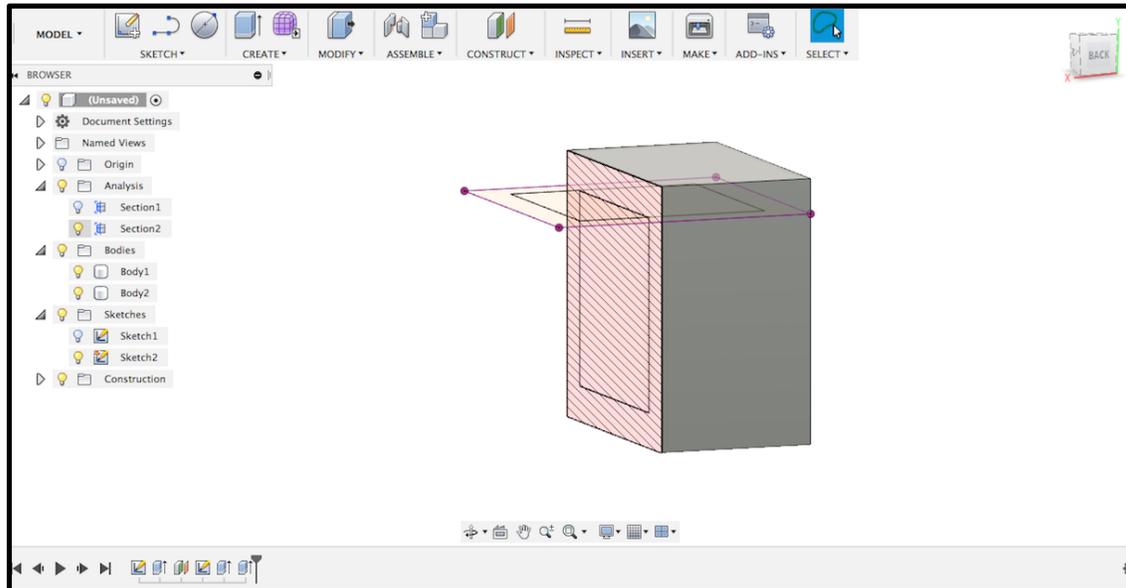


Figura 56. Cubos para calibración de extrusión y parámetros, diseñados con Fusion 360.

5.4.2 Configuración de parámetros para la elaboración de alimentos

El diseño generado en CAD se convierte a un archivo STL y posteriormente es fileteado como archivo g-code con Simplify3D versión 4.01. Los archivos g-code contienen una serie de instrucciones para la construcción de las piezas diseñadas, tales instrucciones muestran las coordenadas de posicionamiento, coordenadas de extrusión, indicaciones de la altura entre capas, altura de la deposición, separación entre deposiciones, tipo de relleno, velocidades, retracción, perímetro, etc. Estas instrucciones pueden modificarse abriendo el archivo g-code desde un editor de texto y cambiando cada uno de los comandos manualmente. La otra manera de realizar la modificación de parámetros es ingresar las modificaciones desde el software de control (simplify3D 4.01), este método fue el que se eligió por ser más rápido y sencillo, como se muestra en la Figura 57.

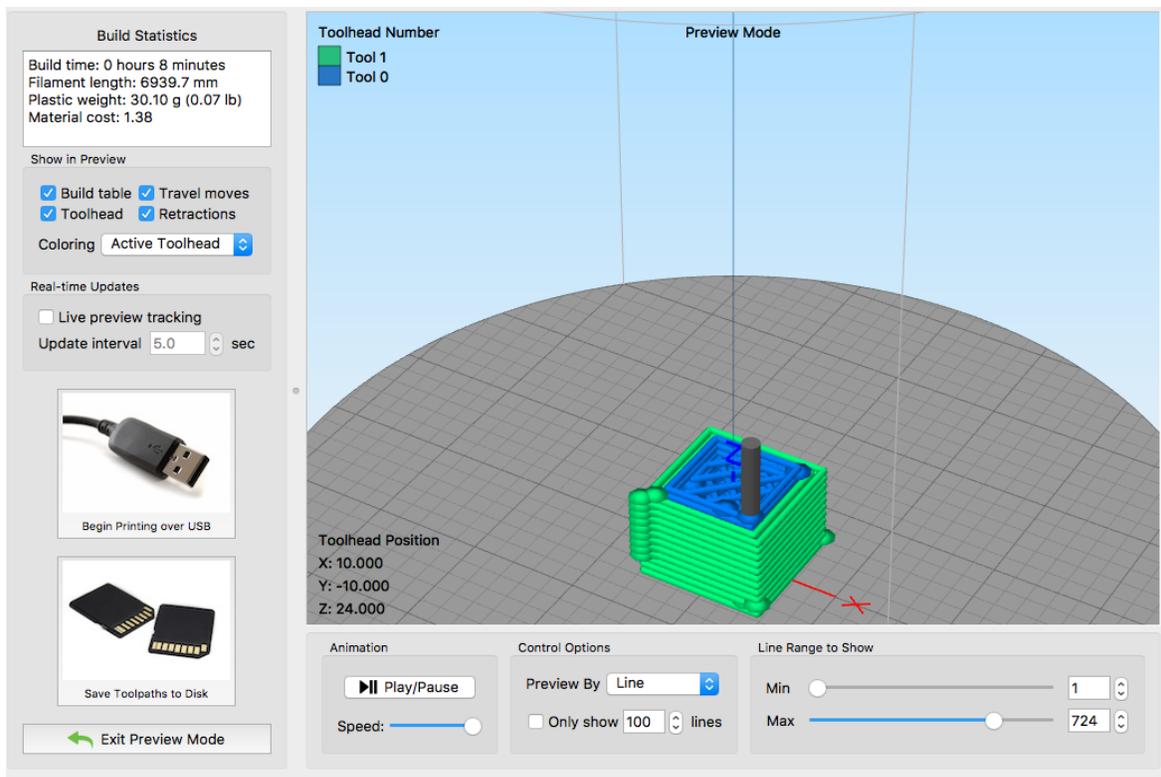


Figura 57. Vista previa del alimento modelado en CAD desde el software fileteador Simplify3D, desde donde se puede realizar la modificación de instrucciones del código G.

5.4.3. Impresión de las muestras

Los alimentos se imprimen sobre una superficie con un cierto grado de rugosidad debido a que al imprimir en superficies muy lisas el alimento tiende a resbalar y salirse del lugar correspondiente a la impresión sobre todo si su contenido en agua es elevado, para eliminar el deslizamiento de las impresiones se emplean tablas de corte de verduras que tiene una cierta rugosidad y porosidad ocasionando la adhesión del alimento debido a la fricción. También se empleó, plástico film, papel aluminio, papel encerado, vidrio y acero inoxidable 304 con buenos resultados, pero para la cocción de las impresiones ninguno de esos materiales ha resultado adecuado, tema que más adelante se aborda. Una solución para el problema de adhesión y cocción puede ser emplear acero inoxidable con pequeñas perforaciones.

Para las impresiones se emplearon las tres muestras de harina de maíz con anterioridad evaluadas, fórmula 4 y 5 e intermedia. También se usó harina de maíz azul y los frijoles filtrados. El alimento de calibración empleado fue un cubo de 30 mm, también se usó un cubo de 10 mm, pero se descartó debido a que no se podían realizar correctamente las

mediciones. Para la primera prueba se realizó nuevamente la impresión de la palabra “HOLA”, en esta ocasión con los parámetros ajustados. El resultado, aunque más nítido que la anterior impresión aún resulta en una impresión burda y desagradable a la vista.

Los siguientes diseños fueron cubos de calibración de 30 mm, los resultados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Evaluaciones para masas de maíz y frijoles con modificación de diferentes parámetros como presión, RPM, y formulación.

Prueba 1			
			
Ingrediente:	Masa blanca (30.8% harina, 69.2% agua)		
Superficie:	Papel aluminio		
Impresión:	Letras, “HOLA”, 50 mm x 20mm		
Presión:	50 Lb/in ²		
Velocidad de extrusor:	60 RPM	Velocidad por defecto:	60 mm/s
Velocidad de primera capa:	40 mm/s	Velocidad de la capa superior:	50 mm/s
Velocidad de los perímetros:	50 mm/s	Altura de capa:	5 mm
Espesor de la extrusión:	3 mm	Relleno:	Lineal 100%
Relleno capa superior/inferior:	Lineal	Retracción: Velocidad:	Apagada
Capas:	Perímetro: 3	Suelo: 3	Techo: 3

Tabla 12. Evaluaciones para masas de maíz y frijoles con modificación de diferentes parámetros como presión, RPM, y formulación (Continuación).

Prueba 4			
			
Ingrediente:	Masa de maíz azul (35% harina, 65% agua)		
Superficie:	Film de plástico		
Impresión:	Cubo 30 mm		
Presión:	50 Lb/in ²		
Velocidad de extrusor:	20 RPM	Velocidad por defecto:	80 mm/s
Velocidad de primera capa:	40 mm/s	Velocidad de la capa superior:	50 mm/s
Velocidad de los perímetros:	50 mm/s	Altura de capa:	2 mm
Espesor de la extrusión:	1 mm	Relleno:	Lineal 50%
Relleno capa superior/inferior:	Lineal	Retracción: Velocidad:	1 mm
Capas:	Perímetro: 1	Suelo: 3	Techo: 3

Tabla 12. Evaluaciones para masas de maíz y frijoles con modificación de diferentes parámetros como presión, RPM, y formulación (Continuación).

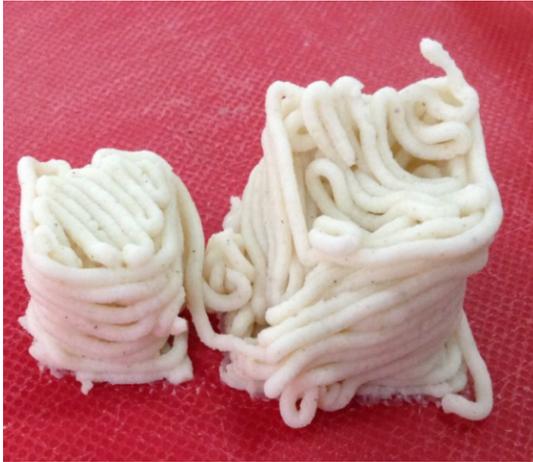
Prueba 10			
			
Ingrediente:	Masa de maíz blanco (28.6% harina, 71.4% agua)		
Superficie:	Bandeja de plástico		
Impresión:	Cubo 30 mm y cubo de 10 mm		
Presión:	40 Lb/in ²		
Velocidad de extrusor:	40 RPM	Velocidad por defecto:	70 mm/s
Velocidad de primera capa:	60 mm/s	Velocidad de la capa superior:	50 mm/s
Velocidad de los perímetros:	60 mm/s	Altura de capa:	2 mm
Espesor de la extrusión:	2 mm	Relleno:	Lineal 50%
Relleno capa superior/inferior:	Lineal	Retracción: Velocidad:	1 mm
Capas:	Perímetro: 2	Suelo: 3	Techo: 3

Tabla 12. Evaluaciones para masas de maíz y frijoles con modificación de diferentes parámetros como presión, RPM, y formulación (Continuación).

Prueba 16			
			
Ingrediente:	Masa de maíz blanco (28.6% harina, 71.4% agua)		
Superficie:	Bandeja de plástico		
Impresión:	Cubo 30 mm		
Presión:	35 Lb/in ²		
Velocidad extrusor:	60 RPM	Velocidad por defecto:	60 mm/s
Velocidad de primera capa:	45 mm/s	Velocidad de la capa superior:	60 mm/s
Velocidad de los perímetros:	60 mm/s	Altura de capa:	1 mm
Espesor de la extrusión:	2.4 mm	Relleno:	Lineal 50%
Relleno capa superior/inferior:	Lineal	Retracción: Velocidad:	apagada
Capas:	Perímetro: 2	Suelo: 3	Techo: 3

Tabla 12. Evaluaciones para masas de maíz y frijoles con modificación de diferentes parámetros como presión, RPM, y formulación (Continuación).

Prueba 19			
			
Superficie:	Bandeja de plástico		
Impresión:	Cubo 30 mm		
Presión:	25 Lb/in ²		
Velocidad de extrusor:	60 RPM	Velocidad por defecto:	60 mm/s
Velocidad de primera capa:	45 mm/s	Velocidad de la capa superior:	60 mm/s
Velocidad de los perímetros:	60 mm/s	Altura de capa:	1 mm
Espesor de la extrusión:	2.2 mm	Relleno:	Lineal 50%
Relleno capa superior/inferior:	Lineal	Retracción:	Apagada
Capas:	Perímetro: 1	Suelo: 3	Techo: 0

Después de varias evaluaciones y experimentaciones con la impresora se lograron encontrar los parámetros de impresión óptimos para dos distintos tipos de masa que y los frijoles. Para la velocidad del tornillo funcionó correctamente a 60 RPM para todos los ingredientes, mientras que la presión osciló entre 25 y 50 lb/in², siendo lo más notable de la presión por arriba de las 35 lb/in² el acabado de la capa superior de los cubos ya que la extrusión fue más gruesa y fue más agradable a la vista, el inconveniente con esa presión

fue que la masa se fugó por la parte superior del extrusor, en la cople que une los vástagos de tornillo y motor.

Posterior a la impresión se tomaron las medidas del alimento impreso y se encontró un cambio en las medidas en la base y en la altura. Para tres cubos impresos se encontró que las medidas no correspondían con el diseño original, estas diferencias se presentaron principalmente en la zona de la base del cubo ensanchándose en promedio 33 mm en la base, que derivó en la disminución de la altura del cubo hasta 27.5 mm promedio, lo que implica una reducción de 8.3% del diseño original (Figura 58).



Figura 58. Deformación de la impresión debido al empuje de deposición de las capas.

El cambio es ocasionado por la presión de empuje que genera el extrusor sobre la superficie del alimento, conforme el alimento crece este va empujando las capas adyacentes del alimento desplazándose hacia los lados de la base, sin embargo, el alimento desplazado no solo se ubica en la base, también se encuentra en el contorno de la pieza conforme esta va aumentando en altura. Por ello la deformación es más visible en la base ya que se forma una pequeña curva. Para solucionar este problema se debe estabilizar un poco más la composición de la masa para que esta pueda adquirir una mayor dureza conforme pasa el tiempo, con esto, se lograría que dicha masa soporte el empuje y el posterior aplastamiento de las capas que se generan por las constantes deposiciones. El factor determinante que propiciaría el aplastamiento es la altura de capa, una altura de capa mayor requiere de menor número de capas para concluir una figura y por lo tanto menos deposiciones y menor empuje que ocasione aplastamiento, por el contrario, una capa menor requiere de mayor número de capas para concluir una pieza, lo que deriva en más aplastamiento, pero se gana resolución (Figura 59).

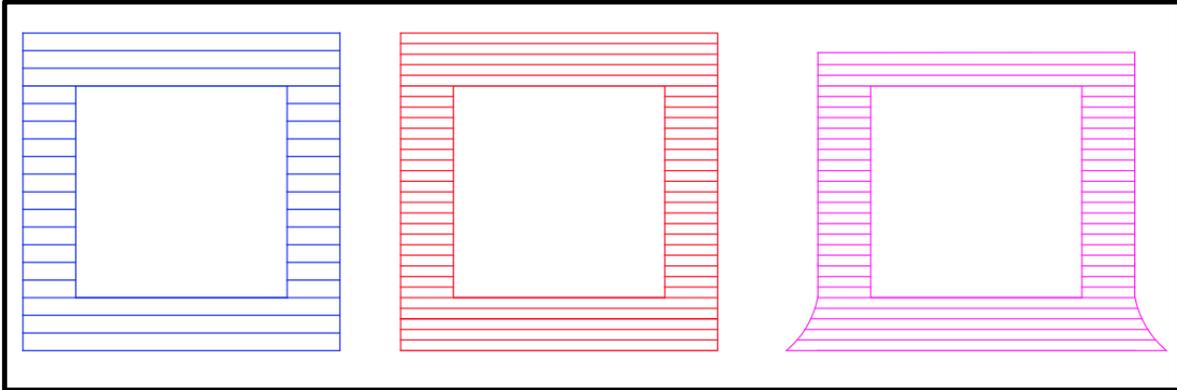


Figura 59. Representación de geometrías iguales con distintas alturas de capas, la de mayor número de capas tenderá a aplastarse más por la presión generada por las constantes deposiciones.

Otra medida que se realizó fue la anchura de extrusión de la capa superior las medidas de extrusión fueron establecidos en 2.2 mm y terminaron estando en 3 mm consecuencia del exceso de presión (Figura 60). A pesar de ello se decidió usar esos parámetros porque su aproximación con el diseño en computadora es similar.



Figura 60. Anchura de extrusión excesiva ocasionado por el exceso de presión, la imagen izquierda muestra un filamento grueso de 3 mm que se sale del parámetro y del lado derecho se representa el filamento establecido en los parámetros de 2.2 mm.

Realizada la calibración se procedió a realizar un diseño aún más complejo, que permitió comprobar el comportamiento del extrusor. En esta ocasión se realizó la impresión de diversas letras y posteriormente se frieron en aceite de girasol. Como se mencionó anteriormente uno de los problemas más recurrentes con la impresión es la superficie; ya que no se había logrado encontrar una buena superficie de impresión que resistiera la adhesividad de un alimento cuando es sometida a altas temperatura ya que todas las superficies que fueron probadas se adhirieron irremediamente al alimento. La solución momentánea que se planteado es usar vidrio o plástico film que envuelva una placa metálica sobre la cual se realizó la impresión, una vez concluida la impresión del alimento

el plástico film se retiró cuidadosamente de la placa y el alimento a su vez del plástico. Las letras que se muestran en la Figura 61 tienen unas medidas de 50 mm de diámetro aproximadamente y una altura de 12 mm.



Figura 61. Impresión de letras con los parámetros establecidos anteriormente.

En esta ocasión se lograron realizar unas letras de masa de maíz (71.4% agua, 28.6% harina), mucho más nítidas y estables, con los parámetros de la prueba 19, con ligeras modificaciones en la presión y la altura de capa, en la Tabla 13 se muestran estas ligeras modificaciones.

Por último, todas las letras impresas se frieron en aceite de maíz a 140 centígrados por 3 minutos y el resultado final se muestra en la Figura 62.



Figura 62. Freído de las letras elaboradas con impresión 3D con masa de maíz.

Tabla 13. Modificación de parámetros partiendo de la prueba 19

Ingrediente:	Masa de maíz blanco (28.6% harina, 71.4% agua)		
Superficie:	Placa de metal envuelta en plástico film		
Impresión:	Letras con 50 mm de diámetro, 12 mm altura		
Presión:	30 Lb/in ²		
Velocidad de extrusor:	60 RPM	Velocidad por defecto:	60 mm/s
Velocidad de primera capa:	45 mm/s	Velocidad de la capa superior:	60 mm/s
Velocidad de los perímetros:	60 mm/s	Altura de capa:	0.8 mm
Espesor de la extrusión:	2.4 mm	Relleno:	Lineal 50%
Relleno capa superior/inferior:	Lineal	Retracción:	Apagada
Capas:	Perímetro: 2	Suelo: 3	Techo: 3

Para finalizar la evaluación de los parámetros establecidos se realizó una nueva impresión, esta vez para la realización de una geometría aún más compleja. La geometría se trata de un pequeño barco de vapor denominado 3DBenchy, que es un diseño ampliamente usado para la calibración de impresoras tridimensionales ya que cuenta con zonas que permiten observar con facilidad los cambios ocasionados por los ajustes de los parámetros de impresión. El resultado de la impresión de esa geometría con los parámetros que ya se establecieron fue desastroso debido a varias circunstancias. La principal razón fue que el diseño elaborado requiere una anchura de extrusión menor a la establecida, es decir se tendría que hacer una boquilla con una salida de 1 mm de diámetro o menos. Otro factor fue el peso de la masa, como se puede apreciar en la Figura 63, el barco tiene una cabina de 4 pilares o paredes que sostienen el techo y una chimenea, conforme la impresión avanza el techo colapsó y además quebró la proa del barco.



Figura 63. (A) Diseñando un barco 3DBenchy con masa de maíz. (B) Prueba experimental de impresión de barco 3D; (C) El colapso es debido al peso y que no se usa la boquilla adecuada, la cual debe de ser de 1 mm.

Fuente: Flickr (2015b).

Para poder realizar la impresión del 3DBenchy de manera correcta se requiere o disminuir la boquilla por un diámetro menor, es decir 1 mm, o aumentar las dimensiones de la impresión, lo que significa aumentar el tamaño de la pieza un 50% de sus medidas actuales, las cuales fueron de 50 mm de largo 25 mm de ancho y altura 40 mm de altura. Sin embargo, el problema del peso de la masa seguiría estando presente y afectando principalmente a figuras de grandes dimensiones por lo que la única solución pertinente sería imprimir piezas pequeñas, de entre 10 y 40 mm. En esta experimentación dichos problemas se desprecian ya que no representaron un problema determinante en las impresiones subsecuentes con doble extrusión, pero es algo que posiblemente se valúa en otra investigación.

Una vez realizada la calibración, los ajustes y la prueba del primer extrusor, se procedió a introducir los mismos parámetros al segundo extrusor.

5.5 Impresión de doble extrusión

Para la impresión con doble extrusión se sigue el mismo procedimiento que la extrusión individual, se diseña el alimento, se configuran parámetros y se imprime.

5.5.1 Diseño y configuración de alimentos con dos extrusores

Para imprimir alimentos con doble extrusión se requirieron dos geometrías para cada ingrediente. El alimento para calibración para esta etapa de la experimentación se muestra en la Figura 64 es un cubo de 30 mm con un interior hueco en forma de cubo de 20 mm,

eso se hace de ese modo debido a que la segunda geometría, un cubo de 20 mm se introduce en el hueco.

El primer extrusor se encargará de imprimir la masa de maíz con las condiciones establecidas de la prueba 16, pero se reduce la presión a 25 lb/in², su geometría fue el cubo hueco de 30 mm. El segundo extrusor llevó a cabo la deposición de frijoles y fue configurado con los parámetros de la prueba 19, su geometría fue el cubo de 20 mm.

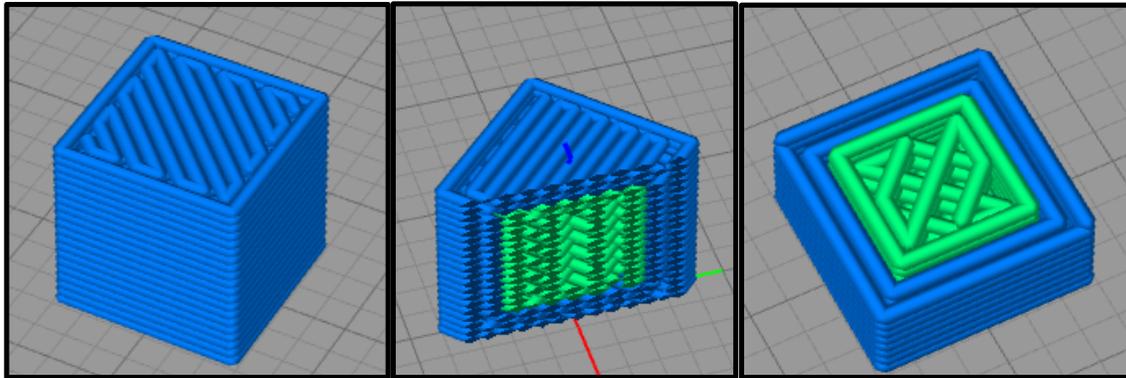


Figura 64. Cubo de 30 mm seccionado en distintos ángulos, su interior tiene otra geometría, se trata de otro cubo de 20 mm. Cada geometría puede configurarse de forma distinta.

El diseño se elabora en Fusión 360 2017 y se filetea en Simplify3D, desde este último software es donde se introducen las configuraciones para cada una de las geometrías. La presión se controla manualmente y se comparte el tanque de almacenamiento de presión con el primer extrusor.

5.5.2. Impresión de alimento con dos ingredientes

Para la superficie de impresión se seleccionó inicialmente papel aluminio debido a que posteriormente se calentara la impresión, sin embargo la masa no logró adherirse correctamente al papel, por lo que sustituimos la superficie por una bandeja de plástico para el corte de verduras, después de esto la estructuración de la impresión mejoró considerablemente y se puede notar en la Figura 65.



Figura 65. El comienzo de la impresión es problemático con superficies muy lisas, mejorando solo hasta cambiar la superficie.

Cuando la superficie se sustituyó, la impresión mejoró y el comportamiento de la impresión se realizó sin contratiempos. Finalizada la impresión del alimento se encontró con un nuevo inconveniente, la figura se encontró totalmente pegada a la bandeja de plástico, lo que impidió poder darle un tratamiento térmico con horno eléctrico o freído y mover la geometría no fue una opción por qué resultaría de la deformación de la pieza, por tal motivo se procedió a introducirla en el horno de microondas de 20 a 30 segundos para lograr la cocción parcial de la masa, lo que permitió solidificarla lo suficiente para poder manipularla sin deformar la impresión. Es importante no someter la pieza a más de 30 segundos de cocción en el horno de microondas debido a que el agua contenida en los frijoles en el interior de la impresión hierve con facilidad expandiendo la geometría y desecando los frijoles lo que deriva en su carbonización.

Ya que el horno de microondas permitía cocer rápidamente la masa se usó como primer método para poder retirar el alimento de la tabla para posteriormente colocarlo en una bandeja de metal e introducirla al horno eléctrico. Este método se usa temporalmente hasta encontrar una manera más eficiente de retirar las piezas. Con el horno eléctrico se terminó de cocer el cual se dejó a 450 grados por 3 minutos. Los resultados de la impresión, la cocción en horno de microondas y horno eléctrico se muestran en la Figura 66. La impresión también se cortó a la mitad para visualizar la cocción de la masa y el aspecto de los frijoles.

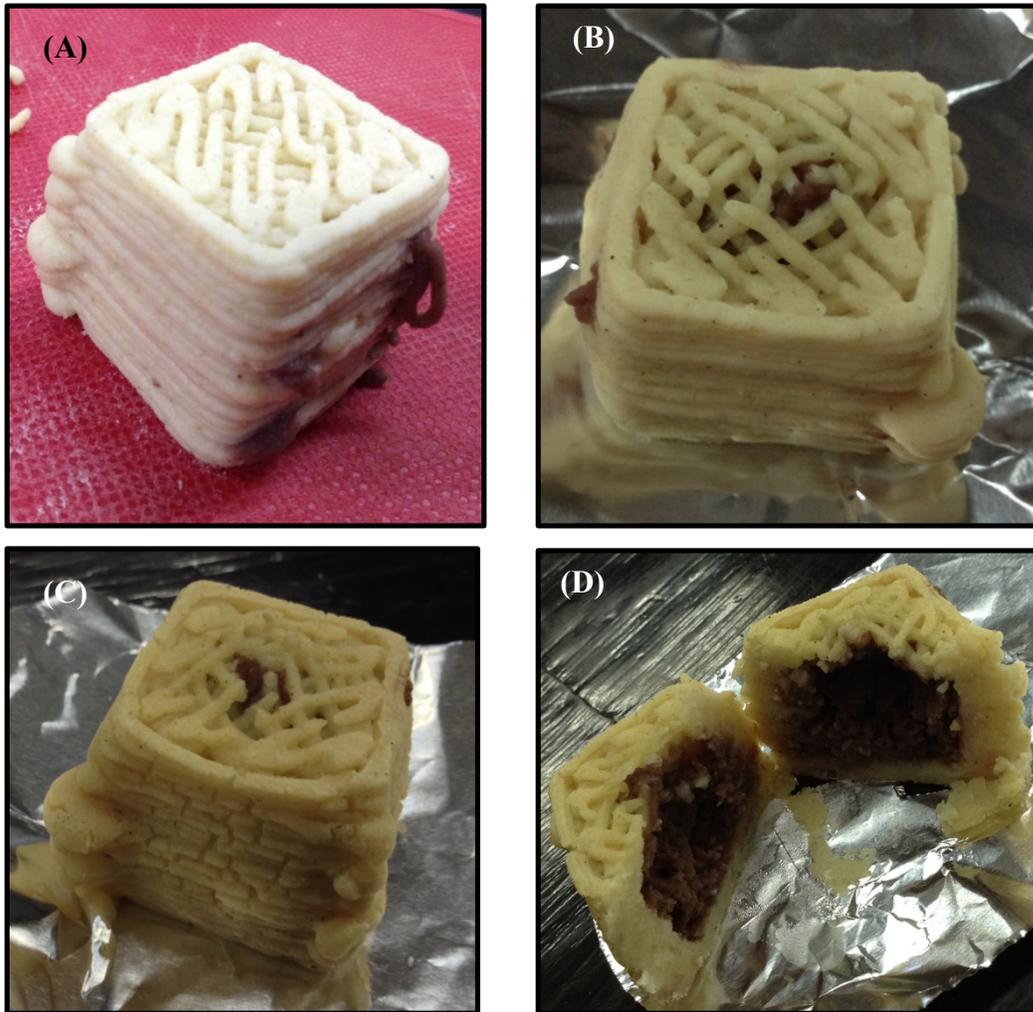


Figura 66. (A) Resultado de impresión con doble extrusión. (B) Calentamiento con horno de microondas por 30 segundos. (C) Calentamiento con horno eléctrico por 450 ° C durante 3 minutos. (D) Impresión cortada a la mitad.

Hay detalles en la impresión que no se pudieron eliminar, pero no se pudo determinar con exactitud cuál de todos los parámetros lo generó. Por ejemplo: la primera impresión mostró una especie burbujas o abultamientos en una de las esquinas del cubo, se supuso que se podía tratar de alguna configuración de la retracción del tornillo, pero después de muchas evaluaciones con el parámetro no se logró realizar algún cambio. Las burbujas solo le dieron un mal aspecto a la impresión pero no afectan la estructura final, además es una configuración que se puede eliminar pero no se encontró como mejorar, así que se trabajó con esas burbujas; ya que no afectaban la experimentación. Otro problema que se encontró fue respecto al material que quedaba adherido a la boquilla, cuando una pequeña cantidad de alimento se pega en los alrededores de la boquilla progresivamente eso comienza a

ocasionar más acumulaciones, cuando el alimento se seca entonces eso se vuelve un estorbo que impide o modifica la correcta impresión en determinadas áreas de la geometría.

Las medidas para esta geometría no se modificaron excesivamente con respecto al diseño en computadora ya que solo redujo su tamaño 1 mm y la base no tuvo una expansión notable, probablemente esto fue debido a que en esta ocasión el empuje de las deposiciones no fue tan constante, ya que la extrusión se dejó de realizar en el momento que se da el cambio de extrusores.

Para finalizar la prueba de los dos extrusores se realizó la impresión de otras geometrías que se asemejen a platillos tradicionales mexicanos que empleen estos dos ingredientes, como “sopes”, “tlacoyos” y “gorditas”. En la Figura 67 se muestran las geometrías diseñadas para cada uno de estos alimentos.

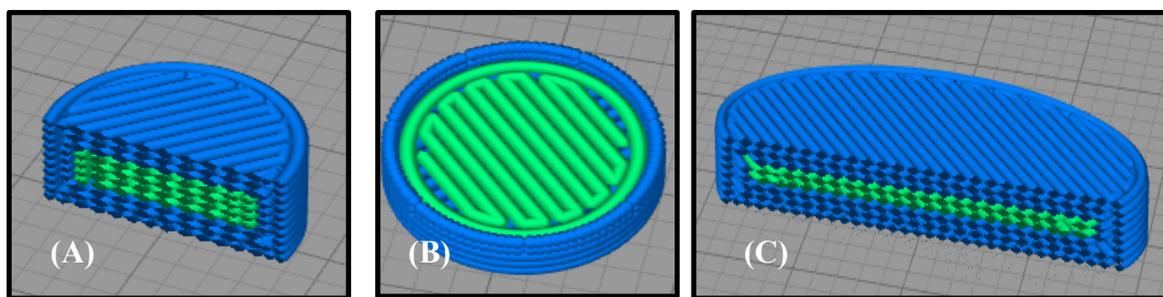


Figura 67. Otras de las geometrías que se emplean para los dos extrusores, con las que se intentó asemejar alimentos típicos mexicanos como: una “gordita” (A), un “sope” (B) y un “tlacoyo” (C). En azul se representa la deposición de masa y en verde la deposición de frijoles.

La siguiente geometría en imprimirse se trata de un cilindro corto de 15 mm de altura y un diámetro de 35 mm, con la cual se intenta asemejar una gordita, un alimento típico mexicano que consiste en masa de maíz aplastada en forma circular que contiene frijoles o carne en su interior y que se fríe en aceite; existen muchas diferencias entre el alimento impreso y el alimento típico mexicano, como tamaño y forma ya que este alimento usualmente tiene un tamaño que ronda los 100 mm de diámetro y además es más aplastado, sus medidas oscilan los 6 ó 10 mm de espesor. Posteriormente la impresión se sumerge en aceite de girasol caliente a 150° C por 5 minutos obteniendo el resultado observado en la Figura 68.

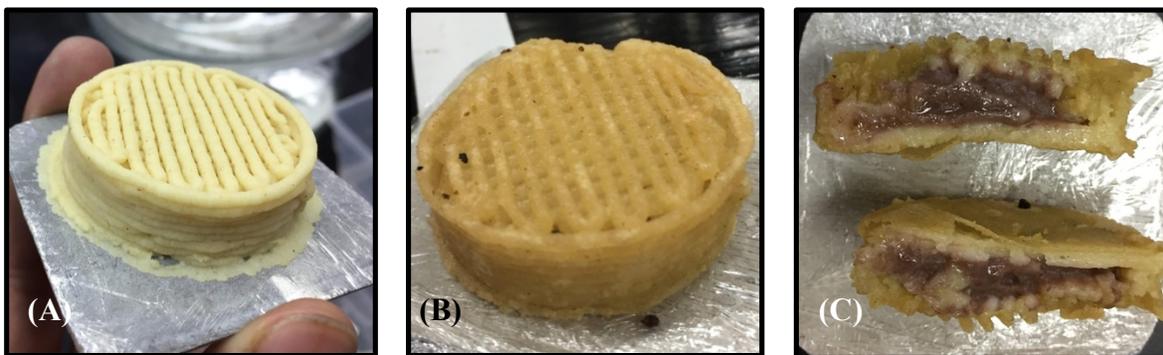


Figura 68. Impresión de un alimento que intenta asemejarse a un producto mexicano denominado coloquialmente “gordita”. El proceso comienza con la impresión del alimento (A), sigue el calentamiento en aceite(B) y se divide en dos para observar la cocción de la masa y los frijoles (C).

Otros alimentos elaborados fueron los “tlacoyos” que también se trata de masa aplasta en forma ovoidal con interior de frijoles o habas, pero que tradicionalmente se cocina en una plancha caliente, sin aceite. También se intentó imitar la geometría de un “tlacoyo” implementando medidas de 70 mm de largo, 40 mm de ancho y 15 mm de altura. No se pudo lograr el calentamiento en plancha debido que dicha impresión se realizó sobre una superficie de papel aluminio por lo que se tuvo que hornear en horno eléctrico a 250 °C durante 10 minutos, en la Figura 69 se puede observar el “tlacoyo” después de la impresión y de recibir el tratamiento en horno eléctrico, además se divide y se abre para ver su aspecto.

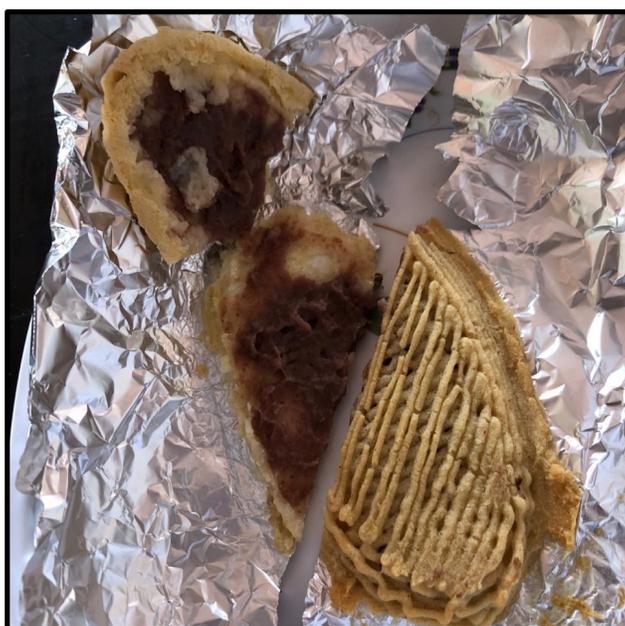


Figura 69. Alimento impreso asemejando un “tlacoyo”, el cual después de ser impreso se calentó en horno eléctrico a 250 °C por 10 minutos.

Finalmente se realiza la impresión de una geometría de un “sope” alimento muy similar a una pizza que sustituye la salsa de jitomate por frijoles y la masa de trigo por la de maíz, el calentamiento de este alimento también se realiza en plancha y las dimensiones del producto oscilan entre los 120 y los 50 mm de diámetro y su altura es de 3 o 5 mm. Las geometrías que se realizaron para este experimento fueron de 40 y 20 mm de diámetro y su altura fue de 30 mm. Los alimentos fueron calentados con horno eléctrico a 250 °C por 5 minutos usando una superficie de metal cubierta de papel film, como se muestra en la Figura 70. A dicha temperatura las geometrías tendieron a doblarse en parábola y secar los frijoles, por lo que el producto final no se parece a su semejante tradicional, probablemente si se aumenta la altura se pueda resolver el problema.

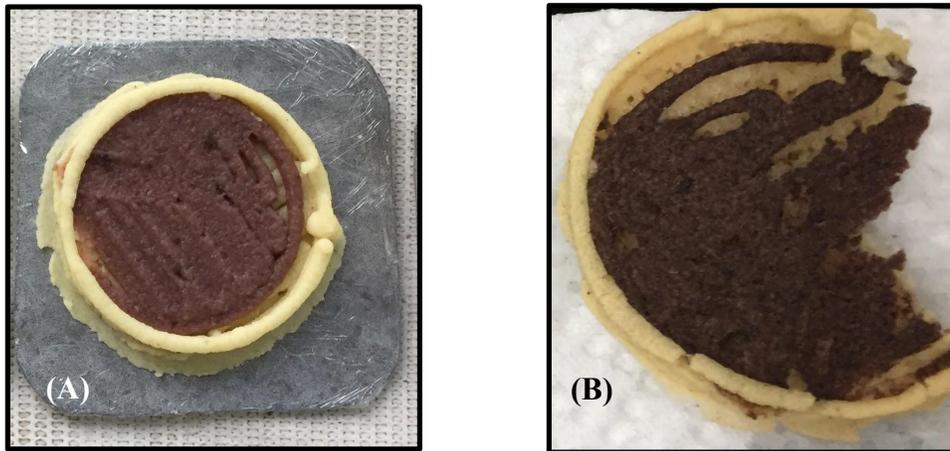


Figura 70. Impresión de “sope” (A), el cual posteriormente es calentado a 250°C en un horno eléctrico por 5 minutos (B).

5.6. Mejoramiento de alimentos impresos

Lograda la calibración de los parámetros, como la presión, el movimiento, y los diseños de los alimentos se puede pasar a la siguiente etapa, mejorar el alimento impreso. Los factores más importantes a mejorar en el alimento de tipo almidonado como el frijol o el maíz son principalmente tres, la apariencia, el sabor y la estructura. La apariencia se describe como el aspecto que puede tener el alimento ya sea al finalizar la impresión o posterior a un calentamiento, con respecto al diseño elaborado en computadora, estas situaciones en ocasiones suceden cuando un alimento almidonado se expone excesivamente al calor ocasionando que los alimentos pierdan agua generando contracciones, quiebres, esponjamientos o desecación. Un alimento por obvias razones debe tener buen sabor, el

sabor podría equipararse a alimentos elaborados de forma tradicional o incluso superarlos en sabor, en esta experimentación no se añadió otro ingrediente que no fuera agua y harina con la finalidad de tener una visión más exacta de lo que implica elaborar un alimento impreso y eliminar variables en la marcha. Finalmente cuando se hace referencia a la estructura, es cuando un alimento puede ser lo suficientemente estable al realizar una figura sin que decaiga por el peso, pero también implica generar alimentos con fácil transporte que puedan depositarse correctamente.

5.6.1 Evaluación de muestras finales

Debido a que el comportamiento de los frijoles resultó ser más estable y manejable de lo esperado, se omitirá una reformulación para los frijoles. Sin embargo, la masa de maíz si lo requirió debido a que se secó rápidamente antes y después del tratamiento térmico fragmentando la superficie de la masa y adelgazando los filamentos depositados, produciendo enormes aberturas en la geometría. Dichos factores son debido a que el agua evapora con facilidad, por lo que para evitarlo se agregó un ingrediente que permita retener la humedad lo suficiente para evitar que encoja la masa después del calentamiento. Los ingredientes seleccionados para la labor de retención de agua fueron dos, cada uno empleado de forma individual en cada formulación de masa. El primero fue el aditivo 1, debido a que permitiría texturizar más la masa en las deposiciones lo que evitaría los agrietamientos y las desecaciones antes y después del calentamiento del alimento impreso. El segundo ingrediente que se contempló fue el aditivo 2, ingrediente que se emplea para evitar la fuga de agua y mantenerla retenida durante mayor tiempo, también se usa por que mantiene la forma del alimento en caso de desecar el alimento.

Posteriormente las formulaciones fueron evaluadas, determinando las viscosidades siguiendo la metodología descrita en el apartado 4.5.

5.6.1.1. Evaluación física de la masa y el frijol

En la Figura 71 se observa que la adición de ingredientes no solo ayudó a la retención de agua, también mejoró la viscosidad aparente de los alimentos, en este caso se puede apreciar que la adición de aditivo 2 en la masa permitió disminuir la viscosidad aparente del alimento: por lo que el esfuerzo de cizallamiento fue menor, estando el pico de viscosidad en 41 KPas, comparado con las otras masas que se ubicaban sobre los 65 KPas. En este

caso los alimentos al ser fluidos pseudoplásticos requieren sobrepasar este pico para poder disminuir su viscosidad aparente y fluir con facilidad, por lo que la disminución del pico de viscosidad aparente en la aditivo 2 representó una ventaja para facilitar el desplazamiento del fluido y su posterior uniforme deposición.

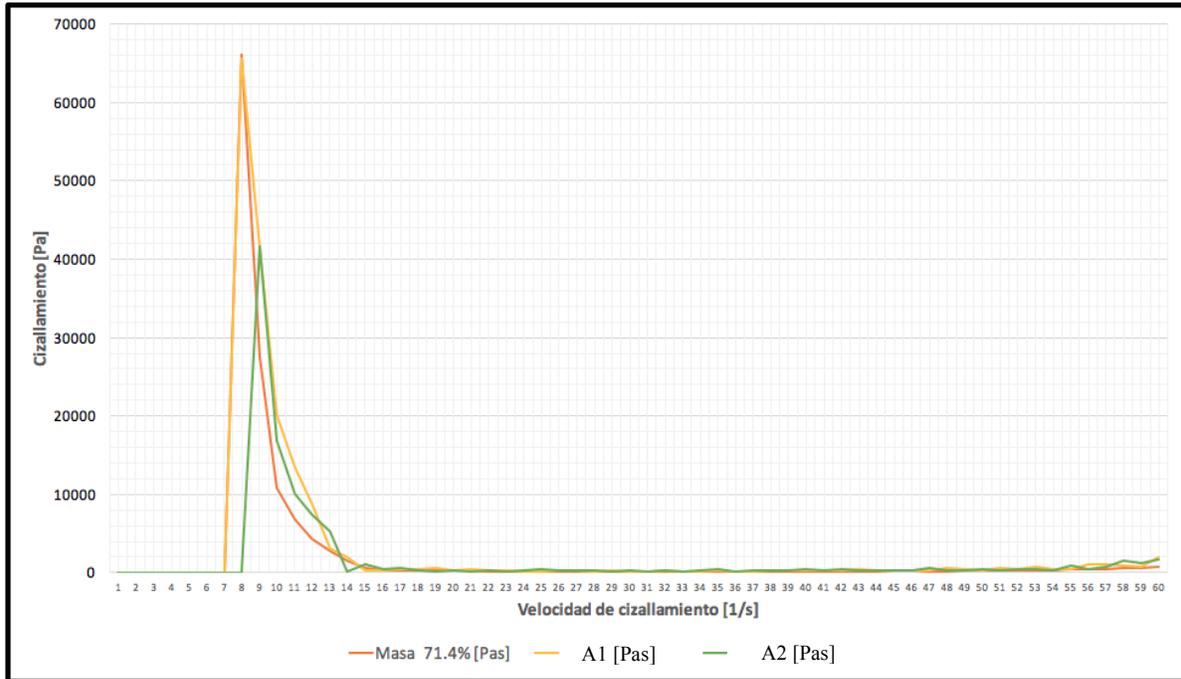


Figura 71. Viscosidad aparente de las distintas reformulaciones de masas en donde se compara la masa de 71.4% de agua de 65 KPas, con las masas con aditivo 1 de 65 KPas y la masa de aditivo 2 de 41 KPas.

En la Figura 72 también se puede apreciar la viscosidad aparente del frijol, en la que se observó un pico de viscosidad aparente muy por debajo de las viscosidades de la masa, con una viscosidad aparente cercana a 1.4 KPas, lo que explicaría la facilidad con la que fluyen a presiones relativamente bajas de 20 Lb/in², en comparación a la masa de maíz.

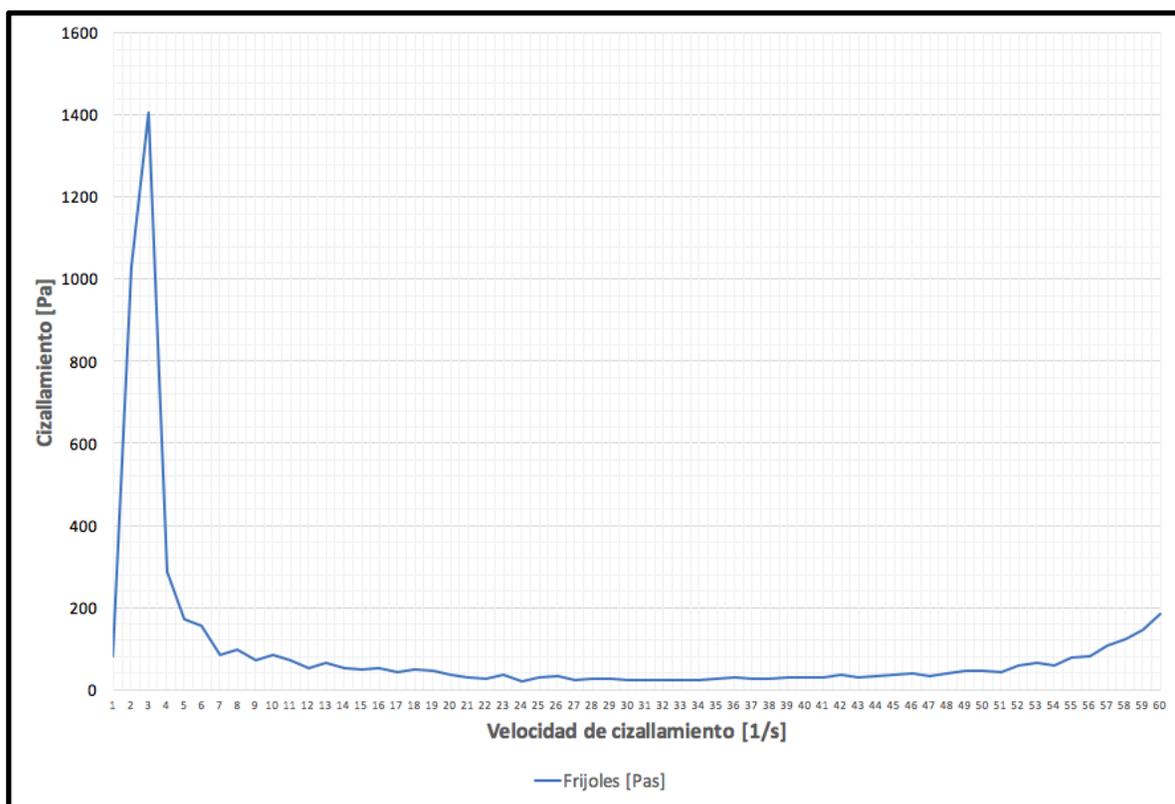


Figura 72. Viscosidad aparente de los frijoles donde se puede observar un pico de 1.4 KPas

Para concluir la reformulación se decidió solucionar el problema del sabor añadiendo a la masa sal, y se probó añadiendo 0.7% y 0.69% en las proporciones con aditivo 2 o aditivo 1. En la Tabla 14 se muestra porcentualmente la reformulación de cada una de las masas empleando como base la formulación 5 de la Tabla 9.

Tabla 14. Las reformulaciones propuestas ajustan la retención de agua y el sabor con la adición de sal.

Formulación	Harina de maíz (%)	Agua (%)	Sal (%)	Aditivo 1 (%)	Aditivo2 (%)
Masa/aditivo 2	27.78	69.44	0.69	2.08	-
Masa/aditivo 1	27.78	69.44	0.69	-	2.08
Masa/sal	28.37	70.92	0.70	-	-

Finalmente, en la Figura 73 se aprecia el resultado de la impresión de masa de maíz con aditivo 1 y 2 comparada con la masa sin añadidos. Las figuras impresas nuevamente se tratan de cubos de 20 mm con relleno de cubos de frijoles de 10 mm.



Figura 73. Resultados de extrusión de cubos de 20 mm con diversas formulaciones de masas, se puede apreciar un completo alisamiento de la masa con aditivo 2 añadida.

5.6.1.2. Evaluación sensorial del alimento impreso

En la Figura 74 se muestran los diferentes atributos que se evaluaron sensorialmente. Las formulaciones con aditivo 1 y 2 no presentaron diferencia significativa en la adhesividad (Figura 74 B), indicando que se tuvo una buena aceptación por las tres formulaciones de parte de los panelistas. Lo mismo sucedió con el atributo de dureza (Figura 74 D), lo que demuestra que la textura no se vio modificada por la adición de aditivos.

La mejor apariencia, se obtuvo con la masa que contenía solo, agua, harina y sal, pero también hubo una mejora en este atributo con la muestra con aditivo 2, comparada con la formulación con aditivo 1; el resto de los aspectos evaluados como sabor, y olor, fueron similares en las tres muestras (Figura 74). Esto significa que la adición de aditivo 1 ó 2, sensorialmente, no resulto relevante para mejorar la masa, lo mejor fue mantener la masa sin ningún aditivo. Sin embargo, si hubo una mejora en la disminución de la viscosidad aparente a causa del aditivo 2, demostrando que esto puede mejorar el manejo y transporte de la masa a través del sistema de impresión, como tuberías o boquillas; por lo que se concluye que la adición de aditivo 2 disminuye la viscosidad aparente del alimento sin una excesiva modificación sensorial del alimento en comparación con la muestra sin añadidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

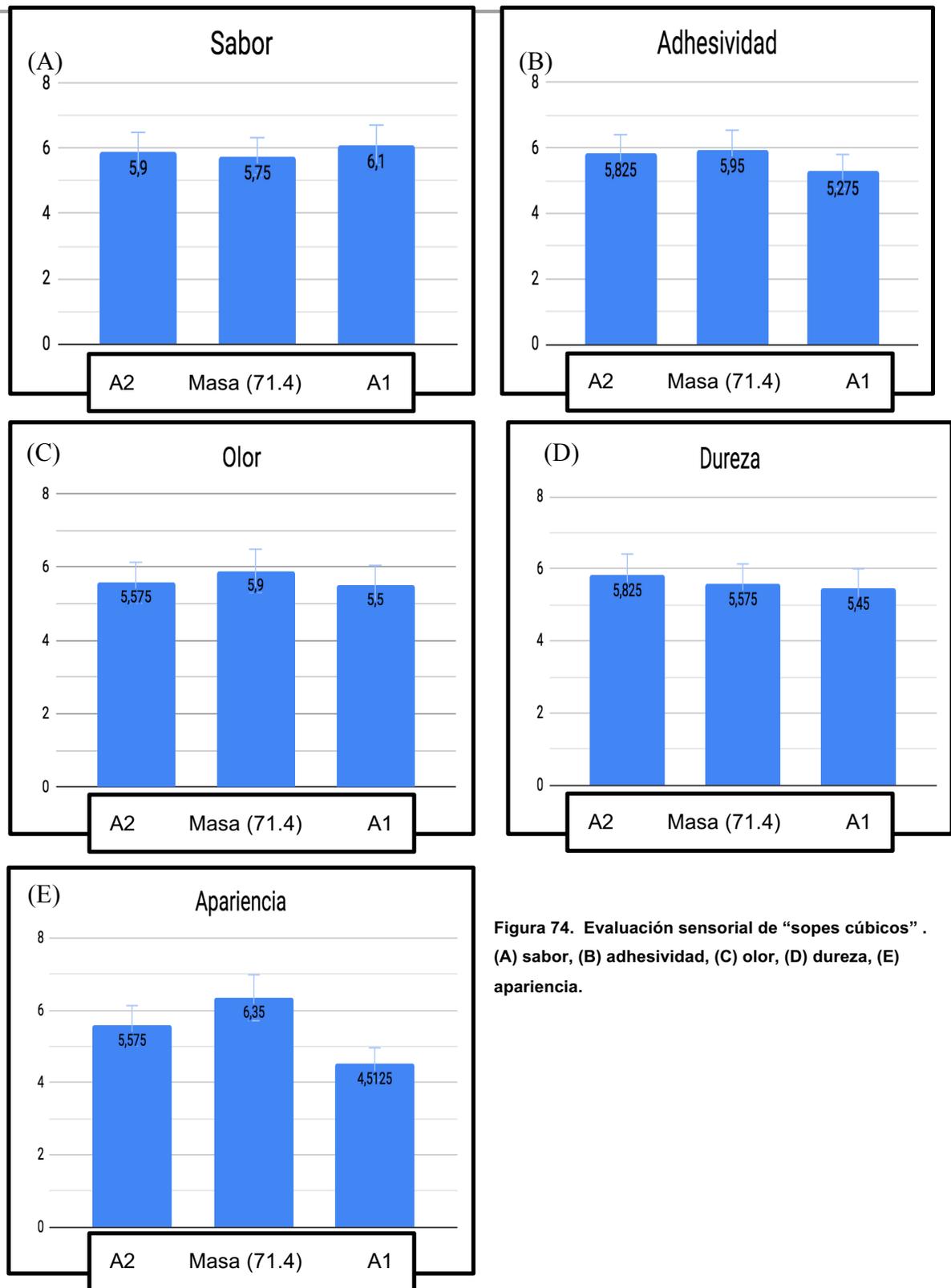


Figura 74. Evaluación sensorial de “sopes cúbicos” .
(A) sabor, (B) adhesividad, (C) olor, (D) dureza, (E) apariencia.

6. Conclusiones

Con base a los resultados anteriores se concluye lo siguiente:

1. El diseño y construcción de una impresora tridimensional Delta Kossel con dos extrusores independientes y permitió la impresión de un alimento típico mexicano por deposición, haciendo uso de programas especializados en el diseño mecánico. El uso de los softwares de diseño mecánico cada vez se hace más intuitivo facilitando mucho el diseño de piezas, así como la realización de simulaciones para la evaluación de los elementos diseñados.
2. Las formulaciones de harina de maíz con dos aditivos adicionados a distintas muestras permitieron contar con una masa con las características de viscosidad y estabilidad que permitió su aplicación en la impresora tridimensional.
3. Las características sensoriales como aroma, adhesividad, dureza, sabor tuvieron aceptación entre los jueces, principalmente de la muestra sin añadidos concluyendo que los alimentos impresos en 3D, presentaron atributos sensoriales adecuados y que el uso de aditivos no resulta relevante en la modificación de dichas características pero si para mejorar la viscosidad del alimento.
4. Los alimentos pseudoplásticos son los que tienen las características más óptimas para impresión debido a que estos poseen gran estabilidad en la deposición y fluidez en el transporte, dichas cualidades pueden ser mejoradas con aditivos, sin embargo, estos cambios no son perceptibles, por lo requieren de la reología para poder estudiar estos fenómenos.
5. La tecnología de impresión de alimentos está avanzando rápidamente y eso es debido a que es una tecnología nueva, aún se siguen descubriendo usos y afinando los ya hallados y presenta un gran potencial para el desarrollo automatizado de alimentos.

7. Recomendaciones

En función a los resultados obtenidos y para la continuación de este estudio se puede tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Evaluar diferentes matrices alimenticias dentro del equipo de impresión 3D, como son chocolates, pastas, geles, entre otros.
2. Rediseñar el equipo para adaptar un accesorio que permita tener alimentos cocidos después del proceso de impresión
3. Realizar un balance de costos que permita determinar el costo del equipo en el mercado y con ello competir con los ya existentes.
4. Evaluar en un proceso en serie la velocidad de producción del equipo.
5. Encontrar una superficie que permita retirar los alimentos sin que se mantengan pegados después del calentamiento, pero que además permita la correcta impresión.
6. Por tiempo y facilidad, en el proyecto se empleo impresión tridimensional de plástico para realizar los extrusores, sin embargo, es recomendable realizarlos en acero inoxidable o aluminio para evitar todas las complicaciones que conlleva el plástico, como debilidad, microorganismos, limitación de diseño, entre otros.

8. Referencias

1. Angelcadiz (2017). Taza. Fecha de consulta: 23 de marzo 2018. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:2231132>
2. Armstrong, K. (2016). Xoco chocolate 3D printer. Fecha de consulta: 9 agosto 2017. Disponible en: <https://3dprintingindustry.com/news/xoco-chocolate-3d-printer-79607/>
3. Ávila Chauvet L., Pedroza Cabrera F. J. (2013). RepRap y Rhinoceros en el diseño y construcción de equipo experimental. Revista Mexicana de análisis de la conducta, 39(3): 65-72
4. Bemillier JN, Paschall EF y Whistler RL, (1984). STARCH: Chemistry and Technology. 2nd ed San Diego: Academic Press. 432-456 pp.
5. Business insider. (2016). This Company is creating incredible 3D printing food you can eat. Fecha de consulta: 15 noviembre 2017. Disponible en: <http://www.businessinsider.com/3d-printed-food-foodini-2016-4/#kucsma-sees-foodini-as-the-future-of-the-smart-kitchen-5>
6. Candyfab, (2014). The CandyFab Project. Fecha de consulta: 3 marzo 2018. Disponible en: <https://candyfab.org/>
7. Centro Internacional de agricultura tropical, CIAT. (1984). Morfología de la planta de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Guía de estudio. CIAT. Cali, Colombia. pp. 49.
8. Cook´s science. (2017). In the field: Mark Oleynik, inventor of the Moley Robotic kitchen. Fecha de consulta: 14 noviembre 2017. Disponible en: <http://www.cooksscience.com/articles/interview/in-the-field-dr-mark-oleynik-inventor-of-the-moley-robotic-kitchen/>
9. Cowieson AJ. (2005). Factors that effect the nutritional value of maize for broilers Animal feed Sci Technol. 119: 293-305.

10. Creative Tools, (2015). #3DBenchy -The jolly 3D printing torture-test by CreativeTools.se. Fecha de consulta: 23 marzo 2018. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:763622>
11. Crump S., S. (1989). Apparatus and method for creating three-dimensional objects. US5121329A.
12. De'Angeli G. A y G De'Angelo, (2011). Larousse de la cocina mexicana. Editorial Larousse, México.
13. De Frutos A. (2016). Impresora 3D Up Plus2, análisis y opinión. Fecha de consulta: 14 abril 2017. Fecha de consulta: <https://www.blusens.com/analisis-impresora-3d-up-plus2/>
14. Du Toit G., Xin R.; Foong M., Lack G. (2016). Prevention of food allergy – Early dietary interventions, Department of Pediatric Allergy, King's College London and Guy's and St. Thomas'BHS Foundation Trust, London, UK.
15. Escofet Torres, R. (2013). Importancia de la gastronomía prehispánica en el México actual. Culinaria, revista virtual especializada en Gastronomía, Universidad Nacional del Estado de México, Publicación No. 6, julio/diciembre 2013, pp. 23-26
16. Espinel Velasco, J.C. (2016). Procesos digitales y sistemas de prototipado rápido aditivos aplicados a las creación escultórica de pequeño formato y relieves, tesis doctoral, Facultad de bellas artes, Universidad Complutense de Madrid, España.
17. Everett M. R. (1983). Diffusion of innovations. 866 Third Avenue, New York, N.Y., United States of America, The Free Press.
18. Experimenta. (2014). ChefJet de 3D Systems: la impresora que hace pasteles de azúcar. Fecha de consulta: 3 noviembre 2014. Disponible en: <https://www.experimenta.es/noticias/industrial/chef-jet-4181/>
19. FAO (1993). El maíz en la nutrición humana. Alimentación y nutrición, no. 25. Fecha de consulta: 30 noviembre 2018. Disponible en: <http://www.fao.org/3/t0395s/T0395S02.htm#Estructura%20del%20grano%20de%20maiz>
20. FAO (2016). Legumbres, Semilla nutritivas para un futuro sostenible. Fecha de consulta: 14 noviembre 2018. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5528s.pdf>

21. Faroni, D. L. R. (1993). Manual de manejo de postcosecha de granos a nivel rural, Capítulo 1, Los granos y su calidad. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.
22. Fleming M. (2012). George W. Hart's beautiful 3D printed sculptures. 3D printer exploring the world of 3D printing. Fecha de consulta: 23 de noviembre 2018. Disponible en: <https://www.3dprinter.net/george-hart-3d-centerpiece-sculptures>
23. Flickr (a) (2015). 3Dbenchy.com (Figura 1, derecha) Fecha de consulta: 24 julio 2018. Disponible en: <https://www.flickr.com/photos/3dbenchy/16727080893/in/photostream/>
24. Flickr (b), (2015). 3Dbenchy.com (Figura 62, C) Fecha de consulta: 24 julio 2018. Disponible en: <https://www.flickr.com/photos/3dbenchy/17062390306/>
25. Forbes México. (2017). 2017 será grande para la impresión 3D en México: Stratasys Fecha de consulta: 3 septiembre 2017. Disponible en: <https://www.forbes.com.mx/2017-sera-grande-la-impresion-3d-mexico-stratasys/>
26. Galeana S. (2016). Lleve sus ricos tamales. Fecha de consulta: 12 febrero 2019. Disponible en: <https://www.maspormas.com/ciudad/lleve-sus-ricos-tamales/>
27. Gershenfeld N. (2012). How to make almost anything, The digital fabrication revolution. Foreign affairs. November/december 2012. Volumen 91, número 6.
28. Gibson I., Rosen D., Stucker B., (2010). Additive manufacturing technologies. Editorial Springer. 19-42 pp.
29. Godoi F. C., Prakash, S.; Bhandari, B. R. (2016). 3d Printing Technologies Applied for Food Design: Status and Prospects. Journal of food engineering. School of Agriculture and Food Sciences, The University of Queensland, Brisbane, 6 Queensland 4072, Australia.

30. Grames E. (2018). Fused Deposition Modelling (FDM) - 3D printing simply explained. Fecha de consulta: 15 diciembre 2018. Disponible en: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
31. Herrera-Saldana RE, Huber JT y Poore MH. (1990). Dry matter, crude protein and starch degradability of five cereal grains. J Dairy Sci. 73: 2386-2393
32. Hosene RC y Faubion JM. (1992). Physical properties of cereal grains. In: Sauer DB editor. Storage of cereal grains and their products. St. Paul MN, USA: Am. assoc. Cereal chem. 1-38 pp.
33. Hull, C. (1984). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. US4575330A.
34. ICorps (2017). Entrevistas realizadas en el ICorps 2017, del nodo binacional de la UNAM.
35. Industria Alimenticia (2016). Tamales de todos los colores para exportar a Estados Unidos. Fecha de consulta: 12 febrero 2019. Disponible en: <https://www.industriaalimenticia.com/articles/88135-tamales-de-todos-los-colores-para-exportar-a-estados-unidos>
36. Ingenio T. (2015). Manual Slicer, G-code generator for 3D. Fecha de consulta: 1 junio 2018. Disponible en: https://www.edu.xunta.gal/centros/cfrpontevedra/aulavirtual2/pluginfile.php/15305/mod_page/content/3/Manual%20de%20configuraci%C3%B3n%20de%20Slic3r%20por%20Ingenio%20Triana.pdf
37. Instructables. (2015). Pinya3: a 3D food printer platform. Fecha de consulta: 16 enero 2017. Disponible en: <http://www.instructables.com/id/Pinya3-a-3d-food-printer-platform/>
38. Kevinp, (2018). 5 preguntas sobre impresión 3D de contenedores de alimentos. Beet Talks Fecha de consulta: 4 de diciembre 2018. Disponible en: <https://beets3d.com/blog/2018/05/08/3dp-food-container/>
39. Kickstarter (2017). Dorna: fast, powerful and precise robotic arm. Fecha de consulta: 15 noviembre 2017. Disponible en: <https://www.kickstarter.com/projects/775197166/dorna-fast-powerful-and-precise-robotic-arm?ref=ksrfb>

40. Kim S. (2015). Rendering complex colour inside 3D printed foods. Food Technology. Massey University, Palmerston North New Zealand.
41. Kruth, J.P., Froyen L., Van Vaerenbergh J., Mercelis P., Rombouts M., Lauwers B. (2003). Selective laser melting of iron-based powder. Journal of materials processing technology. Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Bélgica.
42. León R., A.; I. Angulo; M. Jaramillo; F Requena y H. Calabrasc. (2011). Caracterización química y valor nutricional de granos de leguminosas tropicales para la alimentación, FONAIAP-CENIAP, Macaray.
43. Lipson H., Kurman M. (2013). Fabricated: the new world de 3D printing. Editorial Wiley. 10-68 pp.
44. Lipton, J. I. (2017). Printable food: the technology and its application in human health. MIT, Cambridge, MA, USA.
45. Locker A., (2017)12 Vital Facts About Food Safe 3D Printing. Fecha de consulta: 15 septiembre 2018. Disponible en: <https://all3dp.com/1/food-safe-3d-printing-abs-pla-food-safe-filament/>
46. Logan J. (2015). How to choose between cartesian and Delta 3D printers. Fecha de consulta: 3 marzo 2018. Disponible en: <https://www.fargo3dprinting.com/choose-cartesian-delta-3d-printers/>
47. López J. (2015). 3D printing food: the sustainable future. Master thesis, Environmental Management and Cleaner Production. Kaunas University of Technology Institute of Environmental Engineering, Kaunas Lituania.
48. Loran Juárez, R. (2013). Evaluación de la calidad nutrimental de la harina de frijol negro (Phaseolus vulgaris) adicionada con calcio y hierro, Facultad de química, Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF.
49. LSMiniatures, (2015). Albert Einstein Bust. Fecha de consulta 23 marzo 2018. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:966908>

50. Méndez A. O. (2015). Optimización de la enseñanza de manufactura mediante la implementación de tecnologías de impresión tridimensional. Facultad de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
51. Mironov V. Boland T. Trusk T. Markwald RR. (2003). Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering.
52. NASA (2013). 3D printing: Food in space. Fecha de consulta: 23 junio 2017. Disponible en: https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/home/feature_3d_food.html
53. Pagace F. (2017). Print Material, "Make Your Own Ceramic 3D Printer". Fecha de consulta: 2 de noviembre 2017. Disponible en: <https://plus.google.com/111285192552014262407>
54. Palazuelos S., (2010). México, una herencia de sabores, Breve historia de sabor. Grijalbo, Fotografía a cargo de Ignacio Urquiza.
55. Palermo E. (2013). What is Laminated Object Manufacturing?. Fecha de consulta: 22 abril 2018. Disponible en: <https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>
56. Pérez Xochipa I., (2009). Estudio de la variabilidad genética de maíces criollos y su correlación con el contenido y estructura de las zeinas. Escuela Nacional de ciencias biológicas, sección de posgrado e investigación, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
57. Plewa K., (2018). 3D printing materials: which metal should you choose for your project?, Sculpteo (figure) Fecha de consulta: 16 de Noviembre, 2018. Disponible en: <https://www.sculpteo.com/blog/2018/07/23/3d-printing-materials-which-metal-should-you-choose-for-your-project/>
58. PrusaPrinters (2017). Hi l´m calculator. Fecha de consulta: 1 de agosto 2017. Disponible en: <https://www.prusaprinters.org/calculator/>
59. RepRap (2015). Kossel. Fecha de consulta: 20 enero 2017. Disponible en: <https://reprap.org/wiki/Kossel>
60. RepRap (2016). Delta geometry. Fecha de consulta: 30 julio 2018. Disponible en: https://reprap.org/wiki/Delta_geometry
61. RepRap (2012). Rostock mini. Fecha de consulta: 20 enero 2017. Disponible en: http://reprap.org/wiki/Rostock_mini.

62. Reichelt (2018). Procusini Food Printer: Food from the 3D printer. Fecha de consulta. 3 diciembre 2018. Disponible en: <https://www.reichelt.com/magazin/en/2018/10/11/procusini-food-printer/>
63. Rodríguez V. M. (2012). Respuesta de diferentes variedades comerciales de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) al ataque de gorgojo pinto del frijol *Zabrotes subfasciatus* y la relación con su contenido de factores antinutrimientales y composición química. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, Edo. de México
64. Ruíz, A. (2017). Comunicación personal, con gerente de INKY, 10 de octubre, entrevista personal.
65. Re3D (2014). Firmware Update Guide (figura). Fecha de consulta: 14 abril 2018. Disponible en: [http://wiki.re3d.org/index.php/Firmware Update Guide](http://wiki.re3d.org/index.php/Firmware_Update_Guide)
66. Sebková M. (2014) Progressive technologies in furniture design. Mendel University in Brno, Faculty of Forestry and Wood technology, Department on furniture, Design and habitat, Republica Checa.
67. Sculpteo, (2018). The state of 3D printing, the data you need to understand the 3D printing world and build you 3D printing strategy. Fecha de consulta: 3 noviembre 2018. Disponible en: [https://www.sculpteo.com/media/ebook/State of 3DP 2018.pdf](https://www.sculpteo.com/media/ebook/State_of_3DP_2018.pdf)
68. Serrano L. J. (2015). Plásticos prefabricados para la construcción de vivienda de interés social. Facultad de arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
69. Shariate M., Khosravi H., Fazl-Ersi E. (2016). Safe collaboration of humans and SCARA robots. Mechanical Engineering Department Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
70. Sher, D., X. Tutó, (2015). Review of 3D Food Printing. *Raco Revistes Catalanes amb Accés Obert. Temes de Disseny*, Número 31, pp. 104-17.

71. Smith P. (2016). PancakeBot 3D Pancake Printer Price & Review. Fecha de consulta: 1 marzo 2018. Disponible en: <https://3dprintmanual.com/pancakebot-3d-pancake-printer/>
72. Soury A., Déchaseaux L., FLye H., Batigne T., Berna A.. (2015). µdelta assembly instructions rev 1.1, eMotion Tech, Francia.
73. Streams K. (2014). Colorful Geometric Sugar Candies Made With a ChefJet 3D (figura) Printer By 3D Systems. Fecha de consulta: 27 diciembre 2017. Disponible en: <https://laughingsquid.com/colorful-geometric-sugar-candies-made-with-a-chefjet-3d-printer-by-3d-systems/>
74. Sun J, Peng Z., Zhou W., Y.H.Fuh J., Soon Hong G., Chiu A. (2015).A Review on 3D Printing for Customized Food Fabrication, Keio-NUS CUTE Center, National University of Singapore, Singapore (a)
75. Sun J. , Zhou W., Huang D., Y.H.Fuh J., Soon Hong G.. (2015). An overview of 3D printing technologies for food fabrication. Keio-NUS CUTE Center, National University of Singapore, Singapore (b).
76. Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., Lin, L.-y (2017). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control, Journal of Food Engineering. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028.
77. Terence NG, (2014). [Infographic] Will we all own a 3D printer by 2040. Fecha de consulta: 23 agosto 2018. Disponible en: <https://e27.co/infographic-will-we-all-own-a-3d-printer-by-2040/>
78. The Spoon. (2017). Flatev extends expert tortilla making to masses. Fecha de consulta: 3 noviembre 2017. Disponible en: <http://thespoon.tech/flatev-extends-expert-tortilla-making-to-the-masses/>
79. Venkat D. K., (2008). Application of reverse engineering and rapid prototyping to casting, Master of science in mechanical engineering, Cleveland State University, USA.
80. Ventura, V. (2014). ¿Qué es G-code?. Fecha de consulta: 23 septiembre 2017. Disponible en: <https://polaridad.es/que-es-g-code/>

81. Wallenius, V. (2014). The effects of Additive Manufacturing Techniques to Retail Market in the Next Decade, European Business Administration, Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, Helsinki.
82. Wang L., Zhang M., Bhandari B., Yang C. (2017). Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, China.
83. Waterman, P. (2010). Additive manufacturing 101, Defining your options for rapid manufacturing. Digital engineering (figura). Fecha de consulta: 17 diciembre 2018. Disponible en: <https://www.digitalengineering247.com/article/additive-manufacturing-101/>
84. Windell O. (2009). The CandyFab 6000. Fecha de consulta: 7 diciembre 2018. Disponible en: <https://www.evilmadscientist.com/2009/the-candyfab-6000/>
85. Wohlers Report (2015). 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates.
86. Wohlers Report (2016). 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates.
87. Yusuf B. (2015). 3D Printer explained: Delta, Cartesian, Polar, Scara. Fecha de consulta: 23 noviembre 2017. Disponible en: <https://all3dp.com/know-your-fdm-3d-printers-cartesian-delta-polar-and-scara/>
88. Zamora G. D.A. (2015). Diseño y construcción de una Bio impresora 3D, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Mecánica-Mecatrónica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.
89. 3D CAD Portal, (2012). El proceso de impresión 3D tiene algunos puntos a considerar en su operación. Fecha de consulta 20 de Octubre 2018. Disponible en: <http://www.3dcadportal.com/el-proceso-de-impresion3d-tiene-algunos-puntos-a-considerar-en-su-operacion.html>
90. 3ders (a), (2014). German 3D printed Smoothfood actually looks and tastes pretty good

- (figure). Fecha de consulta: 5 octubre 2018. Disponible en: <http://www.3ders.org/articles/20140530-german-3d-printed-smoothfood-actually-looks-and-tastes-pretty-good.html>
91. 3ders (b) (2014). ORD Solutions launches fully assembled RoVa-Paste/Food 3D printer for under \$1000CAD. Fecha de consulta: 2 marzo 2018. Disponible en: <https://www.3ders.org/articles/20140910-ord-solutions-launches-fully-assembled-rova-paste-food-3d-printer.html>
92. 3ders (c) (2014). 3D printing gets sweeter with 3D Systems' ChefJet & full-color ChefJet Pro 3D printers. Fecha de consulta: 1 marzo 2018. Disponible en: <http://www.3ders.org/articles/20140107-3d-printing-gets-sweeter-with-3d-systems-chefjet-full-color-chefjet-pro-3d-printers.html>
93. 3ders (d) (2014). \$1,000 Foodini 3D food printer hits Kickstarter, ships in Jan 2015. Fecha de consulta: 27 febrero 2018. Disponible en: <http://www.3ders.org/articles/20140326-foodini-3d-food-printer-hits-kickstarter-ships-in-jan-2015.html>
94. 3ders (a) (2015). Choc Edge unveils new Choc Creator 2.0 Plus chocolate 3D printer. Fecha de consulta: 3 octubre 2017. Disponible en: <https://www.3ders.org/articles/20150731-choc-edge-unveils-new-choc-creator-2-plus-chocolate-3d-printer.html>
95. 3ders (b) (2015). Focus, multi-material and portable 3D printer launches on Kickstarter. Fecha de consulta: 2 marzo 2018. Disponible en: <https://www.3ders.org/articles/20150521-focus-multi-material-and-portable-3d-printer-launches-on-kickstarter.html>
96. 3ders (c) (2015). Singapore student builds a 3d printer that prints cookies, mashed potato & chocolate (figura). fecha de consulta: 3 octubre 2018. Disponible en: <https://www.3ders.org/articles/20150319-singapore-student-builds-a-3d-food-printer-that-prints-cookies-mashed-potato-chocolate.html>

97. 3ders (d) (2015). Wasp Unveils new ceramic LDM extruder for high precision ceramics 3D printing. Fecha de consulta: 26 de noviembre 2017. Disponible en: <http://www.3ders.org/articles/20150721-wasp-unveils-new-ceramic-ldm-extruder-for-high-precision-ceramics-3d-printing.html>
98. 3ders (e) (2015). 3ders Monday warm-up: the top 3D food printers that will feed the future. Fecha de consulta: 15 julio 2018. Disponible en: <http://www.3ders.org/articles/20151102-3ders-monday-warm-up-the-top-3d-food-printers-that-will-feed-the-future.html>
99. 3ders (f) (2015). 3D Systems opens 3DS Culinary Lab to educate and advance 3D printed food technology. Fecha de consulta: 2 abril 2018. Disponible en: <http://www.3ders.org/articles/20151028-3d-systems-3ds-culinary-lab-to-educate-advance-3d-printed-food.html>
100. 3ders (a) (2016). FoodJet expands production capacity to 3D print whole meals for the elderly (figura). Fecha de consulta: 5 octubre 2018. Disponible en: <http://www.3ders.org/articles/20160215-foodjet-expands-production-capacity-to-3d-print-whole-meals-for-the-elderly.html>
101. 3ders (b) (2016). 'Message in a Cake' paste extruder 3D prints hidden images right into your dessert. Fecha de consulta: 17 febrero 2018. Disponible en: <http://www.3ders.org/articles/20160209-message-in-a-cake-paste-extruder-3d-prints-hidden-images-right-into-your-dessert.html>
102. 3ders (2017). Celiacs rejoice: WASP is developing a gluten free 3D printer. Fecha de consulta: 27 marzo 2018. Disponible en: <http://www.3ders.org/articles/20170228-celiacs-rejoice-wasp-is-developing-a-gluten-free-food-3d-printer.html>
103. 3DigitalCooks (2015). Fecha de consulta: 21 diciembre 2017. Disponible en: <http://3digitalcooks.com/>
104. 3Dprinterpower (2018). Do you know these four FFF 3D printer styles?. Fecha de consulta: 4 octubre 2018. Disponible en: <http://3dprinterpower.com/four-fff-3d-printer-styles/>

105. 3D printers Hanoi (2016). 3D delta printer improvements (X/Y calibration, temperature). Fecha de consulta 2 agosto 2018. Disponible en: <http://mayin3d.xyz/en/news/print/3d-printing-experiences/3D-delta-printer-improvements-XY-calibration-temperature-44/>
106. 3D printing industry (2015). Miguel Valenzuela spills the batter on pancakebot's food printing technology. Fecha de consulta: 10 noviembre 2017. Disponible en: <https://3dprintingindustry.com/news/miguel-valenzuela-spills-the-batter-on-pancakebots-food-printing-technology-45048/>