

IMPRESORA 3D DE MATRICES EXTRACELULARES

**SERGIO ANDRÉS CADENA ZAIA
SAMUEL HINCAPIÉ MONSALVE**

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros biomédicos

Yesid de Jesús Montoya Góez

M. Sc. Materiales y procesos



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
INGENIERÍA BIOMÉDICA
ENVIGADO
2015**

A Dios y a nuestros padres.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director, Yesid, por su incondicional apoyo.

A Edwin, por su ayuda y compañía durante el desarrollo del proyecto.

A todos los profesores que nos brindaron el conocimiento necesario para completar este trabajo.

A todos nuestros compañeros que de alguna manera dieron un aporte al proyecto.

GRACIAS TOTALES.

CONTENIDO

| | pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| 1. PRELIMINARES | 14 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 14 |
| 1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO | 14 |
| 1.2.1. Objetivo General | 14 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos..... | 14 |
| 1.3. Marco de referencia | 14 |
| 1.3.1. Generalidades sobre matrices extracelulares..... | 14 |
| 1.3.1.1. Matrices extracelulares naturales | 14 |
| 1.3.1.2. Matrices extracelulares artificiales | 15 |
| 1.3.2. Procesos de manufactura de matrices artificiales | 16 |
| 1.3.2.1. Técnicas tradicionales..... | 16 |
| 1.3.2.2. Técnicas de prototipado rápido..... | 17 |
| 1.3.3. Técnica CAD/CAM para impresión 3D..... | 18 |
| 1.3.4. Biocompatibilidad..... | 19 |
| 1.3.4.1. Biomateriales..... | 20 |
| 1.3.5. Diseño de producto..... | 21 |
| 1.3.6. Selección de variables..... | 23 |
| 1.3.6.1. Análisis dimensional de un extrusor | 25 |
| 1.3.6.2. Modelo de placa plana | 26 |
| 1.3.6.3. Modelo de las características del extrusor y la boquilla | 28 |

| | | |
|----------|--|----|
| 1.3.7. | Selección del polímero | 29 |
| 1.3.7.1. | Materiales poliméricos..... | 31 |
| 1.3.7.2. | Polímeros para andamios 3D de tejido..... | 32 |
| 1.3.8. | Selección de las Técnicas de caracterización | 34 |
| 1.3.8.1. | Viscosidad | 35 |
| 1.3.8.2. | Tensión superficial | 43 |
| 1.3.8.3. | Melt Flow Index (MFI)..... | 51 |
| 1.3.8.4. | Transiciones de fase y Transición vítrea | 51 |
| 1.3.8.5. | Composición | 52 |
| 1.3.8.6. | Peso molecular:..... | 52 |
| 2. | METODOLOGÍA | 56 |
| 2.1. | Selección de variables | 56 |
| 2.2. | Selección del polímero | 56 |
| 2.3. | Selección de técnicas de caracterización | 56 |
| 2.4. | Caracterización del polímero | 56 |
| 2.5. | Diseño de concepto..... | 59 |
| 2.6. | Elementos de Diseño de detalle | 59 |
| 2.7. | Construcción del boceto mediante de herramientas CAD | 59 |
| 3. | DESARROLLO DEL PROYECTO..... | 60 |
| 3.1. | RESULTADOS DE LAS TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN | 60 |
| 3.1.1. | Viscosidad: | 60 |
| 3.1.2. | Tensión superficial | 65 |
| 3.1.3. | Transiciones de fase..... | 66 |

| | | |
|--------|--|--------------------------------------|
| 3.1.4. | Peso molecular | 68 |
| 3.2. | DISEÑO DE CONCEPTO | 70 |
| 3.2.1. | Lista de necesidades | 70 |
| 3.2.2. | Especificaciones del producto | 71 |
| 3.2.3. | Diagrama de caja negra..... | 73 |
| 3.2.4. | Diagrama de funciones | 74 |
| 3.2.5. | Alternativas de solución | 75 |
| 3.2.6. | Matriz Morfológica..... | 91 |
| 3.2.7. | Conceptos generados..... | ¡Error! Marcador no definido. |
| 3.2.8. | Selección de concepto..... | 97 |
| 3.3. | ELEMENTOS DE DISEÑO DE DETALLE..... | 99 |
| 3.4. | CONSTRUCCIÓN DEL BOCETO MEDIANTE HERRAMIENTAS CAD..... | 101 |
| 3.4.1. | Sistema de extrusión | 101 |
| 3.4.2. | Sistema de ejes X y Y..... | 102 |
| 3.4.3. | Sistema de eje Z..... | 103 |
| 3.4.4. | Estructura de soporte..... | 104 |
| 3.4.5. | Estructura externa..... | 105 |
| 3.4.6. | Accesorios..... | 106 |
| 3.4.7. | Modelo finalizado | 106 |
| 3.5.8. | Resultados de montaje experimental del sistema de extrusión..... | 108 |
| 4. | CONCLUSIONES | 109 |
| 5. | CONSIDERACIONES PARA TRABAJO FUTURO..... | 111 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 112 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| <i>Tabla 1. Metodologías de diseño de producto (Cuberos, s.f.)</i> | 21 |
| <i>Tabla 2. Ventajas y desventajas de los biomateriales (PESCADOR, 2012)</i> | 30 |
| <i>Tabla 3. Viscosidad y densidad medida con el método del cono (dos conos) y diferentes concentraciones.</i> | 63 |
| <i>Tabla 4. Tensión superficial de diferentes muestras de PVA a diferente concentración.</i> | 66 |
| <i>Tabla 5 Lista de necesidades.</i> | 70 |
| <i>Tabla 6 Lista de medidas.</i> | 71 |
| <i>Tabla 7 Matriz de necesidades-medidas.</i> | 72 |
| <i>Tabla 8. Alternativas de solución para almacenar polímero.</i> | 75 |
| <i>Tabla 9. Alternativas de solución para encender/apagar el dispositivo</i> | 75 |
| <i>Tabla 10. Alternativas de solución para energizar el sistema.</i> | 76 |
| <i>Tabla 11. Alternativas de solución para apagar en emergencia el sistema.</i> | 76 |
| <i>Tabla 12. Alternativas de solución para convertir la corriente alterna en directa para la electrónica.</i> | 77 |
| <i>Tabla 13. Alternativas de solución para convertir la corriente alterna en directa para la planta motriz</i> | 77 |
| <i>Tabla 14. Alternativas de solución para cargar el polímero.</i> | 78 |
| <i>Tabla 15. Alternativas de solución para bombear el refrigerante.</i> | 79 |
| <i>Tabla 16. Alternativas de solución para enfriar el refrigerante.</i> | 79 |
| <i>Tabla 17. Alternativas de solución para filtrar el refrigerante</i> | 80 |
| <i>Tabla 18. Alternativas de solución para refrigerar la boquilla.</i> | 81 |
| <i>Tabla 19. Alternativas de solución para regular la temperatura de la extrusora.</i> | 82 |
| <i>Tabla 20. Alternativas de solución para transformar la energía eléctrica en energía mecánica de traslación</i> | 83 |
| <i>Tabla 21. Alternativas de solución para transformar la energía eléctrica en energía mecánica para extrusión.</i> | 84 |
| <i>Tabla 22. Alternativas de solución para controlar.</i> | 85 |
| <i>Tabla 23. Alternativas de solución para mostrar el progreso.</i> | 85 |
| <i>Tabla 24. Alternativas de solución para depositar el material</i> | 86 |
| <i>Tabla 25. Alternativas de solución para enviar y recibir señales.</i> | 86 |
| <i>Tabla 26. Alternativas de solución para expulsar residuos.</i> | 87 |
| <i>Tabla 27. Alternativas de solución para transmitir la potencia de traslación.</i> | 87 |
| <i>Tabla 28. Alternativas de solución para transmitir la potencia de extrusión.</i> | 88 |
| <i>Tabla 29. Alternativas de solución para registrar la temperatura.</i> | 89 |
| <i>Tabla 30. Alternativas de solución para registrar la velocidad de extrusión.</i> | 90 |
| <i>Tabla 31. Matriz morfológica para la elaboración de los conceptos.</i> | 91 |
| <i>Tabla 33. Selección del concepto.</i> | 97 |

pág.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 1. Variables de la impresora y propiedades del material relacionadas entre si. Se puede observar que elemento afecta a otro.</i> | 25 |
| <i>Figura 2. Geometría del modelo de placa plana en la que se observan algunos parámetros dimensionales utilizados en la expresión matemática del modelo.....</i> | 27 |
| <i>Figura 3. Viscosímetros capilares. (a) Ostwald. (b) Cannon-Fenske. (c) Ubbelohde.....</i> | 38 |
| <i>Figura 4. Viscosímetro de cilindros concéntricos y flujo de Couette.</i> | 41 |
| <i>Figura 5. Viscosímetro de placas paralelas y perfil de velocidades en un radio específico.....</i> | 42 |
| <i>Figura 6. Bastidor de alambre con película de fluido. Ilustración para mostrar el ejemplo del aumento del área.</i> | 44 |
| <i>Figura 7. Procedimiento método de la placa de Whilhelmy: (1) Se ubica la placa verticalmente sobre la superficie del fluido de tal manera que se moje la cara inferior. (2) Se procede a generar la fuerza vertical sobre la placa para levantarla. (3) De cada lado de la placa se forma una interfaz curva. (4) La placa se sigue levantando hasta que ocurre el arranque.....</i> | 45 |
| <i>Figura 8. Geometría del anillo del método del anillo de Nouy.....</i> | 46 |
| <i>Figura 9. Fuerza de tensión superficial vertical.....</i> | 46 |
| <i>Figura 10. Experimento del ascenso capilar. R es el radio del tubo que funciona como capilar y h la diferencia de alturas entre el fluido dentro del capilar y fuera de este.</i> | 48 |
| <i>Figura 11. Montaje de la técnica de la presión de la burbuja. Consiste en dejar caer de un gotero un fluido cualquiera a un recipiente como el mostrado a la izquierda de la figura para poder administrar el gas en formas más precisas. Se debe conocer la altura a la que se ingresa el capilar y se mide la presión en el momento en que la burbuja tiene el mismo radio que el capilar.....</i> | 49 |
| <i>Figura 12. Montaje de un osmómetro estático en donde se puede apreciar la diferencia de altura alcanzada en los tubos debido a la presión osmótica que se crea.....</i> | 54 |
| <i>Figura 13. Montaje experimental para hallar la tensión superficial en la INSTRON 3300.....</i> | 57 |
| Figura 14. Montaje de las dos placas paralelas en la INSTRON 3300..... | 58 |
| <i>Figura 15. Metodología de Ulrich.</i> | 59 |
| <i>Figura 16. Pruebas de cizallamiento de diferentes temperaturas de solución de PVA al 20%.....</i> | 60 |
| <i>Figura 17. Variación de la viscosidad de una muestra de PVA al 20% con la temperatura.</i> | 61 |
| <i>Figura 18. Variación de la componente constante del esfuerzo cortante de una muestra de PVA al 20% con la temperatura.</i> | 61 |
| <i>Figura 19. Montaje del cono.....</i> | 62 |
| <i>Figura 20. Parámetros geométricos del cono con los cuales se construye el modelo de la Ecuación 41.....</i> | 62 |
| <i>Figura 21. Variación de la viscosidad del PVA a diferentes concentraciones según el método del cono y utilizando dos conos diferentes.</i> | 64 |
| <i>Figura 22. Variación de la viscosidad de una muestra de PVA al 20% a diferentes valores de temperatura y utilizando el método del cono con diferentes conos.....</i> | 65 |
| <i>Figura 23. Variación de la tensión superficial del PVA a diferentes concentraciones.</i> | 66 |
| <i>Figura 24. Figura tomada de Estudio realizado por Gonzales y Vargas en la cual se muestran las curvas calorimétricas representativas en un análisis térmico mediante calorimetría diferencial de barrido y las temperaturas de las transiciones de fase. (Gonzales & Vargas, 2011)</i> | 68 |

| | |
|--|--------------------------------------|
| <i>Figura 25. Figura tomada de estudio realizado por Claudia Echeverri, Catalina Vallejo y Marta Londoño en la cual se muestra las curvas calorimétricas representativas en un análisis térmico mediante calorimetría diferencial de barrido realizada en diferentes muestras de hidrogeles de PVA a diferentes concentraciones y número de ciclos de congelamiento/descongelamiento.(Echeverri et al., 2009).</i> | 68 |
| <i>Figura 26. Caja negra donde se ven las entradas y salidas del sistema.</i> | 73 |
| <i>Figura 27. Diagrama de funciones de la impresora 3D.</i> | 74 |
| <i>Figura 28. Aguja de la extrusora y variables geométricas.</i> | 99 |
| <i>Figura 29. Corte transversal de la aguja y perímetro elíptico del corte.</i> | 100 |
| <i>Figura 30. Tornillo extrusor</i> | 101 |
| <i>Figura 31. Vista explosionada del sistema de extrusión.</i> | 102 |
| <i>Figura 32. Elemento con sensor de temperatura y resistencia de calentamiento a la entrada de la extrusora.</i> | |
| | ¡Error! Marcador no definido. |
| <i>Figura 33. Configuración del sistema de los ejes X y Y. Detalle del sistema de eje X con banda articulada al motor y conectado al sistema de eje Y.</i> | 103 |
| <i>Figura 34. Sistema del eje Z</i> | 103 |
| <i>Figura 35. (A) Vista frontal del sistema del eje Z. (B) Vista explosionada de la zona motorizada del sistema del eje Z.</i> | 104 |
| <i>Figura 36. Configuración de la estructura de soporte. Ensamble de los sistemas de extrusión, sistemas de los tres ejes y la estructura de soporte. Adicionalmente se ensambla el tanque del polímero.</i> | 104 |
| <i>Figura 37. Vista explosionada de la estructura externa del dispositivo</i> | 105 |
| <i>Figura 38. Estructura externa</i> | ¡Error! Marcador no definido. |
| <i>Figura 39. Tanque de almacenamiento del fluido.</i> | 106 |
| <i>Figura 40. Ventilador para refrigerar el ambiente de extrusión en caso de elevarse la temperatura sobre el rango estimado.</i> | 106 |
| <i>Figura 41. Configuración del modelo finalizado</i> | 107 |
| <i>Figura 42. Explosionado de la impresora identificando cada una de sus partes.</i> | 107 |
| <i>Figura 43. Montaje experimental del sistema de extrusión con PVA al 20% y resultados de los patrones de extrusión.</i> | 108 |

pág.

RESUMEN

La necesidad que existe de desarrollar nuevos sistemas de formación controlada de matrices extracelulares (MEC) y que su elaboración permita un mejor proceso de fabricación de tejido celular es una realidad en la ingeniería de tejidos. Existen métodos tradicionales con los que esta necesidad no se contempla en absoluto; mientras otros métodos más evolucionados, como lo son las técnicas de prototipado rápido (RP), satisfacen parcialmente esta demanda de hoy en día.

En este trabajo se expone el proceso de diseño de unos de los dispositivos más utilizados para las RP más avanzadas de la elaboración de MEC como lo son las impresoras 3D. Para este diseño se debió partir desde el material a imprimir y el tipo de piezas a construir. En una primera instancia se seleccionaron las variables que estaban más relacionadas con el proceso de extrusión y el diseño de dispositivos de impresión mediante la revisión de la literatura sobre modelos de extrusoras y basándose en el conocimiento de las características más importantes a conservar en la matrices y en el material a la hora de ser impreso. Para una segunda etapa se seleccionó el polímero a utilizar para las MEC por medio de una revisión bibliográfica de materiales para la fabricación de andamios. Luego se seleccionaron las técnicas de caracterización de las variables del polímero a través de otra revisión del estado del arte. En otro instante del proceso se realizaron las técnicas seleccionadas para caracterizar el polímero. Después se realizó el diseño conceptual de la impresora por medio de la metodología de Ulrich. Por último se realizó el diseño de detalle y se construyeron los planos de la impresora.

Mediante varios criterios de selección como lo son disponibilidad, precio y utilidad, se seleccionó Alcohol polivinílico (PVA) para el diseño de la extrusora. Se utilizaron varias técnicas de caracterización para determinar las variables reológicas del polímero: viscosidad y tensión superficial; las cuales hacen parte del modelo de extrusión; adicionalmente se consultaron otras propiedades como transiciones y peso molecular. Los resultados mostraron que la mejor concentración del polímero para conservar las propiedades deseadas era del 20% en solución acuosa y a una temperatura de entre 39°C a 42°C. A partir de los valores determinados se elaboró el modelo para la extrusión el cual se incluyó para la construcción de los planos del dispositivo. Las técnicas utilizadas, los resultados de estas técnicas, el proceso de diseño conceptual y de detalle junto con los planos estructurales de la impresora 3D son expuestos en este trabajo.

Palabras clave: Alcohol polivinílico, Impresión 3D, Matrices extracelulares, Prototipado rápido, Extrusión.

ABSTRACT

The existing need to develop new controlled formation systems of extracellular matrices (ECM) and to allow in the elaboration a better process of cellular tissue fabrication is a reality in tissue engineering. There are traditional methods with which this need is not covered at all; while other methods more evolved, like rapid prototyping techniques (RP), partially satisfy this demand of today.

In this work is exposed the design process of one of the devices most used on the elaboration of ECM as it is the 3D printer. To make this happen must start from the material to be printed and type of parts to build. First, the more related variables to the extrusion process and the design of printing devices were selected by reviewing the literature on models of extruders and based on knowledge of the most important features to keep in the matrices and the material at the moment it will be printed. For a second stage polymer used for the MEC was selected through a literature review of materials used in manufacture of scaffolding. Characterization techniques of the polymer variables were then selected through another revision of the state of the art. In another moment, process selected for the characterization techniques for the polymer mere performed. Then, the conceptual design of the printer was made by using the Ulrich methodology. Finally the detailed design was performed and the printer planes were built.

Through literature review and by several criteria such as availability, price and utility, polyvinyl alcohol (PVA) was selected for the design of the extruder. Several characterization techniques were used to determine the rheological polymer variables such as viscosity and surface tension; which are parts of the extrusion model; further transitions and other properties such as molecular weight were consulted. The results showed that the best concentration of the polymer to retain the desired properties was 20% in aqueous solution and a temperature of 39°C to 42°C. From the determined values for the extrusion model which included the construction of flats built device. The techniques used, the results of these techniques, the process of conceptual and detailed design with the structural drawings of the 3D printer are presented in this paper.

Key words: Poly(vinyl) alcohol (PVA), 3D printing, extracellular matrices, rapid prototyping, Extrusion.

INTRODUCCIÓN

Las matrices extracelulares o andamios son diseños en tres dimensiones que satisfacen la función de molde para la regeneración tisular. Tienen gran aplicación en la investigación y el desarrollo de la ingeniería de tejidos y en ámbitos médicos debido a la gran cantidad de beneficios y posibilidades que tiene el campo. Para la elaboración de matrices extracelulares se han desarrollado nuevas técnicas diferentes a las técnicas convencionales como el *solvent casting* o el *gas foaming* (métodos que generan poca interconectividad y porosidad), utilizadas para la formación de dichas estructuras. Estas nuevas técnicas se conocen como técnicas de prototipado rápido (RP) y han tenido un desarrollo muy veloz que ha permitido grandes ventajas en la fabricación de andamios para cultivos celulares (Abdelaal & Darwish, 2011).

Las RP son un conjunto de procesos de manufactura avanzada que pueden producir objetos a partir de datos computacionales, tales como diseño CAD (Computer Aided Design), CT (Computer Tomography) y MRI (Magnetic Resonance Imaging). La principal ventaja que tienen estas técnicas frente a las convencionales es el control de muchos parámetros de la matriz como la interconectividad entre poros, la misma porosidad y el tamaño de poro que le permiten a esta desempeñarse en condiciones óptimas (Abdelaal & Darwish, 2011). Una de las técnicas más representativas de este grupo es la impresión 3D, sin embargo no existen dispositivos que tengan alguna especialidad significativa para impresión de polímeros para MEC, y si la tienen, no existe nada comercial. Ahora bien, el diseño de estos dispositivos debe tener en la cuenta el tipo de material que se va a extruir y con qué propósito se va a extruir; es decir, que tipo de piezas se va a realizar. Es por esta razón que se requiere desarrollar sistemas de construcción controlada de MEC que permitan mejorar el proceso de la fabricación de tejidos. Anteriormente, Butscher, Bohner, Hofmann, Gauckler y Müller, en 2011, revisaron el estado actual de los conocimientos sobre el uso de materiales poliméricos en polvo para la impresión en 3D para síntesis de andamios para ingeniería de tejido óseo; a pesar de esto, no se diseñó ningún dispositivo para estos materiales y propósitos. (Butscher, Bohner, Hofmann, Gauckler, & Müller, 2011). En 2014, se desarrollaron MEC impresas con compuestos de colágeno y fosfato de calcio para la regeneración de huesos (Inzana et al., 2014); sin embargo no se diseñó ningún dispositivo con los parámetros del colágeno y el fosfato de calcio.

1. PRELIMINARES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se requiere desarrollar sistemas de construcción controlada de matrices extracelulares que permitan mejorar el proceso de fabricación de tejidos.

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de impresión de matrices poliméricas a escala milimétrica para cultivo celular.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las variables requeridas para funcionamiento del sistema de impresión, incluyendo la conformación de patrones geométricos y liberación del polímero usado en las matrices.
- Analizar las variables reológicas del polímero mediante técnicas de caracterización composicional y mecánicas.
- Diseñar los sistemas inyección y posicionamiento para la impresión de las matrices.

1.3. Marco de referencia

1.3.1. Generalidades sobre matrices extracelulares

Una matriz extracelular (MEC) es una estructura en la cual están inmersas las células y su principal función es proporcionar un medio de integración celular. Las MEC son el medio o sustancia intersticial celular y puede clasificarse en MEC naturales y MEC artificiales.

1.3.1.1. Matrices extracelulares naturales

Las MEC naturales son las matrices biológicas y son las MEC por excelencia ya que pueden cumplir con todos los requerimientos de la célula, entre ellos el crecimiento y en algunas ocasiones la diferenciación celular. Dicho esto, es posible afirmar que las MEC naturales o biológicas no sólo proporcionan soporte mecánico y estructural sino que también influyen sobre la comunicación extracelular (Ross & Pawlina, 2007).

Las MEC biológicas abastecen a las células con fuerza tensora, barreras bioquímicas y desempeñan algún papel en las funciones metabólicas de las células que la rodean. También fijan las células en los tejidos mediante moléculas de adhesión célula-MEC y provee vías para la migración celular (función muy importante para el crecimiento

exitoso de las células). Las MEC naturales ejercen una acción reguladora sobre el desarrollo embrionario y la diferenciación celular, también tienen la capacidad de retener y fijar factores de crecimiento que modulan la proliferación celular, complementando las provisiones de vías para su migración. Todo esto muestra que el diseño de una matriz extracelular es un sistema dinámico e interactivo que informa a las células de cambios mecánicos y bioquímicos en su medio exterior (Ross & Pawlina, 2007).

Estas MEC contienen una gran diversidad de fibras, como las fibras elásticas y las fibras de colágeno, que se componen de diferentes tipos de proteínas estructurales. Además de estas fibras, las MEC biológicas tienen varios proteoglicanos, glucoproteínas multiadhesivas como la fibronectina y glicosaminoglicanos (GAG) como el queratano sulfato y el hialuronato. Entre estos tres grupos moleculares se constituye la sustancia fundamental. La función de la MEC depende mucho de las interacciones entre estas moléculas que comparten dominios comunes. Ahora bien, las matrices poseen propiedades mecánicas y bioquímicas diferentes dependiendo del lugar donde se encuentren. Por ejemplo, las MEC del tejido conjuntivo laxo tendrán características muy diferentes a las MEC en el tejido cartilaginoso o en el tejido óseo. Esto se debe a que cada célula del tejido conjuntivo secreta una proporción diferente de moléculas de la MEC que contribuyen a la formación de muchas organizaciones estructurales diferentes (Ross & Pawlina, 2007).

1.3.1.2. Matrices extracelulares artificiales

Las MEC artificiales deben suplir las funciones biológicas, químicas y físicas o mecánicas de la matriz nativa. La producción y proliferación de la matriz extracelular es crucial en la terapia celular y como ya se ha mencionado anteriormente, se sabe que afecta la diferenciación y función celular (PESCADOR, 2012).

Se pueden utilizar materiales artificiales o naturales en la creación de arreglos tridimensionales que son mallas de polímeros (fibras sintéticas u otro tipo de biomateriales) sobre las que se explantan las células. También es posible generar una matriz de colágeno en diversas formas, con una inclinada preferencia por la esponja o geles de colágeno o también esponja de celulosa. Hay muchos tipos de diseños con diferentes materiales (que deben cumplir ciertas características que posteriormente se aclararán, ver Biocompatibilidad) pero en últimas, el desarrollo de cultivos tridimensionales secundarios deben permitir la reorganización de la estructura del tejido o recrear una nueva estructura garantizando el cumplimiento de las condiciones que la matriz nativa proporcionaba en un principio para su correcto crecimiento (Gil-Loyzaga, 2011).

1.3.2. Procesos de manufactura de matrices artificiales

1.3.2.1. Técnicas tradicionales

1.3.2.1.1. Solvent Casting/Particulate Leaching

Este proceso comienza disolviendo un polímero biodegradable, generalmente ácido poliláctico (PLA) o ácido poliglicólico (PLGA), en un solvente orgánico como cloroformo o cloruro de metileno. Un porógeno soluble en agua, tal como el cloruro de sodio, el cual se escoge según el rango de tamaño de poro deseado, se adhiere a la solución polimérica la cual es luego vertida en un molde con la forma deseada. Cuando el solvente se ha evaporado, el material se seca al vacío para remover cualquier solvente residual. El compuesto de polímero y sal luego es lavado en agua para extraer la sal y se seca nuevamente (Kramschuster & Turng, 2013).

1.3.2.1.2. Gas Foaming

Este proceso elimina la necesidad de solventes orgánicos al usar gas, usualmente dióxido de carbono, para espumar el material polimérico. Discos de polímero formados por fundición en un molde o formados por la compresión de pellets, son saturados con CO₂ en una cámara con alta presión. Una vez que el polímero se ha saturado, una caída rápida de presión activa una inestabilidad termodinámica en la solución de gas y polímero, llevando a una nucleación y crecimiento de poros (Kramschuster & Turng, 2013).

1.3.2.1.3. Gas Foaming/Particulate Leaching

Esta técnica se desarrolló para evitar problemas como el uso de solventes orgánicos y procesos por lotes. Se vierten capas delgadas de una solución de poliácido láctico con óxido de polietileno soluble en agua, luego se lava el óxido de polietileno con agua (Kramschuster & Turng, 2013).

1.3.2.1.4. Emulsion Freeze-Drying

Se combina una solución de polímero y agua destilada ultrapura, formando dos capas inmiscibles. Estas fases inmiscibles son homogeneizadas para formar una emulsión donde el agua actúa como la fase dispersa y la solución polimérica actúa como la fase continua. Luego se vierte en un molde, y la mezcla se enfría con nitrógeno líquido para solidificar. El agua y el cloruro de metileno se subliman al vacío. También se usa un desecador de vacío para remover los solventes que permanecen aún (Kramschuster & Turng, 2013).

1.3.2.1.5. Thermally Induced Phase Separation

Se utiliza una solución de polímero a altas temperaturas, compuesta de un polímero biocompatible en algún solvente. Cuando se reduce la temperatura de la solución por debajo del punto de fusión, ocurre una separación de fases, formando una fase rica en polímeros y otra fase rica en solvente. El solvente de la fase solidificada rica en solvente se sublima (Kramschuster & Turng, 2013).

1.3.2.2. Técnicas de prototipado rápido

1.3.2.2.1. Técnicas basadas en extrusión

Filamentos termoplásticos son fundidos por calentamiento y depositados por un extrusor guiado por un computador para formar objetos tridimensionales. El material abandona el extrusor en forma líquida y se solidifica inmediatamente. Las capas depositadas anteriormente deben mantenerse a una temperatura por debajo del punto de solidificación del material termoplástico para asegurar una buena adhesión entre las capas (Abdelaal & Darwish, 2011).

1.3.2.2.2. Sinterización selectiva por láser

Polvo es esparcido con un cilindro metálico sobre una superficie dejando una capa delgada de este. Luego, un láser pasa sobre la cama de polvo calentándolo y fundiéndolo localmente, lo que une las partículas adyacentes que forman una capa sólida continua. El proceso se repite para cada una de las capas que forman el conjunto, una sobre la otra (Abdelaal & Darwish, 2011).

1.3.2.2.3. Fusión por haz de electrones

Este sistema construye elementos desde el fondo pasando el rayo de electrones concentrado a aproximadamente 103 mm/s para fundir selectivamente áreas específicas del manto de polvo usando un sistema 3D-CAD conforme el polvo es añadido de manera continua (Abdelaal & Darwish, 2011).

1.3.2.2.4. Estereolitografía

Curado selectivo de un polímero líquido fotocurable, usando un rayo láser dirigido por un computador de acuerdo a un modelo CAD. El láser pasa por las capas sobre la superficie de la resina, las primeras capas se adhieren a la plataforma. Capas sucesivas son curadas bajando esta plataforma y aplicando un espesor exacto de resina líquida (Abdelaal & Darwish, 2011).

1.3.2.2.5. Microestereolitografía

Es un nuevo acercamiento que comparte el mismo principio de la estereolitografía, sin embargo, obteniendo una mejor resolución enfocando el láser con mayor precisión para reducir el tamaño del punto a unos pocos micrómetros de diámetro para solidificar una delgada capa de 1-10 micrómetros de espesor (Abdelaal & Darwish, 2011).

1.3.2.2.6. Fusión selectiva por láser

Tiene un principio similar al sinterizado selectivo por láser, exceptuando que se usan láseres de estado sólido de alto poder para derretir polvo metálico muy fino en una atmósfera de gases inertes. Esto permite la formación de elementos metálicos densos en un solo proceso. Se pueden utilizar una variedad de metales, incluyendo Acero inoxidable, cromo cobalto y titanio (Abdelaal & Darwish, 2011).

1.3.2.2.7. Impresión 3D

La impresión 3D fue la primera técnica de prototipado rápido propuesta para propósitos biomédicos y de ingeniería de tejidos. Las impresoras 3D usan el principio de las impresoras de tinta convencionales para imprimir con soluciones más ligadas como látex o sílice coloidal, las cuales concuerdan mejor con los diseños realizados a computador a través de la cabeza de impresión en metales, cerámicos o polvos compuestos (Abdelaal & Darwish, 2011).

1.3.3. Técnica CAD/CAM para impresión 3D

El diseño asistido por computador (CAD) es el uso de métodos computacionales para desarrollar el modelo geométrico de un producto en forma tridimensional, de tal manera que la geometría y los requisitos de manufactura puedan ser examinados (Rao, 2004).

La manufactura asistida por computador (CAM) generalmente se refiere al software computacional usado para desarrollar el programa de la parte de Control Numérico Computacional (CNC) para el mecanizado y otras aplicaciones de procesamiento (Rao, 2004).

La existencia de estas técnicas juega un papel crítico en la emergencia de muchos de los sistemas de prototipado rápido actuales. Un proceso completo de impresión 3D incluye la creación de un modelo computacional virtual, usualmente seguido por el proceso de fabricación capa por capa. Por lo general, este proceso de prototipado rápido consta de 5 pasos (Narayan, 2014).

Primero, un modelo CAD es creado o capturado de un objeto físico a través de medios digitales, por ejemplo, un escáner 3D. El modelo CAD es usualmente generado usando un paquete de software estándar como AutoCAD, Pro/Engineer o Solid Works (Narayan, 2014).

Segundo, el modelo CAD es convertido a un formato que permite la conversión a capas de este, usualmente un formato de estereolitografía (STL). El archivo STL contiene una lista de facetas triangulares desordenadas y la normal exterior de cada triángulo en coordenadas cartesianas. Estas facetas triangulares aproximan la superficie exterior del modelo CAD preciso de interés. Sin embargo, un archivo STL no es el único tipo que puede representar un modelo CAD, hay una gran cantidad de formatos disponibles como especificaciones iniciales de intercambio de gráficas (IGES), lenguaje gráfico de Hewlett-Packard (HP/GL), tomografía computarizada (CT) y contorno de estereolitografía (SCL). El uso preferencial del formato STL se debe a su simplicidad y a su habilidad de proveer una transferencia de datos para ciertas formas, y se ha vuelto el estándar en muchos sistemas de prototipado rápido (Narayan, 2014).

Tercero, el archivo STL se rebana digitalmente en capas de secciones transversales. Como el modelo CAD está numéricamente representado en un archivo STL, es posible rebanar el modelo en capas, cada una de ellas representando un contorno de sección

transversal del modelo CAD. Sin embargo, el proceso de rebanado usualmente requiere de software desarrollado por el vendedor de cada equipo de prototipado rápido respectivo. Usando este software, los usuarios pueden dar diferentes parámetros para un modelo CAD, como la dirección de construcción, el tamaño de las partes, número de duplicados, espesor de las capas, entre otros. Este paso también es conocido como preprocesado (Narayan, 2014).

Cuarto, el objeto es construido capa por capa, cada una sobre la anterior. Después del preprocesado, la información digital de cada capa es enviada secuencialmente a la máquina de prototipado rápido para ser procesada por su computador. La máquina luego imprime una capa física del modelo, usualmente una a la vez. Cuando la capa ha sido terminada, la estación de trabajo donde se construye el modelo físico baja (o sube) una distancia equivalente al espesor de cada capa. Este proceso se repite hasta que el modelo entero está completo (Narayan, 2014).

Finalmente, el modelo se limpia y se termina. Este paso también es conocido como postprocesado. Dependiendo del modelo y de la naturaleza del proceso de prototipado rápido, diferentes procesos posteriores pueden ser requeridos como endurecimiento, pintura, curado, sellado, entre otros. El último paso es igual de importante a los pasos anteriores, porque una pieza fabricada perfectamente puede ser dañada irreversiblemente por una limpieza y un acabado inapropiados (Narayan, 2014).

Para el prototipado rápido con biomateriales, hay muy pequeños cambios en el proceso básico descrito anteriormente. Ya sea para andamios de ingeniería de tejidos o para segmentos vasculares, un modelo virtual debe estar disponible y rebanado antes de su fabricación (Narayan, 2014).

1.3.4. Biocompatibilidad

El sistema fisiológico humano, y por ende sus células, está constituido por sustancias poliméricas con aditivos y cargas como agua, lípidos, electrolitos, sustancia fundamental de las MEC, entre otras. El compuesto polimérico más común es el colágeno y es uno de los elementos proteicos que forma parte de los tejidos de sostén y de la MEC biológica. Otras proteínas incluyen elastina, queratina, miosina, actina, entre muchas otras. Pero además de proteínas estructurales, existen también en contraste, las proteínas globulares o enzimas sin funciones mecánicas que actúan como catalizadores para mantener los procesos metabólicos y las funciones vitales. Ambas proteínas están constituidas por aminoácidos que, a su vez, forman las secuencias poliméricas bajo el estricto control de los ácidos nucleicos dando lugar a macromoléculas con funciones muy específicas. Esta es la base de la compleja organización del sistema celular y molecular del organismo y es gracias a esta complejidad que el organismo humano tiene la capacidad de identificar, rechazar o admitir cualquier cuerpo extraño que sea introducido en él (Arias, et al, 2004).

Toda sustancia de origen sintético o natural que sea introducida en el organismo humano es considerada por éste como sustancia o cuerpo extraño. Las interacciones que este cuerpo haga con el medio fisiológico determinan el periodo necesario para su reconocimiento y la intensidad de reacción del organismo para asimilar o, en su defecto, rechazar la sustancia introducida y restablecer el equilibrio interno. A este tipo de interacciones que buscan la homeostasis del cuerpo se le conoce como biocompatibilidad y se extiende no sólo a los tejidos que se encuentren dentro del organismo, sino a las células de estos tejidos independientemente su localidad. Es decir que una célula en un cultivo también cumple con ciertas condiciones de compatibilidad que ha heredado de su origen tisular (Arias, et al, 2004).

Ahora bien, la biocompatibilidad de un material es un proceso dinámico con dos vertientes que comprende los efectos que hace el material en el organismo receptor (tales como infecciones o inflamaciones) y los efectos que hace el organismo receptor en el material (tales como oxidaciones, reacciones hidrolíticas y conjugaciones); por lo que se buscan materiales que causen las menores interacciones nocivas para el organismo o sistema biológico en cuestión (por ejemplo un cultivo celular) con características acordes a los principios de biocompatibilidad. Estos materiales son conocidos como biomateriales (Arias, et al, 2004).

1.3.4.1. Biomateriales

Los biomateriales (BM) ideales para la terapia celular son aquellos que presentan las mejores propiedades de biodegradación y absorción sin generar la respuesta inflamatoria que interfiera con la función celular o de los tejidos. Los BM deben tener una adecuada integridad mecánica para soportar la formación del tejido (PESCADOR, 2012).

Los principales requerimientos que deben tener los BM son biocompatibilidad, biodegradación y estabilidad estructural y mecánica. La estabilidad de uno de estos materiales está acotada por propiedades elásticas, de absorción y poder de degradación química. Además de estos tres requerimientos, las células necesitan de otras propiedades de la matriz extracelular tales como la activación de los factores de crecimiento, la oxigenación y nutrición, como ya se había mencionado anteriormente. Gracias a la microestructura porosa de los BM se pueden garantizar todas estas exigencias de la célula (PESCADOR, 2012).

Los BM se pueden clasificar en metales, cerámicos, polímeros naturales y polímeros sintéticos, y eventualmente en biomateriales compuestos diseñados a partir de la combinación de dos o más de los grupos anteriores (PESCADOR, 2012).

El colágeno es uno de los materiales más abundantes en el organismo y ha tenido una larga y gran historia en la terapia celular. El colágeno es un biopolímero natural con dominios de adhesión celular que sirven para la interacción celular, es biocompatible y presenta mínima respuesta antigénica o antiinflamatoria, degradándose por lisosomas.

Otro BM muy conocido es el alginato. Este está compuesto por polisacáridos, es biocompatible y aprobado por la FDA, no posee dominios de adhesión celular a diferencia del colágeno y el grado de la estructura mecánica es considerablemente restringido (se cree que es debido a la poca cantidad de iones) (PESCADOR, 2012).

Otro biomaterial que ha tenido buena reputación son las fibras del cabello humano que poseen gran biocompatibilidad, son fáciles de extraer, contiene sitios de reconocimiento molecular donde hay integración celular y se sabe que los BM derivados de queratinas tienen aplicación como fármacos, en ingeniería tisular, piel sintética e implante coclear.

También son muy conocidos algunos biopolímeros sintéticos como el polimetilmetacrilato PMMA, la policaprolactona PCL, el alcohol polivinílico PVA y el poliuretano PU. En fin, hay muchos BM de todo tipo que cumplen con diferentes propiedades y pueden ser utilizados para la fabricación de MEC gracias a sus cualidades para la terapia celular.

1.3.5. Diseño de producto

1.3.5.1. Metodologías de diseño de producto

En la Tabla 1 se presentan algunas de las metodologías que se pueden seguir para generar de un diseño de concepto:

Tabla 1. Metodologías de diseño de producto (Cuberos, s.f.).

| Autores representativos | Descripción |
|-------------------------|--|
| Asimow (1962) | Dos etapas: Planeación de la metodología. Diseño detallado. |
| Jones (1963) | La intuición y los aspectos no racionales tienen el mismo rol que los lógicos y los procedimientos sistemáticos. |
| Archer (1963) | Listas de chequeo (más de 229 ítems), para verificar tres fases: Análisis. Creatividad. Ejecución. |
| Alger y Hays (1964) | Hace énfasis en la valoración de alternativas del proyecto. |

| | |
|--|---|
| Alexander (1964) | <p>Análisis riguroso del problema.</p> <p>Adaptación del programa de diseño al problema específico.</p> <p>División del problema complejo en subgrupos de problemas.</p> |
| Luckman (1967) | <p>Consiste en tres fases:</p> <p>Análisis.</p> <p>Síntesis.</p> <p>Evaluación.</p> <p>Estas fases no son lineales sino interactivas.</p> |
| Levin (1966) | <p>Caracterización de propiedades de sistemas.</p> <p>Relación causa – efecto (controlables y no controlables).</p> |
| Gugelot (1963), Burdel (1976) | <p>Información sobre necesidades del usuario.</p> <p>Aspectos fundamentales:</p> <p>Exploración de posibles funciones.</p> <p>Decisión.</p> <p>Detalle: cálculos, normas, estándares.</p> <p>Prototipo.</p> |
| <p>Jones (1970)</p> <p>Jones, Alexander Tudela (1971)</p> <p>Manuri (1974)</p> | <p>No es un método pero expone dos tendencias: Caja negra: la parte más importante del diseño se realiza en el subconsciente del diseñador, no puede ser analizada.</p> <p>Caja transparente: todo el proceso se hace visible.</p> <p>Primero se hace un estudio sobre los materiales y procesos que alimentan la</p> |

| | |
|------------------------------------|--|
| | generación de ideas. |
| Maldonado (1977) Dorfles (1977) | Al proceso de diseño se ingresan factores como: funcionalidad, simbólicos o culturales, de producción. |
| Bonsiepe (1985) | Dos métodos: Reducción de la complejidad de Alexander (1971). Búsqueda de analogías para el diseño. |
| Quarante (1992) | Para cada problema hay un método. No hay métodos universales. |
| Ulrich (2004) (Ulrich K. , 2004) | Método positivista que parte de las necesidades de un cliente y propone alternativas de solución a partir de un diagrama de funciones. |

1.3.6. Selección de variables

Para realizar una correcta selección de variables es necesario tener una visión objetiva del producto. No es acertado determinar una serie de variables que en primera instancia parezcan relacionados con el producto objetivo pero que en realidad no hacen parte significativa de un modelo apropiado para este.

El objetivo es el de seleccionar las variables relacionadas con las propiedades del polímero que pueden llegar a afectar la calidad final del producto al verse este (el polímero) en ciertas condiciones de su entorno. Al ser estas propiedades las más susceptibles a modificar la calidad del filamento, son las que se pretende controlar mediante el diseño de la extrusora y el control de las variables del entorno.

Se comenzará definiendo los factores que influyen en la calidad del filamento extruido pero se debe tener en cuenta que estos factores se pueden catalogar como variables o propiedades. Generalmente se toman en cuenta la calidad del material y la tolerancia dimensional.

La calidad del material hace referencia a las propiedades del material que dependen del estado inicial del polímero y de su procesado y son características usualmente correspondidas con aspectos del ambiente y de su entorno. De este grupo de factores es posible enunciar algunos ejemplos: temperaturas relacionadas con la resistencia y calidad del material, humedad del ambiente, presión, geometría del extrusor.

La calidad dimensional hace referencia a la producción del extruido con las dimensiones apropiadas y dentro de los niveles de tolerancia definidos para el producto. Esta calidad se ve afectada constantemente por el diseño geométrico y dimensional de la boquilla, cantidad de material que sale por el extrusor, de nuevo la temperatura juega un papel fundamental, velocidad de giro del tornillo, entre otros.

En última instancia lo que se busca es un producto bien hecho y estas variables definen la calidad de dicho producto. Es posible rescatar las características más importantes y comenzar a realizar un análisis de estas. En ambos grupos de factores se mencionan las características geométricas de la extrusora y la temperatura, por lo que se comienza a ver que son factores importantes para el diseño; además se mencionan propiedades relacionadas con flujo, velocidad y presión.

Ahora bien, es posible definir las variables más significativas del diseño de la extrusora pero también se busca ver las propiedades del polímero y su relación con las variables para poder seleccionar las técnicas de caracterización correctas del material.

Dimensiones y geometría de la extrusora: Esta variable desempeña un papel fundamental en el comportamiento del polímero además de relacionarse con otras variables tales como flujo (cantidad de material que sale). Propiedades como la viscosidad y la tensión superficial pueden verse afectadas por esta variable y esto puede conllevar a la modificación de la calidad del producto.

Temperatura: Esta variable afecta de manera significativa la viscosidad del material y puede ser fundamental determinar un rango apropiado de trabajo para dicha variable ya que el material tendrá ciertas temperaturas a las que se comportará de diferentes maneras. A estas propiedades se les conoce como transiciones de fase y transición vítrea.

Velocidad de extrusión: Otra variable que afecta la viscosidad y que debe ser muy controlada ya que se busca que sea constante y apropiada para la salida del material.

Cabe aclarar que así como las variables pueden afectar propiedades del polímero, también las propiedades del polímero pueden llegar a afectar a las variables. Un ejemplo claro de esto es la temperatura y la viscosidad de material.

Debido a que el producto final estará en contacto con células se buscará también que el material tenga propiedades composicionales apropiadas para desarrollar una adecuada biocompatibilidad con el tejido. Sin embargo, estas propiedades no afectan en absoluto el diseño de la impresora pero si se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar el material y por lo tanto también las técnicas de caracterización.

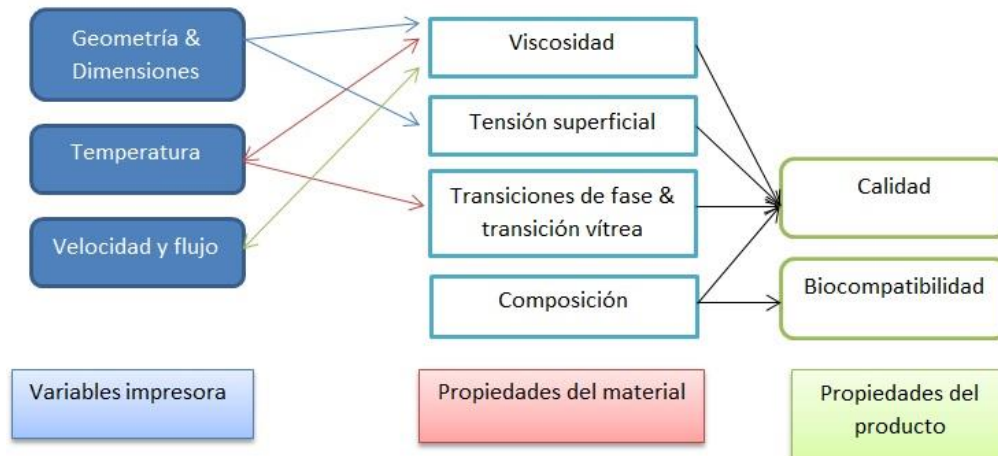


Figura 1. Variables de la impresora y propiedades del material relacionadas entre sí. Se puede observar que elemento afecta a otro¹.

Ahora que se tiene un esquema general de las variables y propiedades relacionadas con el diseño de la impresora se procederá a incluir otra propiedad del material que es fundamental para el buen desempeño de la extrusión y se continuará mencionando unos modelos alternativos y muy básicos del diseño de impresoras que vale la pena conocer.

Dentro de las propiedades de los polímeros que son relevantes en el proceso de extrusión, además de la viscosidad y la transición vítrea, se encuentra el índice de flujo de fusión (MFI por sus siglas en inglés). Esta propiedad es un índice que indica la facilidad de un polímero para fluir. Obviamente está relacionado con la viscosidad pero se toma aparte debido a que se emplea un procedimiento normalizado que se describe en la norma ISO1133-1. Es fundamental para comprender el comportamiento del polímero a la hora de ser extruido y se tendrá en la cuenta para el diseño de la impresora.

A continuación se presentan tres modelos de extrusoras que dan una idea general pero muy importante del diseño de la impresora y que aportan unas primeras aproximaciones muy concluyentes.

1.3.6.1. Análisis dimensional de un extrusor

En este modelo se realiza un análisis al caudal de salida del extrusor, identificando las variables que influyen en el flujo volumétrico que se vacía de este. Mediante algunas simplificaciones y suposiciones se puede llegar a la conclusión de que el flujo volumétrico es proporcional al diámetro del husillo elevado a la tercera potencia y de la velocidad de rotación de este.

¹ Todas las ilustraciones fueron trabajo de los autores a no ser que se especifique la fuente de la cual fueron obtenidas.

$$\dot{V} \sim ND^3$$

Siendo N la velocidad de rotación del husillo y D el diámetro.

Realmente el modelo es bastante sencillo pero permite realizar unas primeras aproximaciones para comprender la importancia de algunas variables en el diseño de la extrusora. Es posible realizar dos conclusiones con mucho peso para el diseño posterior de la impresora. En primer lugar se tiene que el flujo volumétrico es muy sensible a las dimensiones de la boquilla ya que este tiene una relación de proporcionalidad con el cubo del diámetro lo que implica que un pequeño cambio en las dimensiones de la boquilla pueden significar uno muy grande del caudal. En segundo lugar se tiene que el caudal depende de la velocidad del husillo y es importante que esta velocidad sea constante.

1.3.6.2. Modelo de placa plana

Este modelo realiza un análisis analítico mucho más completo que el anterior; sin embargo sigue teniendo consideraciones muy alejadas de la realidad y que convergen en errores significativos debido a las falsas hipótesis que surgen de este. A pesar de todo esto, es un modelo que es muy útil para tener una aproximación del diseño de las extrusoras y nos acerca a variables geométricas y mecánicas a tener en la cuenta.

El modelo como tal intenta explicar el transporte del fluido a través del husillo encerrado en un tubo. Las Hipótesis que tiene en cuenta el modelo, según C. Rauwendaal, se describen a continuación:

- El fluido es Newtoniano, por lo que su viscosidad no depende del gradiente de velocidades.
- La viscosidad del fluido tampoco depende de la temperatura.
- Se considera estado estacionario.
- Se considera condición de no deslizamiento en las paredes sólidas.
- Se desprecian las fuerzas volumétricas e inerciales.
- Se considera infinito el ancho del canal para que de esta manera sea posible despreciar el efecto de los costados del husillo.
- Se desprecia la curvatura del canal (la geometría del problema queda reducida a un canal plano cubierto por una placa plana. De aquí el nombre del modelo).

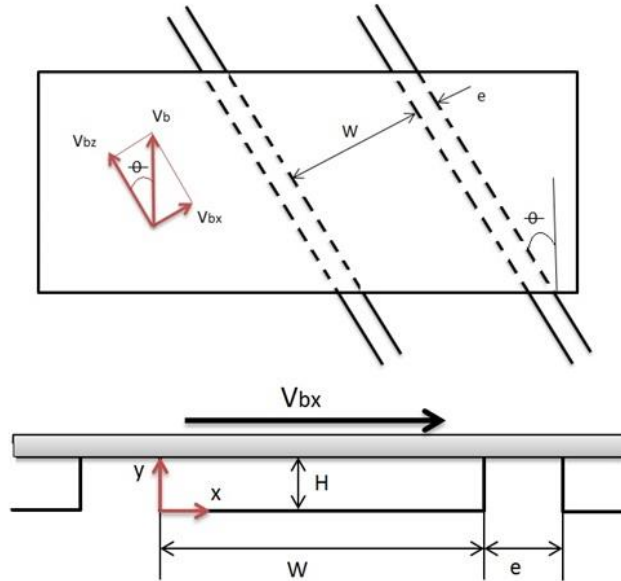


Figura 2. Geometría del modelo de placa plana en la que se observan algunos parámetros dimensionales utilizados en la expresión matemática del modelo

Con la geometría del modelo se llega al siguiente enunciado: Se mueve una placa plana a una velocidad V_b sobre un canal rectangular con ángulo θ definido entre V_b y los costados del canal.

Como se había mencionado anteriormente, el modelo es analítico y lo que pretende es encontrar, mediante una expresión, el perfil de velocidades en la dirección del canal y a partir de ella encontrar el flujo volumétrico de la extrusora. Después de cálculos matemáticos y teniendo en cuenta las hipótesis anteriormente resaltadas para condiciones iniciales de las ecuaciones diferenciales y otras simplificaciones se llega a la siguiente expresión:

Ecuación 1

$$V_z(y) = \left(\frac{V_{bz}}{H} - \frac{g_z H}{2\mu} \right) y + \frac{g_z}{2\mu} y^2$$

Donde se puede apreciar que la ecuación posee una componente lineal y otra cuadrática. La componente lineal hace referencia al flujo viscoso (Couette) que impulsa al fluido mientras la cuadrática hace referencia al flujo de presión (Hagen-Poiseuille) que hace retroceder una parte de este.

Para obtener el flujo volumétrico se debe integrar el campo de velocidades obteniendo la siguiente expresión:

Ecuación 2

$$\dot{V} = \frac{1}{2} WHV_{bz} - \frac{WH^3 g_z}{12\mu}$$

Descomponiendo la velocidad de la placa que a su vez depende de la velocidad de giro del husillo, la expresión anterior queda así:

Ecuación 3

$$\dot{V} = \frac{1}{2} WH\pi DN \cos \theta - \frac{WH^3 g_z}{12\mu}$$

Hay varias cosas que se pueden rescatar de este modelo. Por un lado se puede observar de nuevo que las características dimensionales y geométricas tienen gran influencia en el flujo viscoso. Además de la geometría del extrusor también la velocidad de giro del husillo (N) afecta al flujo viscoso. También se puede observar que el flujo de presión disminuye el flujo volumétrico total que alcanza la boquilla y que es por esto que se debe tener un buen diseño para minimizar este término y así maximizar la producción del extrusor y disminuir la sensibilidad del sistema a las variaciones de presión (variable que no es posible controlarla como si lo es la velocidad del husillo).

1.3.6.3. Modelo de las características del extrusor y la boquilla

En este modelo se hace el análisis al extrusor y adicionalmente se hace un análisis a la boquilla que es por donde sale el material. En ambos casos se definen las ecuaciones que definen las características de cada objeto dejando en total dos expresiones.

Por un lado, la característica del extrusor en este modelo es la ecuación de flujo volumétrico derivada del modelo de la placa plana; la única diferencia es que se evalúa el gradiente de presiones.

Ecuación 4

$$g_z = \frac{P}{L_{canal}} = \frac{P \sin \theta}{L}$$

Esto da resultado a la ecuación de la característica del extrusor que se muestra a continuación.

Ecuación 5

$$\dot{V} = \frac{1}{2} WH\pi DN \cos \theta - \frac{WH^3 \sin \theta P}{12\mu L}$$

Por otro lado, la característica de la boquilla es la ecuación de la caída de presión de un fluido newtoniano que fluye en medio de un conducto cilíndrico. Una aproximación un poco burda pero suficiente para comprender la importancia de la geometría y viscosidad del fluido (aunque se suponga uno muy alejado de la realidad).

Ecuación 6

$$\dot{V} = \frac{\pi R_d^4 P}{8 L_d \mu}$$

Con este modelo se termina la selección de variables. Más adelante en las técnicas de caracterización se hablará de las variables elegidas y su importancia para el análisis y diseño de la impresora.

1.3.7. Selección del polímero

Es fundamental comprender la importancia que tiene la selección de los materiales para la construcción de matrices que tendrán contacto con células vivas y que pueden reaccionar de forma positiva o negativa; entendiendo las reacciones negativas como los efectos adversos que tiene el material en las células o viceversa. Es muy probable que si el material no es biocompatible entonces las células comenzaran con un proceso de rechazo que puede resultar en inflamación logrando así el fracaso de los propósitos de las matrices. Por otro lado, si el material no posee algunas características mecánicas especiales, el crecimiento, adhesión y muchos otros factores fundamentales para el éxito del cultivo no prosperaran. Dicho esto, para lograr exitosamente la fabricación de matrices celulares apropiadas para los cultivos de células es necesario, en primer lugar, tener el material correcto como base de la matriz.

Ahora bien, si queremos una MEC que tenga un desempeño excelente hay factores asociados al material y otros al diseño tridimensional propio de la MEC. Factores como la cantidad de poros, el tamaño de poro, la forma y el tamaño de la MEC, entre otros son elementos del diseño tridimensional y, a pesar de ser fundamentales, no son requerimientos para la selección del material ya que no son propiedades ni características de este. Por otra parte, las características de un material se pueden juntar en dos grupos fundamentales; su biocompatibilidad que alberga características que no son tan cuantificables y sus propiedades mecánicas que son totalmente medibles. Lo que se busca en la selección del material es encontrar uno que cumpla con todas las características de biocompatibilidad y propiedades mecánicas que sean claves para el crecimiento adecuado de las células en la matriz.

Por excelencia, los materiales que tienen mejores propiedades relativas a la biocompatibilidad son los biomateriales. Los biomateriales (BM) ideales para la terapia celular son aquellos que presentan las mejores propiedades de biodegradación y absorción sin generar la respuesta inflamatoria que interfiera con la función celular o de los tejidos. Los BM deben tener una adecuada integridad mecánica para soportar la formación del tejido. (PESCADOR, 2012).

Sentado que los biomateriales son la principal opción en cuanto a términos de biocompatibilidad, es posible entonces extenderse a los grupos más característicos que engloba todo el término de biomateriales, sin adentrarse en definiciones y materiales muy

específicos (actividad que se realizará posteriormente). En la Tabla 2 se especifica el tipo de BM, sus principales ventajas y desventajas.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los biomateriales (PESCADOR, 2012)

| BM | Ventajas | Desventajas |
|-----------------------|---|--|
| Polímeros sintéticos | Fácil producción. Biodegradación controlable. Libre de patógenos. Posible incorporación de moléculas bioactivas. | Menor biocompatibilidad. Productos de degradación. |
| Polímero naturales | Alta biocompatibilidad. Posible incorporación de moléculas bioactivas. Matriz similar a la natural. | Difícil control de degradación. Pobre estabilidad mecánica. Sensible a temperatura. Posible transmisión de patógenos. |
| Matriz de tejidos | Propiedades mecánicas apropiadas. Composición y estructura similar a los tejidos nativos. | Respuesta inmune. Dificultad de penetrar las células. Transmisión de patógenos. |
| Materiales compuestos | Efectos sinérgicos. Control de la composición. | Limitado proceso de fabricación. Pobre interacción de la interfase. |

Si se analiza detenidamente cada uno de los aspectos favorables y no favorables de los grupos de materiales usados para la fabricación de MEC se llegaría a la conclusión que hay un material para cada tipo de situación y que, dependiendo de los requerimientos y la lista de necesidades que se busque para el cultivo celular, se planteará y relacionarán dichos requerimientos y necesidades con la propiedades mecánicas de la MEC. Sin embargo, existe un gran favoritismo por los materiales poliméricos debido a sus grandes beneficios y a la posibilidad de controlar en términos relativamente fáciles sus características negativas. Es por esto que se continuará analizando materiales poliméricos, sean sintéticos o naturales y se diseñará la impresora en función de satisfacer las precisiones que se planteen para MEC poliméricas. Para ello se

profundizará un poco en los conceptos generales de polímeros y se irá ahondando a medida que se seleccionará cada vez menos polímeros hasta llegar a la lista definitiva, con la que se trabajará para el diseño final.

1.3.7.1. Materiales poliméricos

Estos materiales son ampliamente utilizados en la ingeniería de tejidos y clínica (elaboración de sistemas de dosificación de fármacos, implantes quirúrgicos y membranas protectoras son sólo algunas de las aplicaciones en estas áreas) y como ya se ha mencionado anteriormente, deben su éxito a las fascinantes propiedades y posibilidades que presentan, tanto por su variedad de compuestos, como por la facilidad que tienen de ser elaborados de muchas maneras con propiedades bien definidas y de adaptarlos a formas como películas, bloques o fibras y tejidos (Abarrategui, 2008).

Materiales poliméricos naturales

La matriz extracelular natural de las células posee algunos polímeros que son propios de dicha matriz; estos polímeros son los más estudiados dentro de este grupo de materiales aunque también se encuentran los que tienen excelentes propiedades y no pertenecen a la MEC natural de la célula. Estos últimos, igualmente encajan en este grupo debido a que la única condición para pertenecer al grupo de polímeros naturales es que éstos (los polímeros) no deben ser hechos en condiciones especiales por procedimientos de síntesis, a lo cual llamaremos polímeros sintéticos (Abarrategui, 2008).

Los compuestos propios de la MEC natural de la célula con el colágeno, los proteoglicanos, los glicosaminoglicanos o hialuronatos. Dentro de todos estos el más trabajado y estudiado ha sido el colágeno I, que es el componente principal de la fase orgánica del hueso. El ácido hialurónico, otro polímero bien estudiado, es un polisacárido que se puede encontrar en los cartílagos, el líquido sinovial, tejido conectivo y humor vítreo. Este polisacárido se ha ensayado como un inductor de condrogénesis y angiogénesis. Otro polímero destacable es el condroitín sulfato (glicosaminoglicano) encontrado en los cartílagos y que está muy involucrado en la reparación ósea. Así como estos tres hay muchos más de los cuales se hablará más profundamente (Abarrategui, 2008).

Materiales poliméricos sintéticos

Como ya se ha mencionado anteriormente, esta clase de polímeros son realizados bajo la determinación humana y en condiciones especiales. Los polímeros sintéticos más estudiados son los poliésteres y los polianhídricos por la facilidad que tienen por ser degradados por el organismo. A pesar de que esto suene ventajoso, es un gran impedimento para los polímeros sintéticos en general ya que, como es posible observar en la tabla 1, los productos de degradación son una desventaja dentro de este grupo de polímeros. Los productos de degradación, tales como los ácidos y los alcoholes, aumentan la respuesta inflamatoria del organismo e inhiben la formación de nuevo tejido. Un ejemplo claro de esto son el ácido poliláctico y el ácido poliglicólico que producen al

degradarse por hidrólisis los ácidos láctico y glicólico respectivamente (Abarrategui, 2008).

La policaprolactona, los polianhídricos y los polifosfatos son otros polímeros pertenecientes a esta categoría, biodegradables y muy útiles en la ingeniería de tejidos al igual que el polietilenglicol (PEG) muy utilizado en los hidrogeles por su hidrofiliidad (Abarrategui, 2008).

Así como hay polímeros biodegradables en esta categoría, también se encuentran los no degradables tales como el destacado polimetilmetacrilato (PMMA) usado en dentaduras y cemento de prótesis ortopédicas por su gran versatilidad y politetrafluoroetileno (PTFE) utilizado abundantemente en la regeneración ósea guiada, sirviendo como un escudo para las poblaciones celulares que no son deseadas (Abarrategui, 2008).

1.3.7.2. Polímeros para andamios 3D de tejido

Ya conocidos los grupos más generales que contienen a la gran cantidad y versatilidad de polímeros conocidos y hechos por el hombre, se continuará describiendo algunos de los más utilizados en el área de ingeniería tisular e MEC.

Polímeros Sintéticos biodegradables

Materiales hechos por el hombre, muy útiles en el campo biomédico debido a sus propiedades ajustables a aplicaciones de la ingeniería de tejidos.

- Ésteres poli(α -hidroxi): usados como material de matrices por su buena biocompatibilidad, biodegradabilidad controlada y una relativamente buena procesabilidad. Matrices de ácido poli(láctico) (PLA), ácido poli(glicólico) (PGA) y su copolímero ácido poli(láctico-co-glicólico) (PLGA), son aplicados a la regeneración de todo tipo de tejidos.
- Polímeros de polianhidrido: Propiedades físicas y mecánicas incrementadas para aplicaciones en ingeniería de tejidos duros. Poseen una biocompatibilidad in vivo excelente.
- Policaprolactona (PCL): Puede enlazarse fácilmente con otros polímeros. No es tóxico y es biocompatible. Tiene una tasa de degradación significativamente lenta; su completa degradación puede tomar hasta 24 meses. Sin embargo, se copolimeriza con otros materiales para lograr las propiedades de degradación deseadas. Su excelente biocompatibilidad lo ha llevado a ser extensivamente investigado como andamio para la ingeniería de tejidos.
- Poli(propileno fumarato): Biodegradable.
- Oxido de polietileno (PEO): Posee una excelente biocompatibilidad y es usado ampliamente en aplicaciones biomédicas. Hidrogeles de PEO son usados en ingeniería de tejidos y liberación de medicamentos. Estos hidrogeles biodegradables son muy útiles para andamios inyectables con cargas de células encapsulando condrocitos, que se degradan in vivo, y para formación de tejido neocartilaginoso.

- Polietilenglicol (PEG): Restringe y controla la adhesión de células y proteínas en andamios. PEG previene la adherencia de otras proteínas al andamio debido a su hidrofiliidad, por lo tanto minimiza cualquier respuesta inmune adversa. Usando PEG en un copolimero, se puede controlar las características de adhesión celular de los andamios y mejorar la biocompatibilidad.
- Alcohol polivinílico (PVA): Biocompatible. Puede hincharse para contener una gran cantidad de agua. Hidrogeles de PVA son aplicados en la regeneración de cartílagos, aumento de senos y sustitución del diafragma. La limitación del uso de andamios de PVA es su incompleta degradación.
- Poliuretano: Es uno de los biomateriales poliméricos más usados en campos biomédicos debido a sus exclusivas propiedades físicas como la durabilidad, elasticidad, resistencia a la fatiga, flexibilidad y tolerancia. Puede degradarse, no es tóxico.

Polímeros naturales

Materiales aislados de fuentes naturales, tienen mejor interacción con las células y desarrollo en sistemas biológicos gracias a su reconocimiento biológico.

- Agarosa: Es usada comúnmente como medio para cultivos celulares. Una de sus propiedades más atractivas es que su rigidez puede ser alterada, permitiendo cambiar las propiedades mecánicas del andamio. Puede ser usada para formar hidrogeles que dan a las células cultivadas una distribución más uniforme a través del andamio. Estos andamios se degradan lentamente.
- Alginatos: Polisacarido que pueden ser formados como gel o como perlas, usados para la reparación de cartílagos como soporte para encapsular células en un andamio.
- Quitosano: Polímero semicristalino con alto grado de biocompatibilidad in vivo. Puede ser preparado como un material portador sensible a la temperatura y es inyectable como fluido. Forma un gel a temperatura corporal y tiene la habilidad de liberar e interactuar con factores de crecimiento y proteínas de adhesión.
- Colágeno: Proteína fibrosa usada ampliamente por sus aplicaciones en regeneración de tejidos. Hay más de 22 tipos de colágeno encontrados en el cuerpo humano, entre los cuales los tipos I a IV son los mayormente estudiados. El colágeno provee reconocimiento celular para regular la adhesión y proliferación celular. Tiene propiedades mecánicas relativamente pobres y poco control sobre su tasa de biodegradación. Puede ser procesado en diferentes formas para aplicaciones en ingeniería de tejidos.
- Fibrina: Juega un papel importante en la sanación de heridas y por lo tanto previene pérdida de sangre durante una lesión. Pegamento de fibrina es formado a partir de la mezcla de fibrinógeno y trombina y permite que se solidifiquen. Es regularmente usado como portador de células y como conjunción con otros materiales. Geles de fibrina son usados como andamios celulares para ingeniería de tejidos, especialmente para la reparación de tejido cartilaginoso.

- Gelatina: Derivado del colágeno y exhibe menor respuesta inmune en animales comparada con el colágeno. Es una proteína desnaturalizada obtenida del procesamiento ácido y alcalino del colágeno. Debido a su fácil procesabilidad y solidificación, la gelatina puede ser preparada rápidamente para fabricar esponjas e hidrogeles inyectables. Matrices de gelatina que incorporan factores de adhesión celular como vitronectina, fibronectina y péptidos RGD mejoran la proliferación celular. Las matrices de gelatina han sido usadas para tratar y regenerar tejidos como hueso, cartílago, tejido adiposo y piel.
- Glicosaminoglicanos: Las cadenas de GAG son lineales y sin ramificaciones. Figuran de una estructura dimérica que se repite. El dímero es un disacárido constituido por el ácido glucurónico, idurónico o galactosa que se alterna con una hexosamina que puede ser la N-acetilglucosamina o la N-acetilgalactosamina. Los GAG se unen a una cerina de la proteína central por medio de un trisacárido conformado por dos galactosil y una xilosa.
- Seda: Polímeros de proteínas hilados por insectos, como gusanos o arañas. La seda de gusanos consiste en dos tipos de proteínas: fibroína y sericina. La fibroína de la seda tiene propiedades mecánicas remarcables, biocompatibilidad y tasas de degradación controlables, y puede ser modificada químicamente para alterar las propiedades de su superficie. Los andamios de fibroína de seda han sido mostrados para apoyar la adhesión, proliferación y diferenciación celular in vitro e in vivo para formar un rango de tejidos como hueso, cartílago, tendón y piel.

1.3.8. Selección de las técnicas de caracterización

Es necesario evaluar las propiedades de los polímeros y determinar las características que estén más relacionadas con el diseño de la impresora. Es a partir de estos parámetros que se evaluará el diseño más apropiado para las características geométricas de la inyectora, tamaño y material de la inyectora y otras variables a tener en la cuenta tales como temperatura, humedad y velocidad de inyección, ya que estas precisan ser consideradas para las posibles transiciones del polímero, propiedades que se medirán en la caracterización.

La caracterización de un polímero, o de cualquier material en general, se puede definir como la adquisición de información que el material puede brindar al ser estimulado o perturbado por una señal controlada. El propósito de las pruebas es proceder a encontrar el valor de las propiedades del material a partir de la información obtenida.

El propósito de esta fase del trabajo es encontrar las diferentes técnicas de caracterización que permitan determinar las propiedades mecánicas, composicionales y reológicas del polímero. En cuanto a las mecánicas y reológicas, se buscan técnicas cuantitativas, que otorguen valores de las propiedades; mientras que de las composicionales, se requieren técnicas de identificación, es decir, cualitativas

1.3.8.1. Viscosidad

Una de las variables más importantes, sino la más importante, dentro de la caracterización del polímero en la que se necesita profundizar es la viscosidad del material. Las propiedades que se desprenden de la viscosidad de un material va a ser fundamentales para determinar cómo se comporta el polímero internamente y ante diferentes situaciones de cizalla, temperatura e incluso presión (véase variables que afectan a la viscosidad). La viscosidad es sinónimo de fricción interna y se mide como la resistencia al flujo del fluido. Se Procederá a describir los aspectos más importantes de la viscosidad y de la misma manera las técnicas para determinar las propiedades de viscosidad más importantes del polímero.

La falta o ausencia de deslizamiento en un fluido es lo que conocemos como viscosidad. La fuerza por unidad de área que se requiere para poder producir el movimiento es proporcional al gradiente de velocidades (tasa de cizallamiento) del fluido. Ahora, la constante de proporcionalidad se conoce como coeficiente de viscosidad, y es uno de los parámetros que se buscan al caracterizar fluidos. De esa manera, la ecuación de la viscosidad, esfuerzo cortante o de cizalla se observa en la Ecuación 7 (Barnes, Hutton, & Walters, 1989).

Ecuación 7

$$\tau = -\mu \frac{\partial v}{\partial x}$$

Sin embargo, no todo es tan sencillo al hablar de linealidad y de fluidos, ya que hasta ahora, y para la Ecuación 7, se ha considerado los fluidos con las leyes de Newton y Hooke que son leyes que asumen la proporcionalidad entre los esfuerzos y la tensión. La Ecuación 7 sólo es válida para los fluidos en los que existe dicha proporcionalidad, a estos fluidos se les conoce como fluidos newtonianos. Los fluidos no-newtonianos se clasifican en tres categorías: Los fluidos con comportamiento independiente del tiempo, con comportamiento dependientemente del tiempo y los viscoelásticos. Los primeros, además de contener también a los fluidos newtonianos, contienen también a los siguientes grupos: Fluidos Dilatantes, Fluidos Pseudoplásticos, Fluidos de Plástico de Bingham, Fluidos de Herschel-Bulkley y Fluidos Casson. En el caso de los polímeros seleccionados, el grupo al que pertenecen es Fluidos de plástico de Bingham y la fórmula que describe su viscosidad se puede apreciar en la Ecuación 8.

Ecuación 8

$$\tau = -\mu \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_0$$

Variables que afectan a la viscosidad

El comportamiento de la viscosidad en la realidad depende de diversas variables como la temperatura, la presión y la tasa de cizallamiento. Es importante conocer a fondo como afectan estas variables a las propiedades de viscosidad del polímero ya que esto

determinará el rango de condiciones a las que se deben tomar medidas de caracterización para que el fluido se comporte de igual manera en las condiciones de laboratorio como en las condiciones en las que estará expuesto en la realidad.

- Variación con la tasa de cizallamiento: La velocidad de cizallamiento aproximada involucrada en cualquier operación se puede calcular dividiendo la velocidad media del líquido que fluye por una dimensión característica de la geometría en la que está fluyendo.
- Variación con la temperatura: La relación entre la temperatura y la viscosidad de un fluido, siempre y cuando sea newtoniano, se puede representar de una forma exponencial, así como lo demostró Arrhenius y se puede observar en la Ecuación 9. T es la temperatura absoluta y los otros parámetros, A y B, son constantes del polímero estudiado.

Ecuación 9

$$\mu = A * e^{T/B}$$

Sin embargo, no siempre es recomendable utilizar esta relación ya que sólo es cierta en algunas condiciones muy específicas del polímero. Se utiliza generalmente cuando el polímero se encuentra por encima de su transición vítrea. Cuando el fluido está cerca de su temperatura de transición vítrea o se tiene en disoluciones concentradas es mejor utilizar la Ecuación 10 (ecuación de Williams-Landel-Ferry).

Ecuación 10

$$\log\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right) = \frac{-C_1(T-T_s)}{C_2+(T-T_s)}$$

En donde la μ_s es la viscosidad a una temperatura de referencia T_s que generalmente se toma como la temperatura de transición vítrea del polímero. A esta temperatura las constantes C_1 y C_2 tomarían los valores de 17,44 K y 51,6 K respectivamente.

Algo que hay que tener en la cuenta a la hora de elegir el viscosímetro y considerando la temperatura es la tasa de extracción del calor, de lo cual hay dos factores importantes que afectan a los viscosímetros en este tema. En primer lugar está el tipo de instrumento a utilizar: para esta situación existen dos tipos de viscosímetros, los primeros son en los que el líquido de prueba atraviesa y sale del instrumento mientras que en los segundos, el líquido permanece dentro del instrumento. Para el primer caso, como en capilares y rejillas, el propio flujo del líquido hace que el calor se escape por convección. Para el segundo tipo de instrumentos, como los cilindros concéntricos y los viscosímetros de cono-placa, la conducción del calor a la superficie es el único proceso de transmisión de calor significativo. En segundo lugar está la geometría del viscosímetro: para capilares y rejillas el parámetro de control es el ancho del canal, entre más pequeños es mucho más efectivo el viscosímetro (Barnes et al., 1989).

Variación con la presión: Bajo condiciones isotrópicas, la viscosidad de un fluido debería variar exponencialmente en relación con la presión ejercida. Los cambios cercanos a la presión atmosférica son considerablemente pequeños y es por esto que esta variable sólo se tiene en cuenta cuando se evalúan fluidos que estén bajo presiones muy elevadas. Los aceites industriales son un ejemplo de esto.

Después de haber visto y entendido la importancia de las medidas de viscosidad y las condiciones a las que se deben tomar las medidas, se procederá a elegir la técnica, y por ende, el instrumento con el que se realizarán las pruebas reológicas del polímero. La mayoría de los viscosímetros que existen en el mercado dan un único valor de viscosidad; en otras palabras, trabajan a una sola tasa de cizallamiento, lo cual es pertinente para fluidos newtonianos pero no especialmente para el resto de fluidos, ya que como se mencionó en las variables que afectan la viscosidad, la viscosidad del polímero puede llegar a variar con diferentes tasas de cizalla. En este caso lo ideal es trabajar con diferentes tasas de velocidad, conociendo las condiciones de cizalla a las que estará sometido el polímero, al igual que las de temperatura y presión para realizar las mediciones con mayor fiabilidad. A continuación se verán los diferentes tipos de viscosímetros que se utilizan en la caracterización reológica de los fluidos y se optará por el método que mejor se acomode a los requerimientos y condiciones a los que se dispone en este trabajo. Los tres principales grupos son: los viscosímetros capilares, viscosímetros rotacionales y viscosímetros de cuerpo móvil (Barnes et al., 1989).

1.3.8.1.1. Viscosímetros capilares

Los viscosímetros capilares son probablemente los instrumentos más utilizados para medir las variables de viscosidad de un fluido debido a su facilidad de uso, su simplicidad y su accesibilidad comercial. El principio de operación consiste en dejar pasar un fluido por un cilindro observando el perfil de velocidades del fluido. Cuando hablamos específicamente de los viscosímetros de este tipo, la ecuación base que rige el comportamiento del fluido es la de Hagen-Poiseuille (Ecuación 11).

Ecuación 11

$$\mu = \frac{\pi r^4 \Delta P t}{8 V L}$$

Idealmente, la velocidad máxima se ubicará en el eje central del cilindro (este será el eje longitudinal del sistema de referencia) mientras las velocidades mínimas en los bordes del cilindro donde el eje radial estaría evaluado en el radio del cilindro. Ahora bien, si en todos los experimentos se es consecuente con la caída de presión y la velocidad del fluido se puede establecer que todos los parámetros son constantes y propios del cilindro (con excepción de t), lo cual equivale a decir que se puede establecer una constante para cada viscosímetro dependiendo de sus propiedades geométricas. La ecuación 5.1 se puede expresar entonces como la Ecuación 12, siendo K la constante del viscosímetro.

Ecuación 12

$$\mu = Kt$$

Viscosímetros capilares de vidrio

Este tipo de viscosímetros son utilizados, la mayoría de las veces, para medir las propiedades reológicas de los fluidos newtonianos. Lo más común es que la caída de presión en este tipo de viscosímetros sea la presión hidrostática del mismo fluido, a no ser que el fluido sea muy viscoso o se intente medir las propiedades de un fluido no-newtoniano (lo cual, como se mencionó anteriormente, no es muy aconsejable para este tipo de herramientas), para estos casos se aplica una presión externa o de lo contrario se conseguirían esfuerzos de cizalla muy bajos por las velocidades tan bajas del fluido.

El modelo de viscosímetros capilares (Figura 3) es el viscosímetro de Ostwald (a), el modelo más sencillo de capilares. Este ha sufrido ciertas modificaciones para llevar a otros dos modelos los cuales son el de Cannon-Fenske (b) y el de Ubbelohde (c). El primero es aconsejable para uso general y el segundo se emplea para medir diferentes concentraciones del fluido.

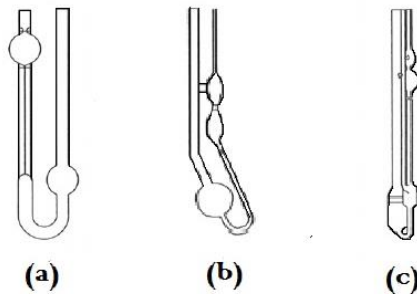


Figura 3. Viscosímetros capilares. (a) Ostwald. (b) Cannon-Fenske. (c) Ubbelohde.

Viscosímetros de orificio o de copa

La ventaja de este tipo de viscosímetros es su facilidad de uso aunque presenta inconvenientes a la hora de la medición. Su principal desventaja es que las medidas de viscosidad no son para nada precisas y es por ello que se utilizan en mediciones que no requieren una cualidad de precisión muy estricta como para medir las propiedades reológicas de las pinturas, las tintas y los adhesivos.

Estos viscosímetros no deben ser empleados para caracterizar fluidos no newtonianos, tixotrópicos o reopécticos por lo que no se profundizará mucho en ellos, aunque si se describirá su funcionamiento básico.

Lo más común en estos viscosímetros es que tengan un capilar muy corto; en esencia son un recipiente con un agujero en el fondo de ellos. La copa se llena y se procede a vaciar el líquido midiendo el caudal con el que este sale por el agujero. A pesar de lo

simple del procedimiento, los cálculos para encontrar el coeficiente de viscosidad a partir de los datos tomados experimentalmente son bastante complicados debido a que estos viscosímetros no siguen la ley de Hagen-Poiseuille al pie de la letra y por lo tanto los valores que arrojan los modelos con los instrumentos ya calibrados, igualmente pueden variar mucho del valor real de viscosidad.

Dentro de los viscosímetros de copa más conocidos se encuentran los de Ford, Furol, Saybolt, Shell y Zahn.

Viscosímetros de extrusión

Este tipo de viscosímetros son utilizados para estudiar la viscosidad de polímeros fundidos o materiales muy viscosos que no puedan medirse con los métodos anteriores. El concepto del método es simple, se presiona al fluido a través del capilar y con un pistón que ejerce un esfuerzo constante de cizalla mientras este se extruye por un orificio al final del instrumento. Para calcular la viscosidad se tienen en la cuenta el caudal volumétrico y la pérdida de carga a lo largo del capilar. Otro método muy utilizado y una variación de la extrusora es el del tornillo sin fin que cumple las mismas funciones.

Ahora bien, se debe considerar que la Ecuación 11 de Hagen-Poiseuille debe someterse a algunos ajustes ya que se está trabajando con fluidos no newtonianos y esta ecuación estaba contemplada preliminarmente para los fluidos newtonianos. Los ajustes que generalmente se le hacen al modelo se conocen como correcciones de Rabinowitsch por medio de la cual se puede obtener la tasa o velocidad de cizallamiento real.

Ecuación 13

$$\dot{\gamma}_{tw} = \frac{(3n+1)}{4n} * \dot{\gamma}_w$$

Donde n es el factor de la ley de potencia:

Ecuación 14

$$n = \frac{d \log \tau}{d \log \dot{\gamma}_w}$$

Por lo que la ecuación de Hagen-Poiseuille con las modificaciones de Rabinowitsch sería el resultado de la combinación de la Ecuación 13 y Ecuación 14, la cual se puede observar en la Ecuación 15.

Ecuación 15

$$\dot{\gamma}_{tw} = \frac{4Q}{\pi R^3} \left[\frac{1}{4} \left(3 + \frac{d \log \dot{\gamma}_w}{d \log \tau} \right) \right]$$

Donde el esfuerzo de cizalla se puede encontrar utilizando la Ecuación 16.

Ecuación 16

$$\tau = \frac{R\Delta P}{2(L+ER)}$$

1.3.8.1.2. Viscosímetros de cuerpo móvil

Al cambiar de tipo de viscosímetros se cambia también de ecuación base en la cual se fundamentan los modelos de los instrumentos. Para este caso se deja de utilizar la ecuación de Hagen-Poiseuille y se procede a utilizar la ecuación de Stokes, que relaciona la viscosidad de un fluido con la velocidad de caída de un objeto con geometría y densidad conocida en el interior de dicho fluido. Los viscosímetros de cuerpo móvil más utilizados y conocidos son los que utilizan las esferas como cuerpo a sumergir en el fluido, esto debido a que las ecuaciones se simplifican por las características geométricas de dicho objeto. Si una esfera cae libremente en el interior de un fluido entonces esta se acelera hasta que la fuerza de gravedad se iguala a la fuerza de rozamiento que el fluido ejerce sobre ella. La Ecuación 17 muestra el valor que establece la ley de Stokes para el coeficiente de viscosidad de un fluido.

Ecuación 17

$$\mu = \frac{2r^2 g(d_s - d_l)}{9v}$$

Donde r es el radio de la esfera, d_s es la densidad de la esfera, d_l es la densidad del fluido y v es la velocidad de caída del objeto, cuando ya se puede establecer que es constante.

Este método se suele implementar para fluidos muy viscosos con los que es posible establecer medidas de velocidad muy precisas pero el inconveniente es que no se ha desarrollado ninguna ecuación para fluidos no newtonianos por lo que no son muy útiles para la finalidad de este trabajo, a menos que se desarrolle un nuevo modelo para el tipo de fluido no newtoniano que se usará.

1.3.8.1.3. Viscosímetros rotacionales

Finalmente se llega a los viscosímetros de mayor interés para las mediciones de fluidos no newtonianos; esto es debido a que su versatilidad permite utilizarse para casi todo tipo de fluidos. Su mayor desventaja es el precio, ya que consta de partes relativamente más complejas que la de los instrumentos anteriormente mencionados. Esencialmente se componen de dos fragmentos separados por el fluido a estudiar; el movimiento de uno de estos fragmentos (realmente se considera el movimiento relativo) genera un perfil o gradiente de velocidades en el fluido. Para poder calcular la viscosidad del fluido, simplemente se mide cual es el esfuerzo necesario que se requirió para llegar a determinada velocidad angular.

Viscosímetros de cilindros concéntricos

Históricamente fueron los primeros viscosímetros rotacionales en implementarse y cómo su nombre lo indica constan de dos cilindros concéntricos; el exterior hueco para que

pueda ubicarse el interior y el interior puede ser macizo o hueco (generalmente es macizo). Por el movimiento relativo entre ellos se genera un esfuerzo cortante en el fluido situado entre ambos.

Debido a que hay dos principales variables que se pueden controlar, las cuales son el par de fuerzas y la velocidad angular, hay dos maneras de realizar el experimento:

- Estableciendo el par de fuerzas en uno de los cilindros y midiendo la velocidad angular del otro.
- Estableciendo una velocidad angular determinada en uno de los cilindros y midiendo el par de fuerzas en el otro.

El flujo que se genera en el interior de ambos cilindros se conoce como flujo de Couette, en honor a quien introdujo sus fundamentos en 1888.

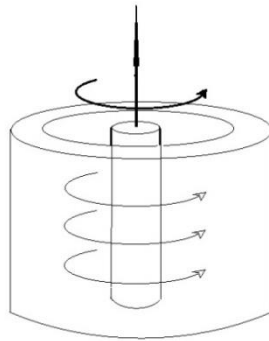


Figura 4. Viscosímetro de cilindros concéntricos y flujo de Couette.

A continuación se presentan la Ecuación 18 y Ecuación 19 que rigen el modelo para encontrar el coeficiente de viscosidad del fluido (Barnes et al., 1989).

Ecuación 18

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 L}$$

Ecuación 19

$$\dot{\gamma} = \frac{2wR_c^2 R_b^2}{x^2(R_c^2 - R_b^2)}$$

Donde M es el par de fuerzas aplicado por longitud del cilindro sumergido en el fluido; w es $2\pi/60N$, donde N es la velocidad angular en rpm; Rc es del radio contenedor de la muestra, Rb del radio del cilindro de giro y x el punto donde se quiere realizar la medida.

Si el instrumento se diseña con la distancia suficientemente pequeña entre los radios de los cilindros, entonces se puede considerar la velocidad de deformación y el esfuerzo de deformación como constantes. De esta manera, para un radio Ra medio se obtiene que:

Ecuación 20

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_a^2}$$

Ecuación 21

$$\dot{\gamma} = \frac{R_a^2 \omega}{(\Delta R)}$$

Viscosímetros de placas paralelas

El fluido está confinado, para este caso, entre dos placas paralelas y al igual que con los cilindros concéntricos, todo depende del movimiento relativo entre ellas. Lo más recomendable y simple de ejecutar es que una de las placas gire (generalmente la de arriba) mientras la otra permanece inmóvil. Para un radio dado, se debería encontrar un perfil de velocidades en forma de rampa y un esfuerzo de cizalla relativamente constante. Quizá la viscosidad sea un poco difícil de encontrar debido a que la velocidad de cizalla cambia de acuerdo a la distancia al centro de la placa o a su respectivo centro de giro.

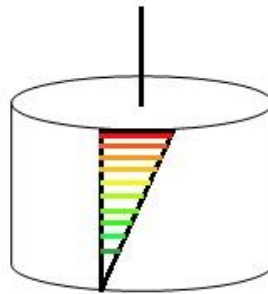


Figura 5. Viscosímetro de placas paralelas y perfil de velocidades en un radio específico.

Las ecuaciones de velocidad de cizalla y de viscosidad se pueden calcular con las ecuaciones que se muestran continuación.

Ecuación 22

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega R}{l}$$

Ecuación 23

$$\mu = \frac{3M}{2\pi R^3 \dot{\gamma}} \left[1 + 3 \frac{d \ln M}{d \ln \dot{\gamma}} \right]$$

Donde R es el radio del plato, l es la distancia entre las placas o GAP, M es el par de fuerzas aplicado y Ω es la velocidad de giro.

Viscosímetros de cono-placa

La gran ventaja de este instrumento además de su facilidad de limpieza y la pequeña cantidad de muestra que se necesita para ejecutar el experimento (cosas que tienen en común los tres viscosímetros rotacionales vistos hasta el momento), es que no es necesario aplicar ninguna corrección a los fluidos no newtonianos.

El funcionamiento de este instrumento, al igual que en el de los otros dos, se basa en el movimiento relativo de dos superficies que contienen un fluido entre ellas; adicionalmente, es posible afirmar que es una combinación entre ambos métodos. Las bases del método orbitan en la cizalla que aparece en el fluido que se encuentra entre un cono y una placa, siendo el ángulo α entre ellos considerablemente pequeño; esto se debe a que si el ángulo supera los 4° los cálculos obtenidos por las aproximaciones dadas se complican y extienden ampliamente.

Otra prerrogativa que este instrumento tiene frente a los otros dos es que la velocidad de cizalla a lo largo del espaciado del cono es constante, debido a que este espaciado aumenta conforme la distancia al centro aumenta por igual. A continuación se presentan las ecuaciones del modelo para encontrar la viscosidad, el esfuerzo cortante y la velocidad de cizallamiento.

Ecuación 24

$$\mu = \frac{3\alpha M}{2R_c^3}$$

Ecuación 25

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R_c^2}$$

Ecuación 26

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\alpha}$$

Donde R_c es el radio del cono, α es el ángulo entre el cono y la placa, Ω la velocidad angular del cono y M el par de fuerzas aplicado.

1.3.8.2. Tensión superficial

Para comprender mejor el significado de la tensión superficial se explicará de forma muy sencilla su fundamento fisicoquímico. Si se supone un recipiente lleno de un fluido, el cual está conformado por moléculas, las moléculas de la superficie tendrán mayor energía de enlace. Esto se debe a que en el interior del fluido cada una de las moléculas está rodeada de sus vecinas, en cuyo caso la energía de enlazamiento de cada molécula será mínima. Por otro lado, las moléculas de la superficie no están completamente rodeadas con sus vecinas por lo que su energía de enlace es mayor.

Entendiendo la energía de superficie se propone entonces una situación en la que se tiene una película de un fluido en un bastidor de alambre que posee un lado móvil de longitud L (Figura 6). Para aumentar el área de la película en un factor dA debe aplicarse una cantidad equivalente de trabajo. La energía de Gibbs de la película aumenta en γdA , donde γ es la energía de Gibbs superficial y este aumento implica que al movimiento del alambre se opone una fuerza F . El trabajo de la fuerza efectuada por unidad de desplazamiento Fdx equivale al aumento de energía γdA . De esta manera se tiene que:

$$Fdx = \gamma dA = \gamma(2Ldx)$$

$$F = \gamma * 2L$$

Ecuación 27

$$\gamma = \frac{F}{2L}$$

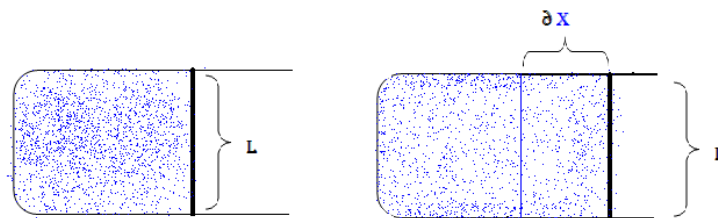


Figura 6. Bastidor de alambre con película de fluido. Ilustración para mostrar el ejemplo del aumento del área.

Ya habiendo visto el ejemplo y la ilustración, es posible introducir el término de tensión superficial. La fuerza que actúa por unidad de longitud del alambre en contacto, para esta situación, con la película de fluido se conoce como tensión superficial (Ecuación 27). En términos más generales, La tensión superficial actúa como una fuerza, aunque no es una fuerza, que se opone al aumento de área de la superficie de un líquido.

Energéticamente, como ya se había mencionado, las moléculas de la superficie tienen mayor energía que las del interior, y la energía del sistema siempre tiende a estar en el menor estado de energía posible, por lo que se supone que el sistema buscará minimizar el área para tener menos moléculas en la superficie y, en últimas, menos energía. Con el fin de minimizar el área, la superficie intentará suavizar cualquier curvatura para disminuir su estado de energía, esto se explica (matemáticamente hablando) por medio de las ecuaciones de Euler-Lagrange.

A continuación se presentarán los principales métodos para hallar la tensión superficial de un fluido dado.

1.3.8.2.1. **Métodos basados sobre la medición de una fuerza**

Ya se sabe que la tensión superficial se puede representar como la fuerza por unidad de longitud de línea de contacto; es a partir de esta definición que surgen los métodos basados sobre la medición de una fuerza ya que si se controla la fuerza aplicada y se deja constante los parámetros geométricos constantes es posible calcular la tensión sobre la superficie. Estos métodos se utilizan en los casos en que se tienen tres fases: un fluido, ya sea gas o líquido, un líquido y un sólido.

Los dos métodos que se verán a continuación son muy semejantes en cuanto al procedimiento, las principales diferencias se encuentran en las complicaciones y ventajas que cada uno puede traer respecto al otro.

Método de la placa (Whilhelmy)

Este método utiliza una placa rectangular de dimensiones conocidas (usualmente la placa es de platino levemente rugoso y sus dimensiones son de 29,9 milímetros de largo y 0,1 milímetros de ancho) suspendida verticalmente en una balanza de precisión. El procedimiento consiste en cuatro pasos: (1) Se ubica la placa verticalmente sobre la superficie del fluido de tal manera que se moje la cara inferior. (2) Se procede a generar la fuerza vertical sobre la placa para levantarla. (3) De cada lado de la placa se forma una interfaz curva. (4) La placa se sigue levantando hasta que ocurre el arranque. El procedimiento se puede ilustrar en la Figura 7.

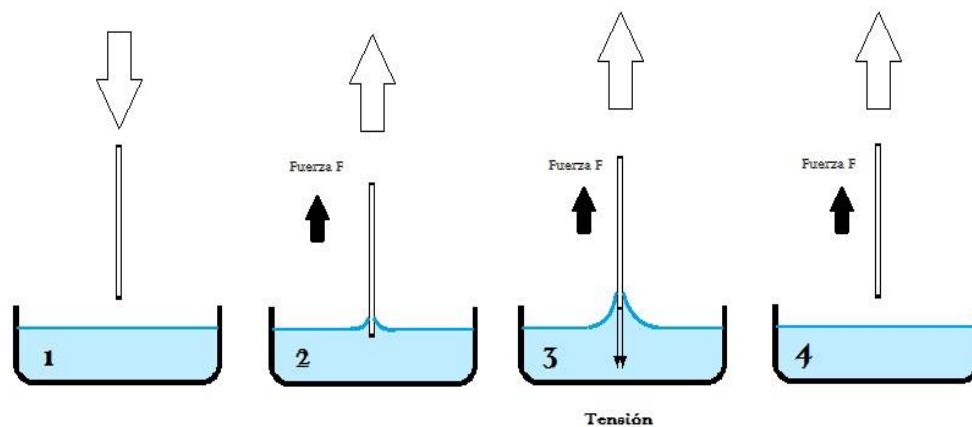


Figura 7. Procedimiento método de la placa de Whilhelmy: (1) Se ubica la placa verticalmente sobre la superficie del fluido de tal manera que se moje la cara inferior. (2) Se procede a generar la fuerza vertical sobre la placa para levantarla. (3) De cada lado de la placa se forma una interfaz curva. (4) La placa se sigue levantando hasta que ocurre el arranque

Justo antes del arranque se realiza la medición de la fuerza que se utiliza para utilizar en la fórmula (Ecuación 27).

En el momento del arranque no hay partes del volumen de la placa que se encuentren dentro del fluido, por lo que no hay que realizar ajustes o correcciones por el empuje

arquimediano que puede llegar a producirse. El método está limitado, en teoría, únicamente por la precisión de la balanza y del conocimiento de la geometría de la placa. A menos que se tenga un control muy preciso de las variables externas (presión inerte), el método no tiene una precisión mejor a $\pm 0,2$ dina/cm.

Método del anillo (Nouy)

Como se mencionaba anteriormente, el procedimiento y el principio entre este método y el de la placa es muy similar. En este caso, la placa se reemplaza por un anillo de radio R compuesto por un alambre de radio r . Resultando como perímetro mojado total resultante como $P=4\pi(R+r)$. Sin embargo como $r \ll R$ (generalmente) entonces el perímetro se puede reescribir como $P=4\pi R$.

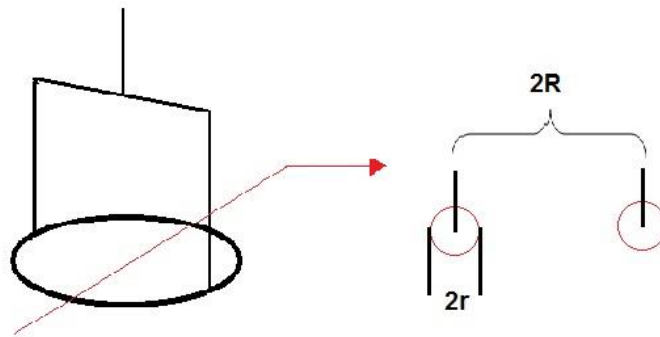


Figura 8. Geometría del anillo del método del anillo de Nouy

Ahora bien, las diferencias respecto al método de la placa son dos principalmente:

A medida que se extrae el anillo del fluido y cualquiera sea el ángulo de contacto, la dirección de la fuerza de tensión varía. Para medir la fuerza máxima que es la que realmente interesa, se debe encontrar la posición de la línea de contacto en la cual la fuerza de tensión es vertical (Figura 9)

Existe la presencia de un efecto hidrostático a causa de que hay una parte del líquido que está colgando del anillo.

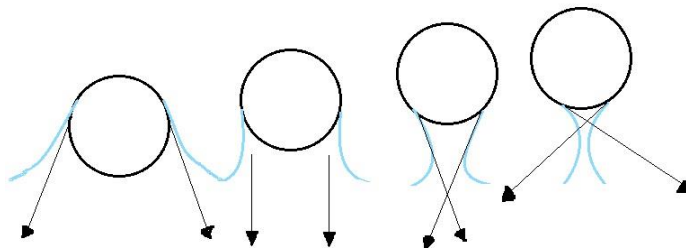


Figura 9. Fuerza de tensión superficial vertical.

También hay patrones, características y dimensiones de los elementos del experimento (como los anillos) recomendadas por otros autores, sin embargo no se expondrán en este trabajo ya que el método no es el más apropiado a menos que el ángulo de contacto del método de la placa no sea aproximadamente 0°.

1.3.8.2.2. Métodos basados sobre la medición de una presión

Para estos métodos el principio aplicado es el de la capilaridad de Laplace. Laplace demostró que existe una diferencia de presión de parte y otra de una interfase curva, lo cual se puede expresar en la siguiente ecuación

Ecuación 28

$$\Delta P = \gamma H$$

H es la curvatura promedio de la interfase en el punto y se obtiene como el promedio entre las dos curvaturas principales C1 y C2 en el punto (Ecuación 29). Puede ocurrir que la gravedad no deforme considerablemente la superficie debido a que la interfase es esférica y con radio pequeño; en este caso la ecuación se puede describir como la Ecuación 30.

Ecuación 29

$$H = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Ecuación 30

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R}$$

A continuación se muestran los principales métodos de esta categoría.

Ascenso capilar

Si se supone que tenemos una superficie completamente mojable por el fluido a estudiar y esta se ingresa en forma de tubo capilar a este, es posible observar que el fluido asciende por el capilar. Cuando este ya se encuentra en estado estático, es posible abstraer algunas ecuaciones que dan cuenta de la ley de la hidrostática y la ley de Laplace anteriormente mencionada.

Entre los dos puntos de estudio A y B, cada uno es un fluido diferente, la ecuación de Laplace indica que:

$$P_A - P_B = \Delta P = \frac{2\gamma}{R}$$

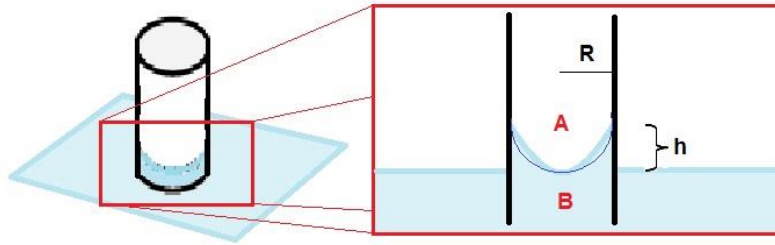


Figura 10. Experimento del ascenso capilar. R es el radio del tubo que funciona como capilar y h la diferencia de alturas entre el fluido dentro del capilar y fuera de este.

Esta aseveración se puede hacer ya que el radio es pequeño y se supone un ángulo de contacto entre el fluido y la superficie mojable igual a cero.

De las ecuaciones de la hidrostática se puede demostrar que:

$$\gamma = \frac{\rho ghR}{2}$$

Presión de burbuja

Una vez más se requiere de un tubo capilar. Sólo que en esta ocasión este se ingresa completamente al fluido. Además se le inyecta un gas al tubo lo cual forma una burbuja. Es posible demostrar que la presión alcanza un máximo cuando el diámetro de la burbuja es del mismo tamaño que el diámetro del capilar. La expresión matemática de esta presión se puede apreciar en la siguiente ecuación:

Ecuación 31

$$P = \frac{2\gamma}{R} + \rho gh$$

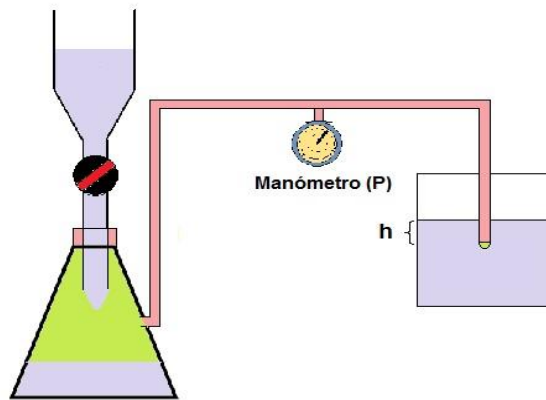


Figura 11. Montaje de la técnica de la presión de la burbuja. Consiste en dejar caer de un gotero un fluido cualquiera a un recipiente como el mostrado a la izquierda de la figura para poder administrar el gas en formas más precisas. Se debe conocer la altura a la que se ingresa el capilar y se mide la presión en el momento en que la burbuja tiene el mismo radio que el capilar.

Este método no es el más apropiado si se están realizando mediciones en condiciones de laboratorio y con los elementos de laboratorio comunes. Adicionalmente, poder establecer el radio exacto de mojabilidad y el radio de la esfera (que muy rara vez alcanza a ser esférica) y abarcar el método como un método dinámico gracias a que produce un área superficial nueva es una tarea bastante extenuante y compleja.

1.3.8.2.3. Métodos basados sobre una deformación

Al igual que los métodos basados en la medición de una presión, los métodos basados en una deformación no solo hacen uso de las ecuaciones de la hidrostática y de la ecuación de Laplace, sino que son la base fundamental del modelo. Las mediciones deben hacerse bajo condiciones de gravedad (o como veremos más adelante, la aceleración) o altura considerables.

En el modelo, conociendo las densidades de las dos fases, la aceleración y midiendo h y las curvaturas de los puntos que se toman en el modelo (H_A y H_B), se puede deducir la tensión. A pesar de sonar tan sencillo, estos modelos presentan mucha imprecisión debido a la medición de las curvaturas. Supongamos el caso más cómodo posible en el que se pueda encontrar una función cartesiana para la curva que describe la superficie del fluido deformado. En este caso, la curvatura se puede encontrar con las derivadas primeras y segundas de la función ya que depende de la variación de la pendiente tangente a cada punto de la superficie. Siendo esta la situación la ecuación que describe la curvatura es la siguiente:

$$C_{\xi} = \frac{-f(\ddot{x})}{\left(\sqrt{1 + f(\dot{x})^2}\right)^3}$$

Sin embargo, suponiendo que existe una ecuación cartesiana que describa la curva, la deducción de esta sería extremadamente muy complicada. En el caso de que no haya una ecuación que describa la curvatura de la superficie, la deducción de las curvaturas se complica aún más ya que para poder determinar el centro de curvatura de una porción de la superficie es necesario realizar artefactos geométricos muy sensible a cualquier tipo de cambio (el cual se hace evidente al hacer medidas tan complicadas, casi obligadas a la imperfección). En la práctica, errores del 100% pueden llegar a ocurrir al realizar estos métodos.

A pesar de existir formas de resolver este tipo de problemas en los que se cambia la medida de una curvatura por la de una altura, no se ve muy recomendable tomar estos métodos para la medición de la tensión superficial en este trabajo, por lo que se describirán los métodos más utilizados de manera muy concisa.

Gota pendiente

Método que generalmente se utiliza para mediciones de tensiones intermedias por las condiciones del experimento y requiere la medición de dos diámetros. Los diámetros permiten encontrar la tensión interfacial por medio de los nomogramas de Andreas, Hauser, entre otros que son herramientas de cálculo analógico.

Hay varias consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de llevar a cabo este experimento: (1) Se debe mantener a la gota muy estable y libre de oscilaciones por lo que la destreza experimental debe ser elevada. (2) para mayor precisión se puede hacer uso de un telemicroscopio o macrofotografía. (3) para poder formar la geometría de equilibrio que mantiene a la gota estática, la tensión no debe ser muy alta ni muy baja así que no funciona para todos los fluidos. Para fluidos con tensión baja se utiliza el método de la gota colocada.

Gota colocada

Cuando la tensión es baja, la deformación gravitacional es considerablemente alta; en este caso se deja la gota en una superficie plana y no mojada por la gota (vidrio, metal, teflón, entre otras). Realmente lo que importa es que el sistema de tensión sea bajo y no la tensión como tal. En otras palabras, importa la relación entre el diámetro de la gota y su tensión, se pueden usar tensiones relativamente altas con tal de que el diámetro de la gota cumpla con una relación baja. Pueden ocurrir dos situaciones diferentes que cambian las ecuaciones de cálculo. La primera de ellas es cuando el diámetro de la gota es mucho más grande que su altura. En este caso se utiliza la Ecuación 32. La segunda es cuando no cumple que el diámetro es mucho mayor a la altura de la gota. En este caso se utiliza la Ecuación 33.

Ecuación 32

$$\gamma = \frac{\Delta\rho gh^2}{2}$$

Ecuación 33

$$\gamma = \frac{\Delta\rho gh^2}{2} \left[1 + \frac{0,61h}{r} \left(1 - \frac{4h^2}{r^2} \right) \right]$$

Gota giratoria

Este método consiste en ingresar el fluido en un tubo con otro fluido más denso. El tubo se hace girar sobre su eje de tal manera que la aceleración centrípeta supera a la gravedad considerablemente lo que hace poder despreciarla. Para el éxito de experimento se recomienda que el fluido, que se encontrará en el centro de tubo, adopte una forma “cilíndrica con puntas esféricas” de tal manera que el largo de la gota sea mayor por lo menos ocho veces más que su espesor (en este caso el radio del cilindro que forma). Cuando se cumplen estas condiciones entonces se puede determinar la tensión como en la expresión de la Ecuación 34, donde r es el radio de la gota, w es la velocidad angular del tubo y K es un coeficiente de corrección para considerar los efectos ópticos que producen las paredes del tubo.

Ecuación 34

$$\gamma = \kappa \frac{\Delta\rho w^2 r^3}{4}$$

Volumen de gota (Tate)

Con un error típico de 20% pero una simplicidad considerablemente buena, este método relaciona la tensión y los parámetros geométricos como se muestra en la Ecuación 35. Consiste en dejar caer gotas de un capilar con la punta mojada siempre bajo las mismas condiciones y a una velocidad constante (se recomienda que las gotas caigan cada 30 segundos). De esta manera después de dejar caer unas cuantas gotas en algún recipiente (entre 15 y 20 gotas) se procede a pesar la cantidad de fluido y a reemplazar todos los valores de la fórmula (donde V es el volumen de una gota, r es el radio del capilar y K es una constante de corrección).

Ecuación 35

$$\gamma = \kappa \frac{V\Delta\rho g}{2\pi r}$$

1.3.8.3. Melt Flow Index (MFI)

Está definido como el peso de un polímero en gramos extruidos en diez minutos a través de un capilar de un diámetro y largo específico en un indexador de flujo de fundido (melt flow indexer) por medio de presión aplicada a través de un peso muerto bajo condiciones térmicas prescritas. Esta no es una propiedad fundamental de los polímeros (Shenoy, Chattopadhyay, & Nadkarni, 1983).

1.3.8.4. Transiciones de fase y Transición vítrea

Para lograr una apropiada extrusión de cualquier material, es necesario conocer la temperatura en la cual estos cambian de fase sólida a líquida.

1.3.8.4.1. Calorimetría diferencial de barrido

Esta técnica experimental dinámica permite determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia cuando se mantiene a una temperatura constante por un tiempo determinado o cuando se cambia la temperatura a una velocidad constante en un intervalo fijo de temperaturas. Para esto se dispone de dos cápsulas, una de referencia que permanece vacía y otra con la muestra a analizar. Cada una se calienta con un sistema independiente, manteniendo la misma temperatura en ambas cápsulas aún si algún proceso endotérmico o exotérmico sucede en la cápsula de la muestra. Se puede determinar la transición vítrea de un material cuando se evidencia un cambio en la capacidad calorífica.

1.3.8.4.2. Análisis térmico diferencial

Esta técnica mide la diferencia en términos de temperatura de una muestra y un material de referencia cuando ambos están sometidos al mismo proceso de calentamiento. Existen dos posibilidades: En caso de que ocurra un proceso endotérmico, la temperatura de la muestra sufre un retraso respecto a la temperatura de la referencia. En caso de ocurrir un proceso exotérmico en la muestra, la respuesta será todo lo contrario. El material de referencia debe tener algunas consideraciones, como lo son el de no exhibir el fenómeno térmico en el rango de temperatura seleccionado, no reaccionar con el termopar o con el porta muestras y presentar una conductividad térmica y capacidad calorífica similar a los de la muestra.

1.3.8.5. Composición

1.3.8.5.1. Espectroscopia Raman UV

Es una técnica fotónica de alta resolución que suministra información acerca de la estructura química de muchos materiales, compuestos orgánicos e inorgánicos, permitiendo su identificación. Se analiza la luz dispersada por la muestra, incidiendo sobre esta un haz de luz monocromático. La pequeña porción de la luz que es dispersada tiene ligeros cambios de frecuencia que son característicos del material analizado e independientes de la luz incidente. La prueba se hace directamente sobre el material, sin ninguna preparación y no siempre lo destruye.

1.3.8.6. Peso molecular:

El peso molecular es una de las variables que define fundamentalmente las propiedades físicas y químicas de un polímero. La gran dificultad que se tiene es lograr definir un solo valor del peso de la molécula para alguna clase de polímeros ya que esta característica queda precisada por condiciones muy difíciles de controlar que generan una aleatorización en el tamaño y por ende en el peso de cada una de las moléculas en solución. Debido a esto se puede generar una distribución de probabilidades en los pesos de las moléculas dependiendo de las condiciones de síntesis. Sin embargo, no todos los polímeros tienen esta función ya que su peso molecular está definido y siempre es el mismo; a este tipo de moléculas se les conoce como moléculas monodispersas tales como las proteínas naturales, los ácidos nucleicos y algunas otras macromoléculas

sintetizadas por el cuerpo. Las moléculas polidispersas generalmente son polímeros sintetizados.

Si se quiere conocer los pesos promedio de la molécula y su función de distribución; es decir, la caracterización completa de la variable de peso molecular del polímero, las técnicas que mejor se desempeñan son la cromatografía por exclusión de tamaño (SEC) y fotometría. Empero, si no se requiere un análisis tan completo y basta con un promedio aproximado del peso molecular se puede recurrir a técnicas experimentales tales como la osmometría.

1.3.8.6.1. Osmometría

La única propiedad coligativa que es posible medir sin mucho problema para las moléculas de alto peso molecular es la de la presión osmótica. Esto se realiza mediante una membrana semipermeable por la cual atraviesan libremente las partículas de disolvente pero no lo hacen así las del polímero.

Es por una tendencia termodinámica que consiste en la disolución del polímero por medio de un flujo neto de diluyente que atraviesa la membrana y pasa a la cámara que contiene el polímero que es posible realizar el experimento. El flujo del diluyente ocasiona un aumento del líquido en la cámara del polímero y por consiguiente se da un aumento en el nivel de volumen de líquido en el tubo de medida. Dicho aumento de nivel es a causa de la presión osmótica, la cual se opone e iguala en ese mismo instante a la presión hidrostática resultante de la diferencia de altura de ambos tubos de medida (Figura 12) (Seymour & Carraher, 1995).

Ecuación 36

$$\pi = \rho g \Delta h$$

Debido a que la presión osmótica ciertamente depende de las propiedades coligativas del polímero, o en otras palabras, de la cantidad de moléculas que tiene la solución; la osmometría podrá entonces aplicarse al cálculo de la presión osmótica de disolventes en relación con disoluciones de polímeros.

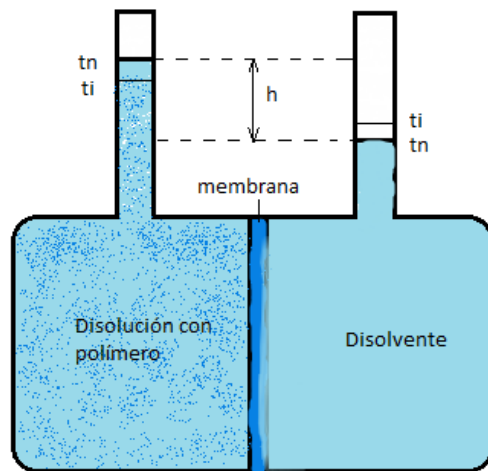


Figura 12. Montaje de un osmómetro estático en donde se puede apreciar la diferencia de altura alcanzada en los tubos debido a la presión osmótica que se crea.

A pesar de que el experimento es de una gran simplicidad de montaje y de medida posee algunas desventajas; la principal es el tiempo que se tarda en alcanzar un equilibrio apropiado para realizar una medición fiable de la presión osmótica, normalmente es de unos cuantos días. Es por esta razón que se han desarrollado instrumentos con técnicas dinámicas para la medición de la presión osmótica los cuales demoran en alcanzar un momento apropiado para realizar la medida de unos pocos minutos.

En los métodos dinámicos se elimina el incremento de altura estática y se reemplaza por una contrapresión que el mismo instrumento genera para evitar el ascenso del disolvente en los tubos de medida (esto debido a que la presión osmótica se va elevando hasta alcanzar prominentes valores). Además se utiliza la ecuación modificada de Van't Hoff (Ecuación 37)

Ecuación 37

$$\pi = \frac{RT}{M_n} C + BC^2$$

Donde C es la concentración y variable independiente, B es una constante virial relacionada con la densidad de energía de cohesión, R es la constante de los gases, T la temperatura y M_n es el peso molecular medio del polímero diluido. Respecto a la constante B, como esta pendiente aumenta cuando el poder de disolución incrementa, sería de mucha utilidad utilizar una disolución diluida de un polímero y un disolvente relativamente suave. Además, para mejor resolución las membranas se pueden fabricar de caucho de hevea, alcohol polivinílico o nitrato de celulosa (Seymour & Carraher, 1995).

1.3.8.6.2. Cromatografía de exclusión por tamaño (SEC)

Las cromatografías en general aprovechan la distribución de los componentes de una mezcla en dos fases: la fase móvil y la fase estacionaria, para separar dichos componentes. Por medio de una columna que contiene la fase estacionaria, se hacen pasar los compuestos que se quieren separar, arrastrados por la fase móvil y analizados por el detector.

En la cromatografía por exclusión de tamaño la fase estacionaria es sólida mientras que la móvil es líquida. Como se mencionó anteriormente, la principal aplicación de esta técnica es la de realizar una caracterización completa a la variable del peso molecular; es decir, la separación de las moléculas en función de su tamaño y por ende de su peso permitiendo así analizar su distribución.

En la actualidad, esta técnica está muy bien desarrollada y permite trabajar a muy altas velocidades y presiones por medio de la implementación de nuevos rellenos, con una distribución de poros muy precisa y una resistencia mecánica adecuada. Según Gutiérrez-Bouzán et al (2009); las principales características de esta técnica son:

- Fase estacionaria inerte permitiendo que la columna no se desactive.
- La muestra no interacciona químicamente con la fase estacionaria ni con la fase móvil.
- Los solutos son generalmente de alto peso molecular (mayores a 2000). Estos se retienen o se eluyen a través de la columna dependiendo de su medida y estructura.

El relleno poroso que está dentro de la columna se comporta como un filtro, del cual se pueden apreciar o diferenciar tres tipos de moléculas: Las permeables que entran en el interior del relleno y quedan retenidas dentro del poro; las fraccionables que son moléculas intermedias que ingresan de una forma parcial al relleno; y por último se encuentran las excluidas que poseen un diámetro superior a la del poro y por ende pasan rápidamente por el relleno.

Respecto a la fase estacionaria, específicamente con el relleno, se debe utilizar un material poroso que cumpla con los siguientes requerimientos: Debe ser uniforme en la granulometría de las esferas y de los poros; Estabilidad química, en especial el pH y la temperatura; máxima inercia frente a los compuestos a separar; resistencia mecánica a las altas presiones y preparación fácil y rápida.

Además de la estabilidad química, también se deben tener en la cuenta los siguientes parámetros: Los resultados se hacen menos reproducibles si la viscosidad aumenta. El aumento de temperatura favorece la resolución de la muestra. Para los valores bajos de fuerza iónica se favorecen las interacciones entre el soluto y la fase estacionaria mientras que para valores altos de fuerza iónica se presentan fenómenos hidrofóbicos. Si se aumenta el flujo del eluyente entonces disminuye la eficacia de la columna.

2. METODOLOGÍA

2.1. Selección de variables

Para la selección de variables se remitió al estado del arte que se puede encontrar sobre diseño de dispositivos de extrusión, y a partir de este se describieron tres modelos del funcionamiento de este tipo de dispositivos. A partir de esta información se construyeron los parámetros más importantes para seleccionar las variables con las cuales se trabajó en el proceso de diseño.

2.2. Selección del polímero

Para seleccionar el polímero se realizó una evaluación de diferentes materiales poliméricos comúnmente usados para el cultivo celular e ingeniería de tejidos dependiendo de las ventajas que cada uno de estos traía. Primero se definió si se quería un material natural o uno sintético para la elaboración de matrices como primer criterio de selección.

2.3. Selección de técnicas de caracterización

Para caracterizar los polímeros según las variables escogidas, se buscaron que técnicas de caracterización sirvieran para determinar estos parámetros del polímero escogido. De esta manera se escogió una para determinar cada variable.

2.4. Caracterización del polímero

Se llevaron a cabo las técnicas seleccionadas que estuvieron disponibles en los laboratorios a los cuales se tenía acceso para el desarrollo del proyecto. Por otro lado, algunas de las variables ya estaban caracterizadas para el polímero usando la técnica escogida, por lo cual se tomaron los resultados de estos estudios.

2.4.1. Tensión superficial

Para esta variable se utilizó la técnica descrita y escogida en la sección de selección de técnicas de caracterización del polímero; es decir el método de la placa de Whilhelmy. La única anotación que se debe hacer es que no se utilizó una balanza de precisión sino la celda de carga descrita anteriormente, sin embargo la variación no debería afectar la medición o la fiabilidad del método.

Para la realización de esta técnica se suspende la placa en el fluido con un perímetro mojado de 52 mm y se procede a aplicar la fuerza vertical con ayuda de la INSTRON 3300. Los datos de fuerza se almacenan con el programa y se encuentra la fuerza máxima que se debe alcanzar antes del arranque. A partir de esta fuerza es posible encontrar la tensión superficial por medio de la Ecuación 27.

Al igual que con la viscosidad, se tomaron varias concentraciones; para este caso fueron del 4%, 8%, 12%, 16%, 20%, 25% y 30%.



Figura 13. Montaje experimental para hallar la tensión superficial en la INSTRON 3300

1.1.1. Viscosidad

Para determinar esta variable se utilizó un viscosímetro de placas paralelas. Al igual que con la tensión superficial, se prepararon diferentes muestras con concentraciones diferentes del polímero y se realizó la técnica con cada una de ellas. Se utilizó un portaobjetos estacionario y otro móvil unido a una celda de carga que registraba la fuerza requerida para desplazarlo con el polímero ubicado entre las placas.

Debido a que no se tenía ningún viscosímetro rotacional a disposición, se optó por realizar una técnica bastante confiable y de alguna manera similar a estos instrumentos. La técnica consistía en ubicar dos placas paralelas, una fija y otra trasladable e instrumentada con una celda de carga con sensibilidad 0,005 N, en una máquina de ensayos universales INSTRON 3300, la cual ejercía el movimiento de traslación de la placa y registraba la fuerza ejercida y la distancia desplazada, transmitiendo estos datos a un computador donde también se configuraron los ensayos realizados (Figura 14). Una vez montadas las placas a una distancia pequeña y conocida, se procede a ubicar el polímero en un área definida anteriormente entre ambas placas y se realizan las medidas.

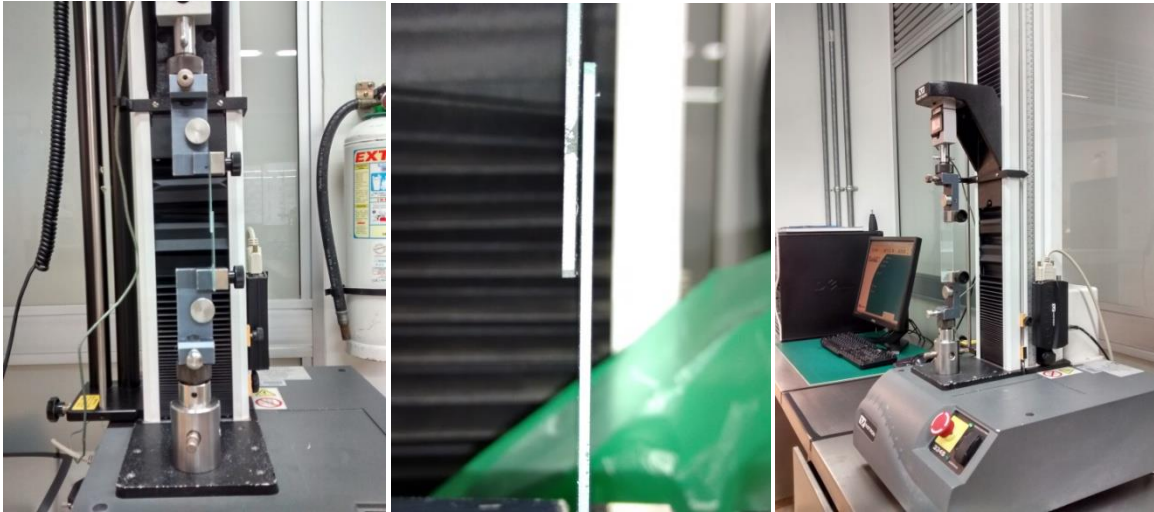


Figura 14. Montaje de las dos placas paralelas en la INSTRON 3300.

Los datos que se obtienen a partir del experimento son los datos de la carga efectuada para desplazar la placa móvil, el tiempo y el desplazamiento de dicha placa. A partir de estos datos es posible encontrar variables reológicas que permitan determinar la naturaleza del fluido, su viscosidad y otros parámetros dependiendo del tipo de fluido sea.

Así, con los datos de tiempo y desplazamiento es posible encontrar una aproximación de la velocidad en el eje de desplazamiento de la placa y con la fuerza aplicada y el área efectiva traducida como una función con parámetros del área inicial y la distancia recorrida de la placa es posible encontrar el esfuerzo cortante.

Ecuación 38

$$v_c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Ecuación 39

$$\tau = \frac{F_c}{A}$$

Para poder observar el comportamiento del fluido y determinar su naturaleza es necesario graficar el esfuerzo cortante de este versus su tasa de cizallamiento que se puede encontrar mediante el gradiente de velocidad en el eje de desplazamiento en la distancia transversal a este eje. Debido a que el espesor entre las placas es muy pequeño, la expresión se puede simplificar como el cociente entre el valor de la velocidad y el espesor.

Ecuación 40

$$\dot{\gamma} = \frac{v_c}{e}$$

El proceso se realizó controlando la variable de temperatura y a diferentes concentraciones del polímero. Se tomaron concentraciones del 8%, 12%, 16%, 20% y 25%, donde los resultados más repetibles se observaron en la concentración del 20%.

1.2. Diseño de concepto

Se utilizó la metodología de Ulrich para realizar el diseño conceptual de este dispositivo.

Esta metodología está constituida por las siguientes etapas sintetizadas para formar y seleccionar el concepto:

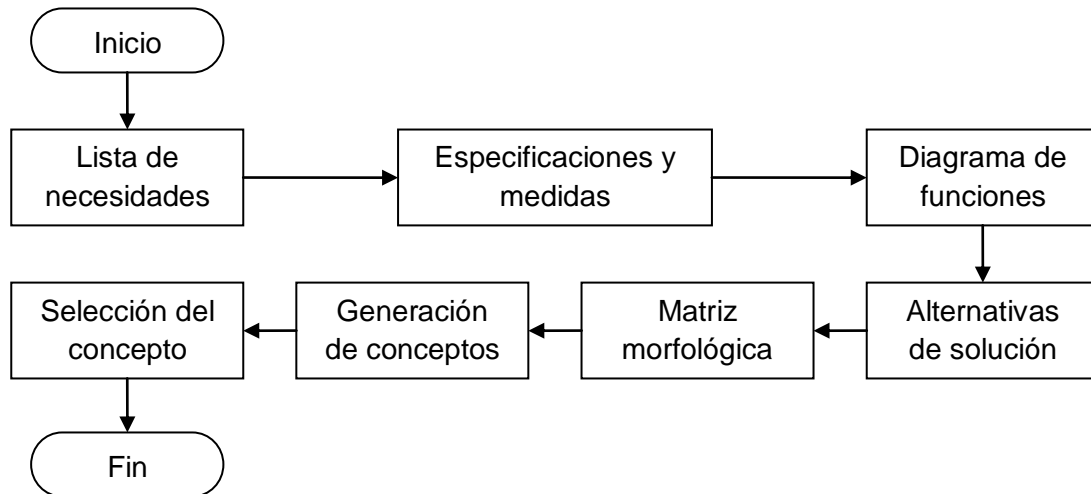


Figura 15. Metodología de Ulrich.

1.3. Elementos de Diseño de detalle

Con los resultados obtenidos de las técnicas de caracterización se desarrollaron modelos matemáticos que representaban parcialmente el comportamiento del fluido en la extrusora, para así determinar las características geométricas más apropiadas de los sistemas de extrusión y de control de temperatura. Adicionalmente se encontraron parámetros que permiten la selección de algunos componentes como el torque mínimo del motor.

1.4. Construcción del boceto mediante de herramientas CAD

Se usó el software Solid Edge ST6 para construir un boceto del dispositivo diseñado.

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

Aquí se inicia la presentación del proyecto realizado, este y los capítulos siguientes deben mostrar el aporte realizado con el fin de cumplir los objetivos específicos y finalmente el objetivo general. Cada capítulo tendrá el nombre más adecuado según el trabajo realizado y debe indicar su contenido, incluso éste capítulo 3 (no dejar el nombre “desarrollo del proyecto” sino el que corresponda según el trabajo).

Especifica la contribución técnica que se aportó, las implicaciones directas o indirectas que se derivan y sus usos mediatos o inmediatos (aumento de conocimiento, solución de un problema, introducción de un nuevo proceso, desarrollo de una innovación, desarrollo de una metodología, incorporación de una nueva materia prima sustitutiva).

2.1. RESULTADOS DE LAS TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

2.1.1. Viscosidad:

A continuación se muestran las gráficas de diferentes pruebas a diferentes temperaturas en una muestra con una concentración del 20% de PVA (Figura 16).

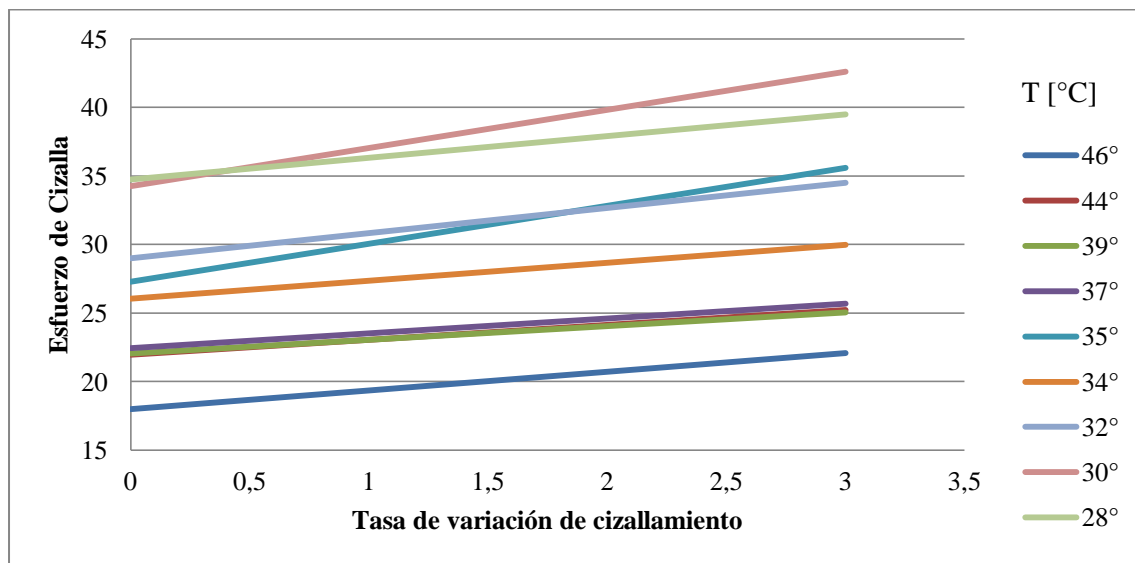


Figura 16. Pruebas de cizallamiento de diferentes temperaturas de solución de PVA al 20%

Es posible observar un comportamiento del fluido de forma lineal y con un intercepto en el eje del esfuerzo de cizalla diferente de cero. A partir de los datos observados, seguramente se puede determinar la naturaleza del polímero y concluir que la hipótesis de que es un fluido plástico Bingham es verdadera.

También es posible determinar los valores del τ_0 y de la viscosidad dependiendo de la temperatura. A continuación se muestran los valores encontrados para estas dos variables.

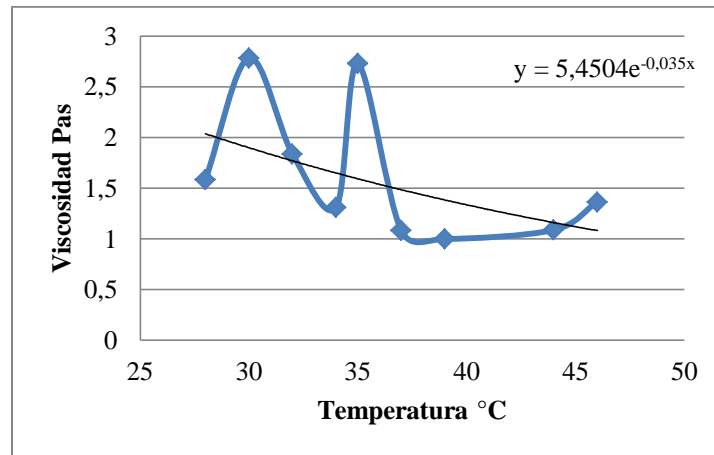


Figura 17. Variación de la viscosidad de una muestra de PVA al 20% con la temperatura.

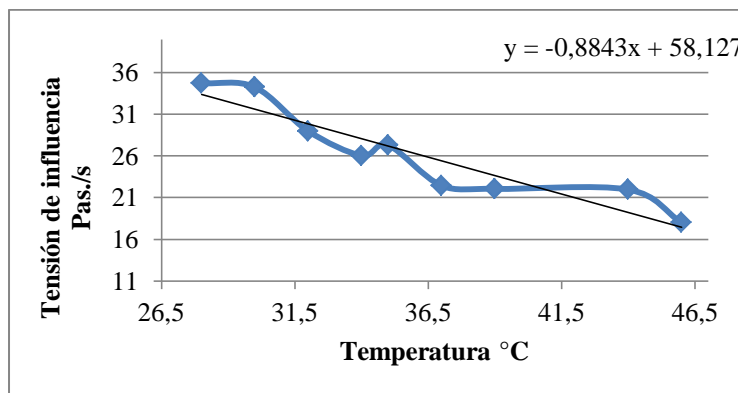


Figura 18. Variación de la componente constante del esfuerzo cortante de una muestra de PVA al 20% con la temperatura.

Se puede ver una dependencia exponencial en ambas variables en cuanto a la temperatura, siguiendo el principio de Arrhenius mencionado en la Ecuación 9. Según esto, los valores de las constantes del fluido serían $A = 5,45$ y $B = 28,57$, y siguiendo el mismo concepto para el valor de τ_0 se podría encontrar otras constantes C y D con valores de $88,54$ y $29,41$ respectivamente.

Adicional al método de las placas paralelas y como forma alternativa, se tomaron las diferentes concentraciones del polímero y se evaluó su viscosidad con dos conos de dimensiones conocidas y con un modelo matemático obtenido a partir de algunas suposiciones que simplificaban el cálculo matemático. Algunas de ellas son: el fluido es

newtoniano, el perfil de velocidad se ve levemente afectado en la zona cónica y es gracias a esto que es posible despreciar la velocidad radial.

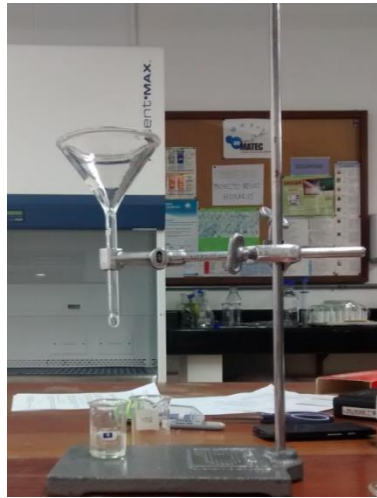


Figura 19. Montaje del cono.

A partir de las suposiciones planteadas inicialmente y a través de un proceso matemático se llegó al modelo descrito en la Ecuación 41.

Ecuación 41

$$\mu = \frac{\rho g t}{4 \left[\frac{H}{(R-r)} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{(R-r)} \right) + h \right]}$$

Donde los valores de R, r, h_2 y h_1 se pueden observar en la siguiente figura.

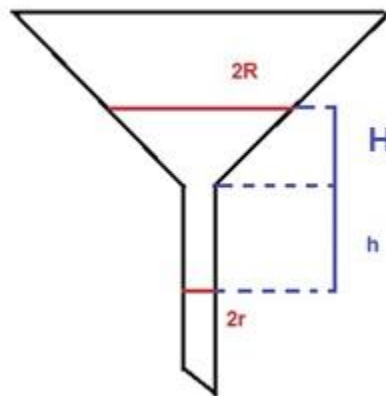


Figura 20. Parámetros geométricos del cono con los cuales se construye el modelo de la **Ecuación 41**

Cabe resaltar que ambos conos se tomaron con un ángulo de 60° a pesar de que este no se incluyó en el modelo por el mismo hecho que se hizo la simplificación que la velocidad radial no afectaba considerablemente el flujo del polímero a través del capilar cónico.

Los valores geométricos de los conos se tomaron con un pie de rey electrónico y se anotaron para realizar los experimentos en condiciones repetibles. Dichos valores son los siguientes:

- $R_1=25,97\text{mm}$ $R_2=25,97\text{mm}$
- $r_1=4,51\text{mm}$ $r_2=5,26\text{mm}$
- $H_1=21,68\text{mm}$ $H_2=19,83\text{mm}$
- $H_1= 15,00\text{mm}$ $h_2=15,24\text{mm}$

A partir de estos valores se encontraron las constantes de cada cono y se procedió a realizar las mediciones. Estas mediciones consistían en tomar el tiempo que se demoraba el fluido, a diferentes concentraciones, en pasar ambas marcas denotadas en la Figura 20 por las líneas rojas. Posteriormente se remplazaban los datos del tiempo junto con los geométricos y la densidad en una tabla de Excel para obtener los valores de la viscosidad. Es necesario aclarar que para las concentraciones más bajas del fluido el tiempo era muy difícil medirlo debido a que, por su falta de viscosidad, no tardaba mucho en pasar ambas marcas y las mediciones se veían afectadas; por esta razón se descartaron los datos de las concentraciones de 4% y 8%; el resto se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Viscosidad y densidad medida con el método del cono (dos conos) y diferentes concentraciones.

| Concentración | Densidad (Kg/L) | Viscosímetro 1 | | | Viscosímetro2 | | |
|---------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|
| | | Tiempo (s) | μ_i (Pa*s) | $\bar{\mu}$ (Pa*s) | Tiempo (s) | μ_1 (Pa*s) | $\bar{\mu}$ (Pa*s) |
| 20% | 1,0179 | 90,3 | 27,59638 | 31,68 | 56,85 | 15,16474 | 14,84 |
| | | 103,58 | 31,65485 | | 56,74 | 15,13540 | |
| | | 117,16 | 35,80500 | | 53,27 | 14,20978 | |
| 16% | 0,9566 | 44,28 | 13,53231 | 13,84 | 18,13 | 4,83618 | 5,66 |
| | | 44,68 | 13,65455 | | 21,07 | 5,62042 | |
| | | 46,87 | 14,32383 | | 24,41 | 6,51137 | |
| 12% | 0,9376 | 15,14 | 4,62690 | 4,80 | 6,5 | 1,73388 | 1,80 |
| | | 16,33 | 4,99057 | | 6,75 | 1,80056 | |
| | | 15,65 | 4,78276 | | 7,01 | 1,86992 | |
| 25% | 1,06105 | 155,01 | 47,37225 | 47,33 | 75,39 | 20,11029 | 20,27 |
| | | 154,73 | 47,28668 | | 76,56 | 20,42239 | |

En una primera instancia se puede observar la diferencia entre los datos tomados entre ambos viscosímetros. A pesar de que los viscosímetros son diferentes y tienen medidas diferentes, el valor de la viscosidad del polímero a las mismas condiciones de laboratorio y temperatura igual debería ser la misma sin importar dicha diferencia. Por esta razón se puede comenzar a ver que el modelo posee sus fallas, quizá debido a las simplificaciones realizadas en un comienzo. La diferencia se puede observar mejor en la Figura 21.

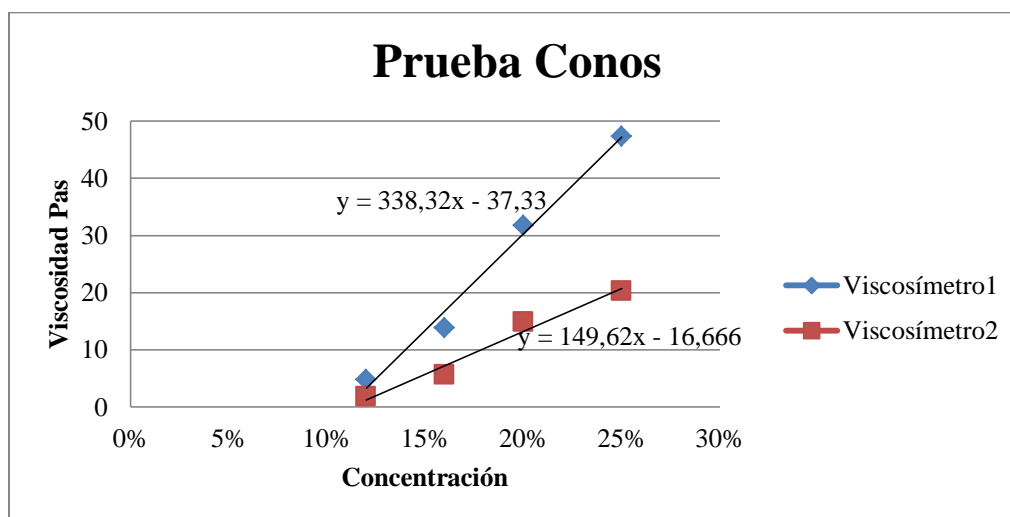


Figura 21. Variación de la viscosidad del PVA a diferentes concentraciones según el método del cono y utilizando dos conos diferentes.

Luego de tomar los datos con diferentes concentraciones se procedió a tomar los datos de la viscosidad del polímero a una concentración del 20% con diferentes grados de temperatura y se obtuvo lo siguiente:

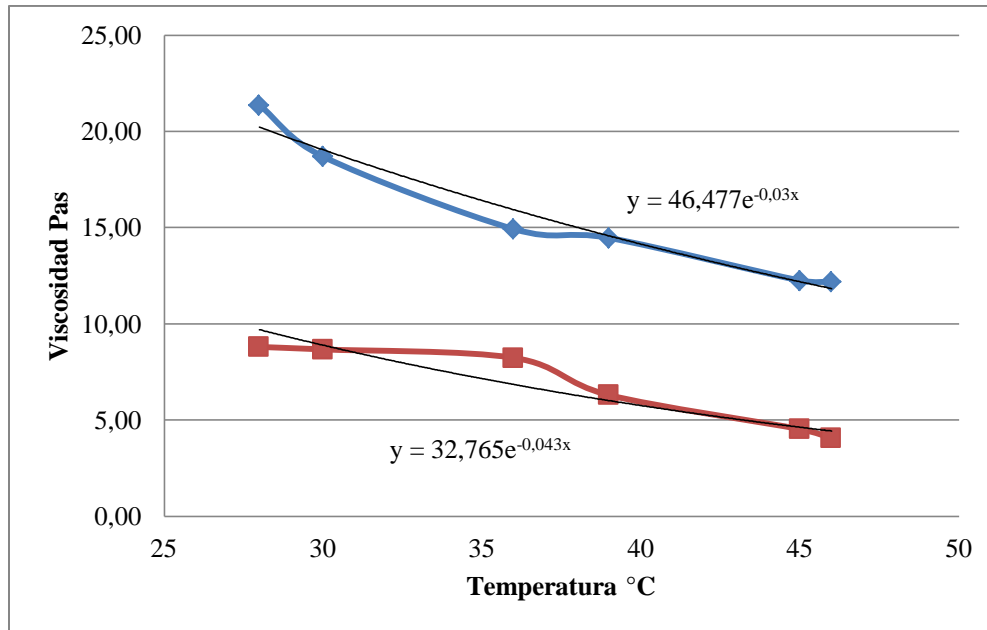


Figura 22. Variación de la viscosidad de una muestra de PVA al 20% a diferentes valores de temperatura y utilizando el método del cono con diferentes conos.

Sabiendo que los datos de la línea azul son del cono 1 y los datos de la línea roja son del cono 2, existen varias anotaciones que se pueden rescatar de dicha gráfica (Figura 22). Como primera anotación, se puede observar un claro comportamiento exponencial en ambas líneas de tendencia siguiendo así la lógica planteada en el modelo de la viscosidad dependiente de temperatura. Como segunda anotación, se vuelve a resaltar la considerable diferencia que se encuentra entre las medidas tomadas con los dos viscosímetros y por último anotar que los valores encontrados en ambos conos varían significativamente de los valores de viscosidad obtenidos en el método clásico de las dos placas paralelas cuya confiabilidad es bastante acertada a diferencia de este método.

A partir de estos resultados es posible concluir que la validación del modelo del cono resultó en el efugio inminente de este. La hipótesis más fuerte que se tiene para que el método no haya sido suficientemente efectivo es que el fluido no es newtoniano y por ende la construcción del modelo matemático carece de ciertas condiciones que aproximan el modelo más a la realidad pero que requerirían de más datos para poderse implementar. Otra de las hipótesis consiste en que la decisión de suponer que la velocidad radial no afecta el flujo fue apresurada por lo que el modelo, a pesar de ser mucho más complicado, podría ser más exacto.

2.1.2. Tensión superficial

A continuación se muestran los resultados de los valores de las tensiones superficiales de estas concentraciones a pesar de que se ha escogido la concentración del 20% ya que es la más apropiada (teniendo en cuenta los resultados de viscosidad que tiene más peso dentro del modelo de extrusión).

Tabla 4. Tensión superficial de diferentes muestras de PVA a diferente concentración.

| Concentración | Tensión superficial promedio [N/m] | Desviación estándar |
|---------------|------------------------------------|---------------------|
| 4% | 0,096 | 0,008 |
| 8% | 0,116 | 0,004 |
| 12% | 0,134 | 0,010 |
| 16% | 0,168 | 0,007 |
| 20% | 0,223 | 0,005 |
| 25% | 0,240 | 0,039 |
| 30% | 0,264 | 0,037 |

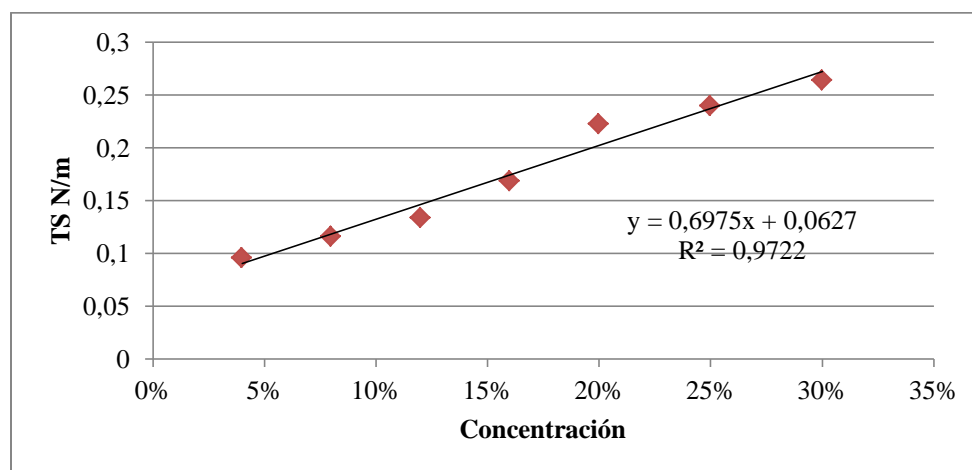


Figura 23. Variación de la tensión superficial del PVA a diferentes concentraciones.

La Tensión superficial del polímero aumenta linealmente con el incremento de la concentración de la solución. El valor para la concentración de 20% es de $TS=0,223 \pm 0,005$

2.1.3. Transiciones de fase

Como se mencionó anteriormente, esta es una de las variables obtenidas a través de una revisión del estado de arte. Una de las razones por las cuales se hace esto es debido a que no se dispone de los instrumentos de caracterización para poder realizar las pruebas y adicionalmente se ha encontrado que existen estudios en los cuales han determinado los valores de estas variables del polímero.

En un estudio realizado en la Universidad del Valle de Cali, Colombia, se caracterizaron las propiedades térmicas y eléctricas de materiales poliméricos compuestos a base de poli (vinil alcohol) o PVA. En dicho estudio se tomaron varias muestras de PVA con un peso molecular promedio de 115.500 g/mol y se procedió a elaborar membranas de polielectrolitos mediante un método propuesto por otro autor y que no se describirá en

este documento debido a que no es significativo para el estudio. (Gonzales & Vargas, 2011)

Para la caracterización térmica se realizó el análisis térmico mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC), la cual fue la técnica propuesta para determinar las transiciones, y análisis térmico gravimétrico (TGA), solo se mostraran los resultados del DSC.(Gonzales & Vargas, 2011)

En el DSC se empleó un *TA instruments* modelo 2010 con velocidad de calentamiento de 5°C/min a 10°C/min y con atmósfera de nitrógeno (flujo de 50 mL/minuto). Se caracterizaron dos grupos: El grupo A, que se calentó en un intervalo de 30°C a 90°C a una velocidad de 10°C/min; y el grupo B, en el mismo intervalo y a una velocidad de 5°C/min. Los resultados del estudio se muestran a continuación.(Gonzales & Vargas, 2011)

En la Figura 24 se pueden observar dos curvas calorimétricas representativas correspondientes a las membranas de las muestras A y B mencionadas. Se observa una inflexión cerca de 106°C para las muestras A y de 93°C para la muestra B las cuales hacen referencia a la temperatura de transición vítrea (T_g) de las membranas. Gonzales y Vargas atribuyen el que haya una diferencia entre ambas temperaturas al hecho de que existe una hidratación remanente después del secado al que se sometieron ambos grupos (El del grupo B fue menos tiempo que el del grupo A). Por otro lado, también se observa un pico endotérmico alrededor de 190°C para A y de 194°C para el grupo B, haciendo referencia a la fusión cristalina de las membranas. (Gonzales & Vargas, 2011)

Además, un estudio realizado en la Escuela de Ingeniería de Antioquía en el cual se caracterizaron hidrogeles de PVA semicristalino en concentración de 7,5 %a 12% y por técnica de congelamiento/descongelamiento determinó algunas características relevantes conexas a las transiciones de fase, también mediante calorimetría diferencial de barrido.

En la Figura 25 es posible observar diferentes termogramas DSC para los hidrogeles de PVA para diversos ciclos y concentraciones. Lo que se indica en dicha figura es que existe la presencia de agua congelable (que se funde alrededor de los 0°C) en los hidrogeles parcialmente hinchados. Debido a que el agua no toma parte en los vínculos de hidrógeno con las moléculas del polímero se clasifica en agua libre; el agua intermedia interactúa de una forma muy débil con las moléculas del polímero, y el agua no congelable se describe como las moléculas de agua que están ligadas al polímero por medio puentes de hidrógeno.(Echeverri, Vallejo, & Londoño, 2009)

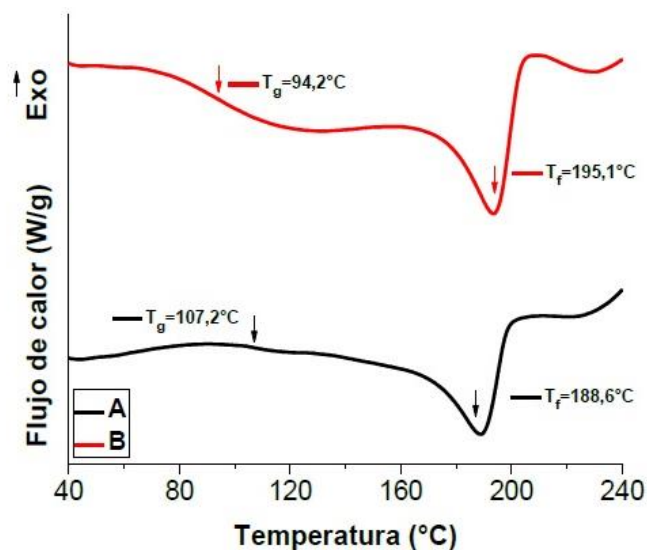


Figura 24. Figura tomada de estudio realizado por Gonzales y Vargas en la cual se muestran las curvas calorimétricas representativas en un análisis térmico mediante calorimetría diferencial de barrido y las temperaturas de las transiciones de fase. (Gonzales & Vargas, 2011)

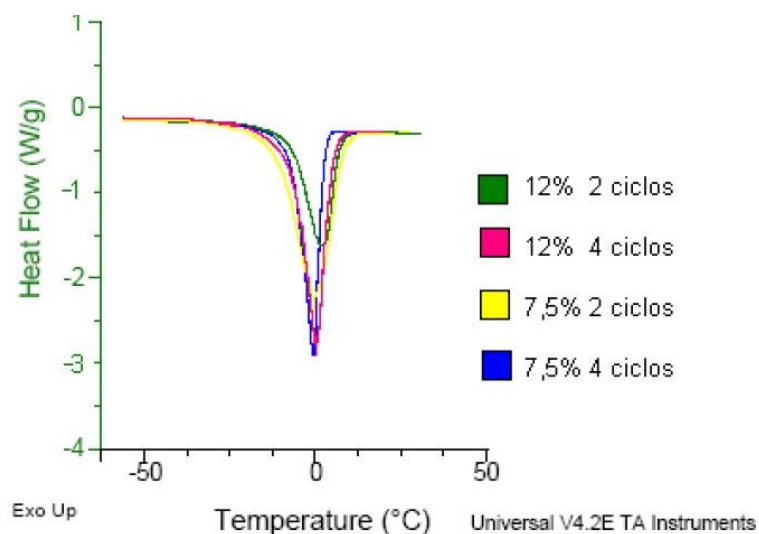


Figura 25. Figura tomada de estudio realizado por Claudia Echeverri, Catalina Vallejo y Marta Londoño en la cual se muestra las curvas calorimétricas representativas en un análisis térmico mediante calorimetría diferencial de barrido realizada en diferentes muestras de hidrogeles de PVA a diferentes concentraciones y número de ciclos de congelamiento/descongelamiento. (Echeverri et al., 2009).

2.1.4. Peso molecular

Esta variable es una de las más sencillas debido a que ya se encuentra muy bien descrita en diferentes apartados de diversos artículos. Varía dependiendo del grado de pureza del polímero y adicionalmente es posible encontrarlo con la referencia del polímero que se

busca; es decir que es uno de los parámetros al comprar el polímero por lo que no haría falta caracterizarlo ya que viene implícito en la compra.

Para las pruebas realizadas en el laboratorio se utilizó un rango de peso molecular de entre 80000 y 90000 g/mol.

2.2. DISEÑO DE CONCEPTO

2.2.1. Lista de necesidades

Tabla 5 Lista de necesidades.

| NUM. | TIPO | NECESIDAD | IMP. |
|------|-------------|--|------|
| 1 | Dispositivo | Base de impresión nivelada | 3 |
| 2 | Dispositivo | Movimiento preciso | 5 |
| 3 | Proceso | Flujo constante y control de velocidad | 5 |
| 4 | Proceso | Estabilidad de la matriz | 4 |
| 5 | Dispositivo | Curva de aprendizaje rápida | 1 |
| 6 | Proceso | Adhesión entre capas del polímero | 2 |
| 7 | Dispositivo | Contaminación reducida del medio exterior | 4 |
| 8 | Dispositivo | Control de temperatura interna | 5 |
| 9 | Dispositivo | Tamaño reducido | 1 |
| 10 | Dispositivo | Mantenimiento fácil | 2 |
| 11 | Dispositivo | Contaminación por residuos de los materiales de la extrusora reducidos al mínimo | 3 |
| 12 | Dispositivo | Proceso de impresión visible al usuario | 1 |
| 13 | Dispositivo | Seguridad para el usuario | 2 |
| 14 | Proceso | Mínimo desperdicio de material | 1 |
| 15 | Dispositivo | Control de temperatura de la boquilla | 4 |
| 16 | Dispositivo | Compatible con CAM | 5 |

2.2.2. Especificaciones del producto

Tabla 6 Lista de medidas.

| NUM. | N° NECESIDAD | MEDIDA | IMP. | UNIDADES | Rango |
|------|--------------|---|------|--------------------|----------|
| 1 | 3 | El dispositivo cuenta con actuadores que regulan el flujo de material | | mm ³ /s | 0,1-1 |
| 2 | 3 | La velocidad de avance de la boquilla es ajustable | | mm/s | 0-50 |
| 3 | 9 | Las dimensiones del dispositivo no supera las medidas | | cm | 50x40x70 |
| 4 | 5 | El dispositivo cuenta con un manual de usuario | | Adimensional | si - no |
| 5 | 5 | El dispositivo cuenta con una interface amigable | | Subjetivo | |
| 6 | 5 | El dispositivo tiene un tiempo estimado para entrenamiento de uso | | h | 4-6 |
| 7 | 8, 15 | Temperatura interna | | °C | 39-44 |
| 8 | 13 | Seguridad | | Adimensional | low-high |
| 9 | 7, 11 | El interior del dispositivo está aislado de contaminantes externos | | Adimensional | si-no |
| 10 | 1 | El dispositivo posee un sistema de ajuste de inclinación | | Grados | 0 |
| 11 | 10 | El sistema posee un tiempo de limpieza rápido | | min | 0-10 |
| 12 | 14 | El sistema tiene genera patrones con mínimo desperdicio | | Adimensional | 5% |
| 13 | 2 | La tolerancia en el desplazamiento de la boquilla es mínimo | | µm | 0-500 |
| 14 | 2 | La tolerancia en la extrusión de la boquilla es mínimo | | µm | 0-500 |
| 15 | 10 | El sistema dispone de piezas para facil acceso | | Adimensional | si-no |
| 16 | 16 | El sistema es compatible con CAM | | Adimensional | si-no |
| 17 | 4 | El polímero impreso tiene un asentamiento mínimo | | µm | 0-100 |
| 18 | 4, 6 | El polímero impreso soporta la presión de 25 capas | | Pas | 0-134,75 |
| 19 | 6 | El polímero permite una adherencia entre capas | | Adimensional | si-no |
| 20 | 12 | El sistema permite la visualización del proceso de impresión | | Adimensional | si-no |

Tabla 7 Matriz de necesidades-medidas.

| NUM. | NECESIDAD | MEDIDA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | |
| | | El dispositivo cuenta con actuadores que regulan el flujo de material | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | La velocidad de avance de la boquilla es ajustable | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Las dimensiones del dispositivo no supera las medidas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El dispositivo cuenta con un manual de usuario | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El dispositivo cuenta con una interface amigable | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El dispositivo tiene un tiempo estimado para entrenamiento de uso | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Temperatura interna | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Seguridad | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El interior del dispositivo está aislado de contaminantes externos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El dispositivo posee un sistema de ajuste de inclinación | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El sistema posee un tiempo de limpieza rápido | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El sistema tiene genera patrones con mínimo desperdicio | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | La tolerancia en el desplazamiento de la boquilla es mínimo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | La tolerancia en la extrusión de la boquilla es mínimo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El sistema dispone de piezas para fácil acceso | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El sistema es compatible con CAM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El polímero impreso tiene un asentamiento mínimo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El polímero impreso soporta la presión de 25 capas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El polímero permite una adherencia entre capas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | El sistema permite la visualización del proceso de impresión | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

2.2.3. Diagrama de caja negra



Figura 26. Caja negra donde se ven las entradas y salidas del sistema.

2.2.4. Diagrama de funciones

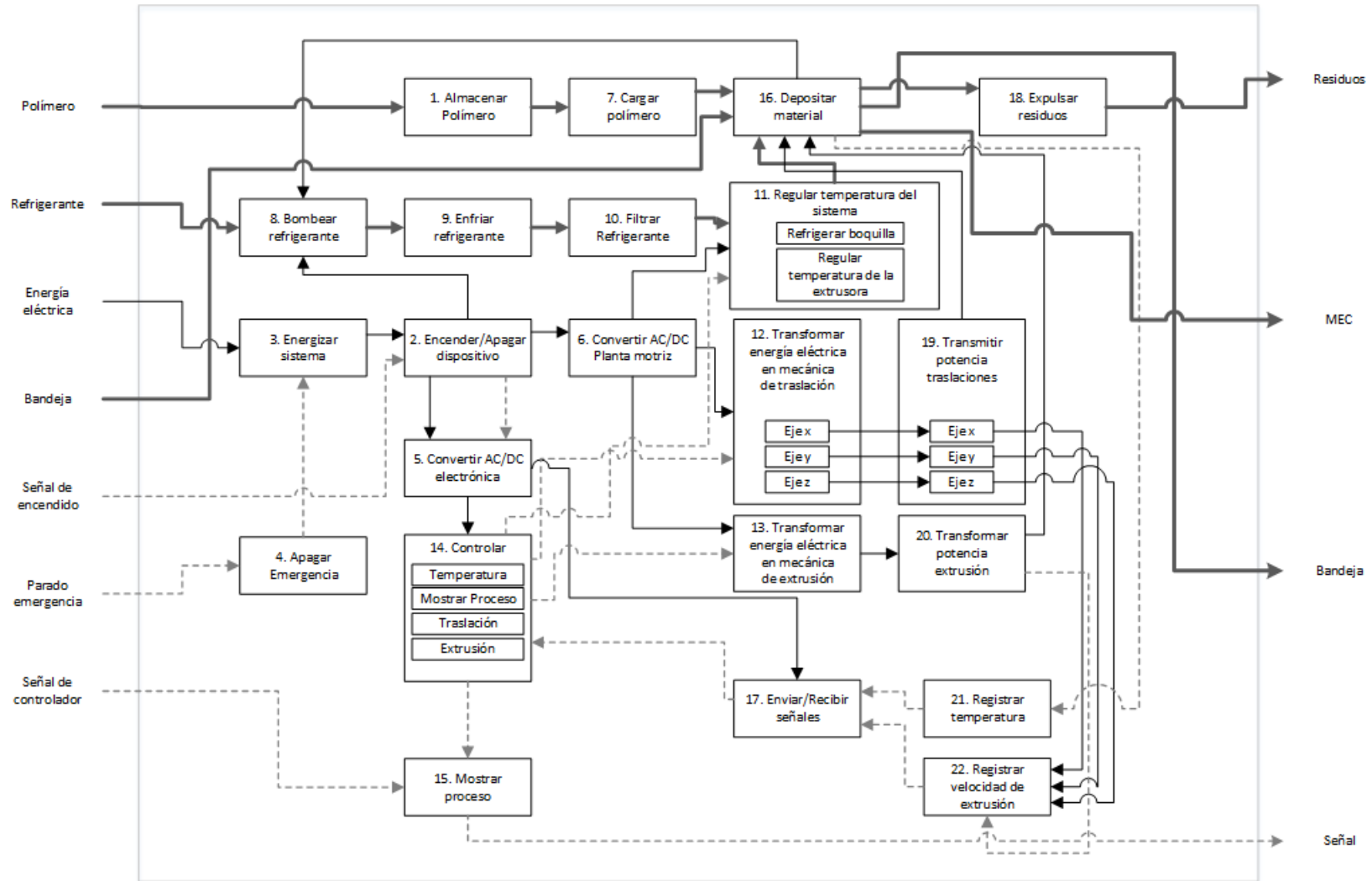
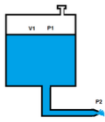
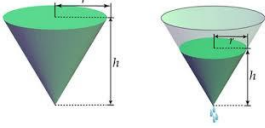


Figura 27. Diagrama de funciones de la impresora 3D.

2.2.5. Alternativas de solución

1. Almacenar polímero


Tabla 8. Alternativas de solución para almacenar polímero.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|--|
|  <p>Imagen 1 Tanque (Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid)</p> | <p>Tanque: Los tanques de almacenamiento son depósitos de cualquier material (generalmente de acero) diseñados para procesar o contener fluidos, usualmente a presión atmosférica o una presión interna relativamente baja.</p> |
|  <p>Imagen 2 Cono (Taringa)</p> | <p>Cono: Dispositivo de almacenamiento cónico para facilitar la salida y ahorro de material.</p> |

2. Encender/Apagar dispositivo



Permitir o detener el paso de energía al sistema.

Tabla 9. Alternativas de solución para encender/apagar el dispositivo

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|---|
|  <p>Imagen 3 Interruptor (MCI Electronics)</p> | <p>Interruptor: Permite o interrumpe el paso de corriente eléctrica para apagar o encender el dispositivo.</p> |

3. Energizar sistema

Tabla 10. Alternativas de solución para energizar el sistema

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|--|
|  <p>Imagen 4 Toma de corriente (PCEL)</p> | <p>Toma de corriente: Conexión a la red eléctrica de la zona.</p> |
|  <p>Imagen 5 Batería (Marion County, Oregon)</p> | <p>Batería: Fuente de energía propia e independiente. Debe recargarse o cambiarse periódicamente.</p> |

4. Apagar en emergencia

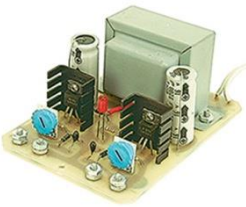
Permite detener el proceso en caso de alguna eventualidad adversa.

Tabla 11. Alternativas de solución para apagar en emergencia el sistema.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|---|
|  <p>Imagen 6 Botón de emergencia (Direct Industry, 2015)</p> | <p>Botón de emergencia: Es un componente importante de seguridad de muchos equipos electrónicos. Consiste en un botón conectado en serie con el circuito de control de tal manera que al pulsarlo se interrumpe el circuito y se elimina el poder que mantiene el circuito energizado.</p> |

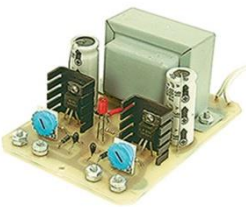
5. Convertir AC/DC para electrónica

Tabla 12. Alternativas de solución para convertir la corriente alterna en directa para la electrónica

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|--|
|  <p data-bbox="321 695 820 722">Imagen 7 Fuente de voltaje (Hacedores, 2015)</p> | <p data-bbox="868 422 1398 562">Fuente de voltaje: Transforma el voltaje de la red eléctrica a un voltaje adecuado para el uso de los componentes electrónicos.</p> |

6. Convertir AC/DC para planta motriz

Tabla 13. Alternativas de solución para convertir la corriente alterna en directa para la planta motriz

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|--|
|  <p data-bbox="321 1276 820 1304">Imagen 8 Fuente de voltaje (Hacedores, 2015)</p> | <p data-bbox="868 1024 1398 1165">Fuente de voltaje: Transforma el voltaje de la red eléctrica a un voltaje adecuado para el uso de la planta motriz.</p> |



7. Cargar polímero

Tabla 14. Alternativas de solución para cargar el polímero

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|--|
|  <p data-bbox="316 556 755 588">Imagen 9 Tornillo de Arquímedes (allbiz)</p> | <p data-bbox="885 388 1396 609">Tornillo de Arquímedes: Tornillo que permite el desplazamiento lineal del fluido por medio de su rotación. Generalmente se utiliza con cierto ángulo para sacar agua de diferentes lugares.</p> |
|  <p data-bbox="316 1008 755 1039">Imagen 10 Pistón (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="885 646 1396 787">Pistón: Elemento que desplaza el fluido por medio de su movimiento lineal y a través de un espacio definido.</p> |



8. Bombear refrigerante

Tabla 15. Alternativas de solución para bombear el refrigerante.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|---|
|  <p data-bbox="318 642 797 669">Imagen 11 Ventilador (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="873 386 1401 569">Ventilador: Dispositivo neumático o máquina de fluido que generalmente consiste en un eje giratorio con aspas que permiten el crecimiento de algún fluido.</p> |
|  <p data-bbox="318 909 764 936">Imagen 12 Electrobomba (Emaresa, 2013)</p> | <p data-bbox="873 701 1401 884">Electrobomba: Dispositivo que sirve para transportar fluidos con ayuda de un motor eléctrico. Se diferencia de las motobombas ya que estas funcionan con un motor de combustión interna.</p> |


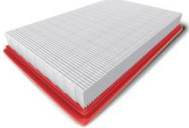

9. Enfriar refrigerante

Tabla 16. Alternativas de solución para enfriar el refrigerante.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|---|---|
|  <p data-bbox="318 1419 849 1472">Imagen 13 Celda de Peltier (Electrónica 60 Norte)</p> | <p data-bbox="873 1197 1401 1379">Celda de Peltier: Elemento semiconductor que utiliza el efecto termoeléctrico de Peltier para producir una diferencia de temperaturas en las dos caras de este.</p> |
|  <p data-bbox="318 1743 683 1770">Imagen 14 Radiador (Ali Express)</p> | <p data-bbox="873 1503 1401 1686">Radiador: Dispositivo que permite el intercambio de calor entre dos objetos, siendo uno de ellos el aire ambiente. Esta tarea la realiza por medio de métodos de convección o radiación.</p> |



10. Filtrar refrigerante

Tabla 17. Alternativas de solución para filtrar el refrigerante

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|--|
|  <p>Imagen 15 Filtro HEPA (Humidificadores y Deshumidificadores, 2015)</p> | Filtro HEPA: Filtro de aire diseñado para satisfacer unos estándares de alta eficiencia. Dotado de una malla compuesta por fibras aleatoriamente dispuestas y hechas de fibra de vidrio y con diámetros del orden de micrómetros. |
|  <p>Imagen 16 Filtro de papel (Alba Parada, 2014)</p> | Filtro de papel: Separa el aire que pasa a través de él de residuos sólidos como polvo y bacterias. |
|  <p>Imagen 17 Filtro de retorno (Destaco Ingenieros, 2012)</p> | Filtro de retorno: Sistemas que se utilizan para el control de la contaminación de partículas externas o producidas internamente por procesos del sistema. |

11. Regular temperatura del sistema
11.1. Refrigerar boquilla

Tabla 18. Alternativas de solución para refrigerar la boquilla.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|---|
|  <p data-bbox="318 680 797 709">Imagen 18 Ventilador (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="870 424 1399 604">Ventilador: Dispositivo giratorio conformado por aspas que permiten, con su dinámica, el flujo de un fluido por medio de las presiones producidas por estas.</p> |
|  <p data-bbox="318 951 704 980">Imagen 19 Manguera (Homecenter)</p> | <p data-bbox="870 747 1399 848">Manguera: Tubo largo de material flexible que permite el paso de un fluido a través de él.</p> |






11.2. Regular la temperatura de la extrusora

Tabla 19. Alternativas de solución para regular la temperatura de la extrusora.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|---|
|  <p data-bbox="316 615 735 646">Imagen 20 Resistencia (Corima, 2015)</p>  <p data-bbox="316 884 849 940">Imagen 21 Relé de estado sólido (WebElectronicos, 2015)</p> | <p data-bbox="868 384 1401 569">Resistencia: Elemento compuesto de un material que se calienta con la tensión que se le suministra y que transmite este calor generalmente por convección a otro sistema vecino.</p> <p data-bbox="868 667 1401 852">Relé de estado sólido: Dispositivo interruptor que intercambia el paso de corriente eléctrica cuando una pequeña carga es destinada en los terminales de control que este dispone.</p> |



12. Transformar energía eléctrica en energía mecánica de traslación
 - 12.1. Transformar energía eléctrica en energía mecánica de traslación para el eje x
 - 12.2. Transformar energía eléctrica en energía mecánica de traslación para el eje y
 - 12.3. Transformar energía eléctrica en energía mecánica de traslación para el eje z

Tabla 20. Alternativas de solución para transformar la energía eléctrica en energía mecánica de traslación

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|---|--|
|  <p>Imagen 22 Motor lineal (Revista TOPE)</p> | <p>Motor lineal: Es un motor eléctrico que posee distribuidos su estator y su rotor de tal forma que se produce una fuerza lineal en sentido de su longitud en vez de un torque.</p> |
|  <p>Imagen 23 Motor paso a paso (Celis Vargas, 2010)</p>  <p>Imagen 24 Correa (Direct Industry, 2015)</p> | <p>Motor paso a paso con correa: Es un sistema compuesto de un motor que tiene la facilidad de ubicarse en cualquier posición y una correa.</p> |
|  <p>Imagen 25 Motor paso a paso (Celis Vargas, 2010)</p>  <p>Imagen 26 Engranajes (Direct Industry, 2015)</p> | <p>Motor paso a paso con engranes: Es un sistema compuesto de un motor que tiene la facilidad de ubicarse en cualquier posición y una serie de piezas que encajan y se mueven conjuntamente. A través de estos se conecta un tornillo sin fin que mueve linealmente algún elemento.</p> |

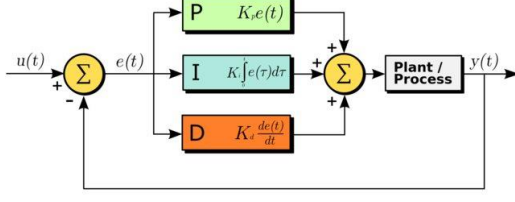
13. Transformar energía eléctrica en energía mecánica para extrusión

Tabla 21. Alternativas de solución para transformar la energía eléctrica en energía mecánica para extrusión.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|--|
|  <p data-bbox="318 919 755 949">Imagen 27 Pistón (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="870 478 1399 625">Motor DC y pistón: Sistema compuesto por un motor acoplado a la extrusora de tal manera que transmita el movimiento linealmente.</p> |
|  <p data-bbox="318 1102 768 1131">Imagen 28 Tornillo de Arquímedes (allbiz)</p> | <p data-bbox="870 953 1399 1100">Motor DC y tornillo: Sistema compuesto por un motor acoplado a un tornillo de tal manera que transmita el movimiento rotacional de este.</p> |

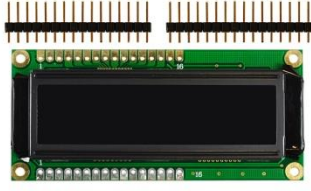

- 14. Controlar
 - 14.1. Controlar temperatura
 - 14.2. Controlar mostrar progreso
 - 14.3. Controlar traslación

Tabla 22. Alternativas de solución para controlar.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|---|--|
|  <p>Imagen 29 Control PID (The MathWorks, Inc., 2014)</p> | <p>Control PID: Mecanismo de control por retroalimentación que tiene como objetivo calcular la desviación entre un valor medido y uno deseado. Esto lo hace mediante tres parámetros diferentes que son el proporcional, el integral y el derivativo.</p> |



15. Mostrar progreso

Tabla 23. Alternativas de solución para mostrar el progreso.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|---|
|  <p>Imagen 30 LCD (Gravitech, 2014)</p> | <p>LCD: Display de cristal líquido formado por pixeles delante de una pantalla luminosa de bajo gasto energético.</p> |
|  <p>Imagen 31 Panel mount display (4D Systems, 2014)</p> | <p>Panel mount display: Display inteligente que puede ser táctil y puede programarse para mostrar información de diversas maneras.</p> |

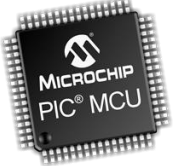

16. Depositar material

Tabla 24. Alternativas de solución para depositar el material

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|--|
|  <p>Imagen 32 Aguja (TotClinic)</p> | <p>Aguja: Elemento en forma de tubo alargado, muy pequeño, con punta y generalmente de materiales metálicos.</p> |
|  <p>Imagen 33 Boquilla (Direct Industry, 2015)</p> | <p>Boquilla: Elemento diseñado con parámetros diferentes dependiendo del diseñador. Su objetivo es permitir el paso de un material con ciertas restricciones y condiciones elaboradas también por el diseñador.</p> |

17. Enviar/Recibir señales

Tabla 25. Alternativas de solución para enviar y recibir señales.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|---|---|
|  <p>Imagen 34 PIC (Microchip, 2014)</p> | <p>PIC: Los controladores de interfaz periféricos son una serie de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip technology inc.</p> |
|  <p>Imagen 35 Arduino (Arduino, 2015)</p> | <p>Arduino: Plataforma de hardware libre compuesto por un microcontrolador y una placa con un entorno de desarrollo.</p> |



18. Expulsar residuos

Tabla 26. Alternativas de solución para expulsar residuos.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|---|--|
|  <p data-bbox="318 617 784 646">Imagen 36 Escobilla (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="870 384 1403 531">Escobilla: Herramienta de limpieza compuesta un mango y por fibras a uno de los extremos. Su objetivo es barrer con residuos no deseados.</p> |
|  <p data-bbox="391 984 776 1014">Imagen 37 Sopladora (Ferrovicmar)</p> | <p data-bbox="870 678 1403 863">Sopladora: Herramienta que dispone de un flujo de salida de aire que mueve las partículas o residuos de un lugar a otro con el propósito de limpiar una superficie.</p> |

19. Transmitir potencia de traslación

Tabla 27. Alternativas de solución para transmitir la potencia de traslación.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|---|
|  <p data-bbox="318 1438 761 1467">Imagen 38 Correa (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="870 1274 1403 1421">Correa: Elemento que transmite potencia a través de la rotación de ruedas del mismo o diferente tamaño entre las cuales se tensiona.</p> |
|  <p data-bbox="318 1665 792 1694">Imagen 39 Engranajes (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="870 1476 1403 1581">Engrane: Elemento dentado de un dispositivo para transmitir potencia de un componente a otro.</p> |



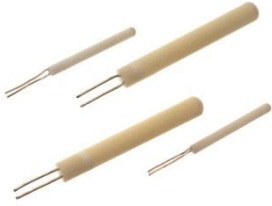
20. Transmitir potencia de extrusión

Tabla 28. Alternativas de solución para transmitir la potencia de extrusión.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|--|
|  <p data-bbox="316 531 768 562">Imagen 40 Tornillo de Arquímedes (allbiz)</p> | <p data-bbox="868 384 1401 493">Tornillo: Elemento mecánico con resaltes helicoidales que recorre la pieza.</p> |
|  <p data-bbox="316 1008 755 1037">Imagen 41 Pistón (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="868 567 1401 676">Pistón: Es una pieza que se desplaza alternadamente para interactuar con el fluido a través de un fluido.</p> |




21. Registrar temperatura

Tabla 29. Alternativas de solución para registrar la temperatura.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|---|--|
|  <p data-bbox="350 663 813 695">Imagen 42 Termocupla (Termocuplas S.A.)</p> | <p data-bbox="870 386 1398 531">Termocupla: Transductor conformado por dos metales diferentes que producen un voltaje en función de la temperatura del medio.</p> |
|  <p data-bbox="318 879 789 911">Imagen 43 Termistor (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="870 722 1398 831">Termistor: Un transistor que cambia el paso de corriente dependiendo de la temperatura.</p> |
|  <p data-bbox="342 1199 824 1251">Imagen 44 Termoresistencia (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="870 940 1398 1010">Termoresistencia: Una resistencia que varía según la temperatura.</p> |

22. Registrar velocidad de extrusión

Tabla 30. Alternativas de solución para registrar la velocidad de extrusión.

| ESQUEMA | DEFINICIÓN |
|--|---|
|  <p data-bbox="318 604 776 636">Imagen 45 Encoder (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="870 384 1403 604">Encoder: Dispositivo que registra la posición o velocidad de un objeto giratorio por medio de una fuente de luz, un sensor y un elemento diseñado para determinar las variables anteriormente descritas.</p> |
|  <p data-bbox="339 926 823 957">Imagen 46 Flujómetro (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="870 661 1403 737">Flujómetro: Mide el flujo de algún fluido conductivo que pase por él.</p> |
|  <p data-bbox="318 1339 844 1371">Imagen 47 Correntómetro (Direct Industry, 2015)</p> | <p data-bbox="870 980 1403 1201">Correntómetro: Mide la velocidad de la corriente por medio de la rotación de paletas y su modalidad de registro puede ser una papeleta inscriptora, cinta magnética o memoria de estado sólido.</p> |



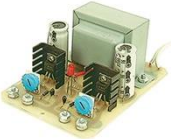




2.2.6. Matriz Morfológica y Selección de conceptos

A continuación se muestra la Tabla 31 donde se exponen las diferentes alternativas por cada función y las que fueron seleccionadas para cada una de los tres conceptos generados. Dentro de la matriz se encuentran tres figuras que corresponden cada una a uno de los conceptos generados; de tal manera que, si la figura se encuentra en la alternativa, es porque esta es la seleccionada para el concepto en cuestión.

- Concepto 1
- Concepto 2
- △ Concepto 3

Tabla 31. Matriz morfológica para la elaboración de los conceptos.

| NÚMERO | FUNCIÓN | ALTERNATIVA 1 | ALTERNATIVA 2 | ALTERNATIVA 3 |
|--------|--------------------------------|---|--|---------------|
| 1 | ALMACENAR POLÍMERO |  |  | |
| 2 | ENCENDER/APAGAR DISPOSITIVO |  | | |
| 3 | ENERGIZAR SISTEMA |  |  | |

| | | | | | |
|---|--|--|---|---|--|
| 4 | | <p>APAGAR EMERGENCIA</p> | <p>○ □ △</p>  | | |
| 5 | | <p>CONVERTIR AC/DC PARA ELECTRÓNICA</p> | <p>○ □ △</p>  | | |
| 6 | | <p>CONVERTIR AC/DC PARA PLANTA MOTRIZ</p> | <p>○ □ △</p>  | | |
| 7 | | <p>CARGAR POLÍMERO</p> | <p>○</p>  | <p>□ △</p>  | |
| 8 | | <p>BOMBEAR REFRIGERANTE</p> | <p>○ △</p>  | <p>□</p>  | |

| | | | | | |
|----|------|--|--|---|---|
| 9 | | ENFRIAR REFRIGERANTE |  |   | |
| 10 | | FILTRAR REFRIGERANTE |  |  |  |
| 11 | | REGULAR TEMPERATURA DEL SISTEMA | | | |
| | 11.1 | REFRIGERAR BOQUILLA |  |   | |
| | 11.2 | REGULAR TEMPERATURA DE LA EXTRUSORA |   | | |
| 12 | | TRANSFORMAR ENERGÍA ELÉCTRICA EN ENERGÍA MECÁNICA DE TRASLACIÓN | | | |

| | | | | | |
|----|------|---|--|---|--|
| | 12.1 | TRANSFORMAR ENERGÍA ELÉCTRICA EN ENERGÍA MECÁNICA DE TRASLACIÓN PARA EL EJE X |   |   |   |
| | 12.2 | TRANSFORMAR ENERGÍA ELÉCTRICA EN ENERGÍA MECÁNICA DE TRASLACIÓN PARA EL EJE Y |   |   |   |
| | 12.3 | TRANSFORMAR ENERGÍA ELÉCTRICA EN ENERGÍA MECÁNICA DE TRASLACIÓN PARA EL EJE Z |   |   |   |
| 13 | | TRANSFORMAR ENERGÍA ELÉCTRICA EN ENERGÍA MECÁNICA PARA EXTRUSIÓN |    |   | |
| 14 | | CONTROLAR | | | |
| | 14.1 | CONTROLAR TEMPERATURA |     | | |
| | 14.2 | CONTROLAR MOSTRAR PROCESO |     | | |

| | | | | | |
|------|---------------------------|--|--|--|--|
| 14.3 | CONTROLAR TRASLACIÓN |   | | | |
| 14.4 | CONTROLAR EXTRUSIÓN |   | | | |
| 15 | MOSTRAR PROCESO |    |  | | |
| 16 | DEPOSITAR MATERIAL |   |   | | |
| 17 | ENVIAR/RECIBIR SEÑALES |  |   | | |
| 18 | EXPULSAR RESIDUOS |   |  | | |

| | | | | | |
|----|--|---|---|--|--|
| 19 | | <p>TRANSMITIR POTENCIA DE TRASLACIÓN</p> | <p>○ △</p>  | <p>□</p>  | |
| 20 | | <p>TRANSMITIR POTENCIA DE EXTRUSIÓN</p> | <p>○</p>  | <p>□ △</p>  | |
| 21 | | <p>REGISTRAR TEMPERATURA</p> | <p>△</p>  | <p>○</p>  | <p>□</p>  |
| 22 | | <p>REGISTRAR VELOCIDAD DE EXTRUSIÓN</p> | <p>○</p>  | <p>□</p>  | <p>△</p>  |

2.2.7. Selección de concepto

Tabla 32. Selección del concepto.

| CRITERIO DE SELECCIÓN | PESO [%] | DEFINICIÓN | CONCEPTO 1 | | CONCEPTO 2 | | CONCEPTO 3 | |
|--|----------|---|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| | | | CAL | POND | CAL | POND | CAL | POND |
| FLUJO CONSTANTE Y CONTROL DE VELOCIDAD | 13% | Capacidad del dispositivo para mantener una velocidad de salida del polímero constante y controlada de tal manera que cuando este sea depositado en la superficie o en las otras capas tenga un tiempo adecuado para su fijación y sus propiedades deseadas se conserven y mantengan con el transcurrir del tiempo y de la cantidad de capas sobrepuestas. | 4,6 | 0,598 | 4,1 | 0,533 | 4,1 | 0,533 |
| MOVIMIENTO PRECISO | 13% | Facultad del dispositivo en disponer con una resolución de movimiento muy controlado y coherente para que la construcción de la pieza tenga la menor cantidad de imperfecciones posibles y sea adecuada para el cultivo. | 4,7 | 0,611 | 4,0 | 0,52 | 4,7 | 0,611 |
| COMPATIBLE CON CAM | 12% | Disponibilidad del dispositivo para ser guiado por un computador para fabricar piezas con estructuras geométricas definidas y diseñadas previamente. | 5 | 0,6 | 5 | 0,6 | 5 | 0,6 |
| CONTROL DE TEMPERATURA INTERNA | 11% | Propiedad del sistema de control del dispositivo que permita medir, procesar y regular la variable de temperatura en el interior de la extrusora para que se tenga una constante vigilancia de las propiedades del polímero que pueden llegar a variar con esta. | 4,5 | 0,495 | 4,5 | 0,495 | 3,5 | 0,385 |
| CONTROL DE TEMPERATURA DE LA BOQUILLA | 11% | Propiedad del sistema de control del dispositivo que permita medir, procesar y regular la variable de temperatura en la salida de la extrusora al medio de deposición para que se tenga una constante vigilancia de las propiedades del polímero que pueden llegar a variar con esta. | 4,5 | 0,495 | 4,4 | 0,484 | 3,5 | 0,385 |
| CONTAMINACIÓN REDUCIDA DEL MEDIO EXTERIOR | 20% | Cualidad del dispositivo para aislar el producto final de diseño del medio exterior y de sus posibles contaminantes. Para ello se debe contar de un aislamiento de partículas medianas pequeñas e incluso de microorganismos que se encuentren en el aire o suelo. Es muy importante contar con un adecuado procedimiento de aislamiento en la etapa de fabricación de la matriz debido a que, por términos de biocompatibilidad y por cuestiones de crecimiento celular, se hace necesario tener el andamio lo más virgen y descontaminado posible. | 4,7 | 0,94 | 4,5 | 0,9 | 3,0 | 0,6 |
| CONTAMINACIÓN POR RESIDUOS DE LOS MATERIALES DE LA EXTRUSORA REDUCIDOS AL MÍNIMO | 20% | Capacidad del dispositivo para no dejar restos que puedan llegar a interferir en la etapa de fabricación de la pieza y así garantizar un medio de fabricación libre de partículas o residuos producidos internamente por el dispositivo. Es posible que dichos residuos se produzcan por la cizalla realizada entre dos elementos del sistema o por cualquier desgaste en los materiales que se encuentran dentro del trayecto de flujo del polímero. | 3,9 | 0,78 | 4,3 | 0,86 | 4,5 | 0,9 |
| TOTAL | 100% | | | 4,519 | | 4,392 | | 4,014 |

Con el propósito de tener juicio suficiente y lo menos parcializado posible, se elaboró la matriz de selección que se puede observar en la página anterior. La matriz está diseñada con el fin de proporcionar diferentes criterios de calificación basados en las necesidades establecidas en un principio; cada criterio con un peso diferente basado en la jerarquía de las necesidades. De esta manera, se tomaron los conceptos elaborados y se introdujeron en la matriz para evaluarlos. Se calificó cada concepto en una escala de 1,0 a 5,0 y se sumaron las diferentes calificaciones ponderadas para obtener un resultado final.

El concepto que tuvo el mejor resultado fue el *concepto 1* que se describirá a continuación:

Concepto 1:

Como se puede observar en la matriz morfológica donde se encuentran todos los conceptos introducidos, el sistema cuenta con un cable para energizar el sistema desde la línea de corriente alterna y dispone de su adecuada transformación para implementar la energía en la planta motriz y los componentes microelectrónicos. Adicionalmente está adecuado con un botón de emergencia para cualquier eventualidad adversa. La impresora también dispone de una cabina de fácil acceso para poder realizar la adecuada limpieza de la zona, para ubicar la bandeja donde se deposita el material y para recoger las piezas una vez terminadas.

Para poder instaurar el polímero en la máquina e iniciar el proceso, el sistema dispone de un dispositivo de almacenamiento cónico que facilita la salida y ahorro de material debido a su forma geométrica que proporciona un desplazamiento del polímero por el mismo efecto gravitatorio. Adicionalmente el material es llevado a la extrusora mediante una manguera; donde las condiciones de temperatura son controladas muy meticulosamente para garantizar que el polímero permanezca con sus propiedades deseadas. Para el control de temperatura se definen varios elementos de la planta como lo son las resistencias de calentamiento y relé de estado sólido, los ventiladores y el ambiente de extrusión. Los sensores a implementar serían termistores y el control se realiza con un control PID implementando un Arduino PRO que regula las velocidades de los motores y la temperatura de extrusión con la respectiva retroalimentación proporcionada por los diferentes sensores.

El concepto cuenta con un sistema de movimiento en los tres ejes ideado para mantener un movimiento preciso. Este sistema estaría formado por motores paso a paso, correas y encoders que registran la posición y velocidad de los ejes X y Y; el eje Z está conformado por las mismas cosas pero con un tornillo sin fin en vez de correas. Así mismo, también se dispone de un sistema de extrusión conformado por un motor DC, un tornillo extrusor y finalmente una aguja que termina depositando el material en su respectivo punto en el ambiente de extrusión. Dicho ambiente, además de estar con las condiciones de temperatura adecuadas, se encuentra aislado del medio exterior por medio de filtros HEPA para garantizar los estándares de alta eficiencia.

2.3. ELEMENTOS DE DISEÑO DE DETALLE

A continuación se presentan algunas ecuaciones que hacen parte del criterio de diseño geométrico y de dimensiones para la aguja de extrusión y que tiene en cuenta algunas de las consideraciones anteriormente vistas; tales como la naturaleza del polímero y la tensión superficial en la punta de la aguja.

El objetivo es encontrar la presión P_0 que debe realizar el tornillo de extrusión para garantizar la salida del polímero al medio externo. Las variables geométricas que se encuentran en la ecuación se pueden observar en la Figura 28.

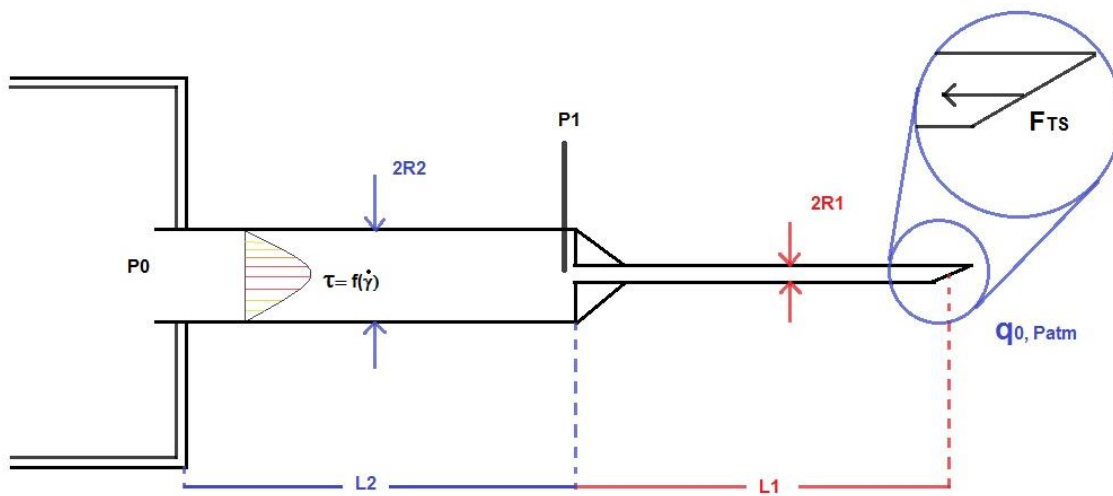


Figura 28. Aguja de la extrusora y variables geométricas.

Al considerar la tensión superficial en la punta de la aguja se hace necesario definir un perímetro de salida, el cual para este caso es el perímetro de una elipse formada por el corte transversal y definida por el ángulo de corte de la aguja como se puede observar en la Figura 29.

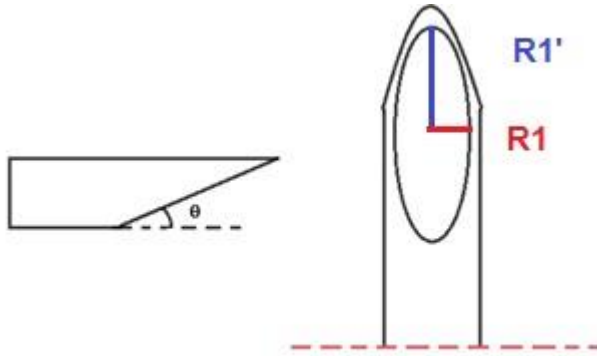


Figura 29. Corte transversal de la aguja y perímetro elíptico del corte.

Para calcular el perímetro exacto de una elipse es necesario utilizar ayuda de series infinitas. Sin embargo este cálculo no es tan necesario para este caso ya que existen algunas buenas aproximaciones como la del famoso matemático Ramanujan (su aproximación se puede observar en la Ecuación 42).

Ecuación 42

$$\text{Perimetro} \approx \pi \left[3(R1' + R1) - \sqrt{(3R1' + R1)(R1' + 3R1)} \right]$$

Donde R1' es R1/senθ y R1 es el radio del cilindro de la aguja.

A partir de estas aproximaciones se puede obtener la ecuación de diseño de P0 (Ecuación 43) en términos de P1 y otras constantes que simplifican la ecuación.

Ecuación 43

$$P0 = P1 - \frac{8\mu L_2}{\pi} \left[\frac{q_0}{R_2^4} - \frac{\pi \tau_0}{3\mu R_2} \right]$$

Donde:

Ecuación 44

$$P1 = Patm - \frac{8\mu L_1}{\pi} \left[\frac{q_0}{R_1^4} - \frac{(C + \tau_0) \left(\frac{1}{3} - \pi \right)}{R_1 \mu} \right]$$

Ecuación 45

$$C = \frac{\sigma \left[3(1 + \sin \theta) - \sqrt{(3 + \sin \theta)(1 + 3 \sin \theta)} \right]}{2 \sin \theta L_1}$$

También es posible encontrar una relación entre la velocidad angular del tornillo y la velocidad lineal de las partículas que avanzan por la extrusora. Dicha relación se observa en la Ecuación 46:

Ecuación 46

$$v = R\omega \tan\theta$$

Adicionalmente se encuentra la relación entre el torque de motor necesario para proceder a empujar el fluido y superar la barrera de la presión P_0 calculada y las variables geométricas del tornillo, las cuales se pueden ver en la Figura 30. La ecuación que relaciona estas variables es la Ecuación 47.

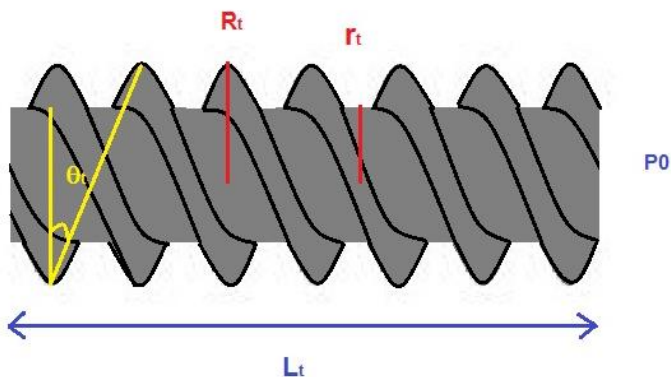


Figura 30. Tornillo extrusor

Ecuación 47

$$T = \frac{2P_0L_t(R_t-r_t)^2}{\sin\theta_t}$$

2.4. CONSTRUCCIÓN DEL BOCETO MEDIANTE HERRAMIENTAS CAD

Para la construcción del boceto del dispositivo diseñado, se dividió el sistema en diferentes subsistemas que operan entre sí.

2.4.1. Sistema de extrusión

Este sistema es el encargado de llevar el material desde su almacenamiento hasta su deposición sobre la bandeja donde se formará la pieza. Está compuesto un tornillo extrusor que está unido a un motor DC a través de un acople. Este tornillo se encuentra dentro de un cilindro, al cual llega el material a extruir a través de una manguera proveniente de un tanque donde se almacena el polímero. En esta entrada hay un elemento de calentamiento, que consiste de un ducto de algún elemento que sea buen conductor de calor como latón o acero, que se calienta a través de una resistencia de calentamiento, y esta temperatura es sensada por un transductor térmico (Figura31).

El cilindro del extrusor yace sobre un soporte para su desplazamiento en el eje X, y a la salida de este hay un acople para adaptar jeringas de insulina como boquilla de extrusión (Figura 31).

Los parámetros geométricos del tornillo y la jeringa pueden ser modificados por medio de la Ecuación 43 generada en la sección ELEMENTOS DE DISEÑO DE DETALLE. El diseño no es único por lo que estos elementos pueden ser modificados obteniendo el mismo resultado con diferentes parámetros.

Para evitar la contaminación del material de extrusión, los elementos con los que hace contacto este polímero deben ser estériles e inertes.

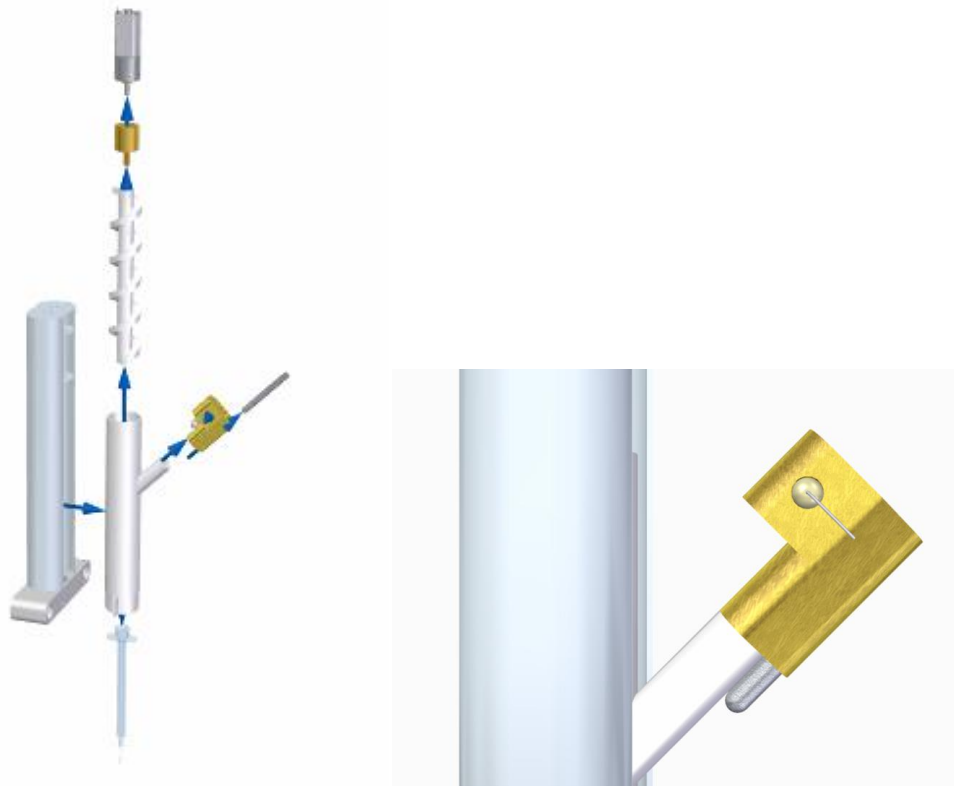


Figura 31. Vista explosionada del sistema de extrusión. Elemento con sensor de temperatura y resistencia de calentamiento a la entrada de la extrusora.

2.4.2. Sistema de ejes X y Y

El sistema de ejes de movimiento bidimensional se conforma por dos motores paso a paso, que permiten dar un mayor control a su rotación, que se encargan del movimiento del sistema de extrusión en estos sentidos a través de bandas, las cuales son un elemento sencillo y garantizan la correcta transmisión de potencia para los requerimientos que presenta el dispositivo al desplazar el sistema de extrusión (Figura 32). También se encuentran cuatro varillas que funcionan como guías para que el desplazamiento del sistema sea estable.

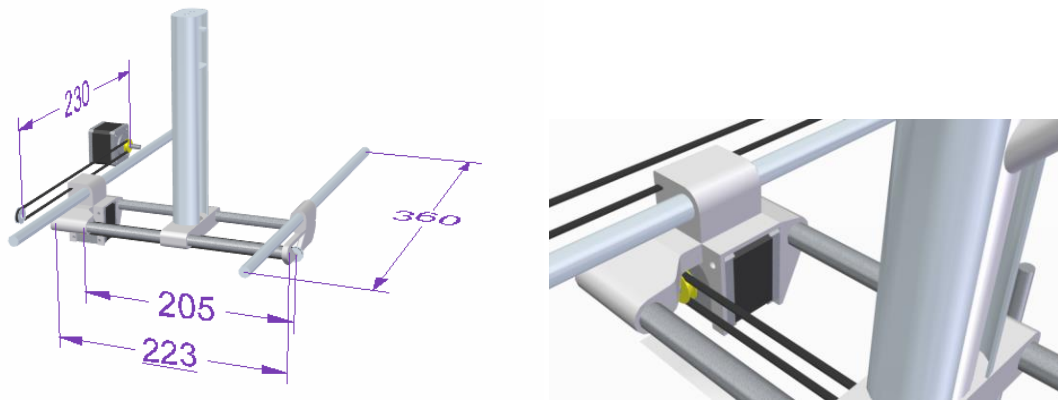


Figura 32. Configuración del sistema de los ejes X y Y. Detalle del sistema de eje X con banda articulada al motor y conectado al sistema de eje Y.

2.4.3. Sistema de eje Z

El sistema de movimiento unidimensional para el eje Z está formado por un motor paso a paso unido a través de un acople directo a un tornillo sin fin (Figura 34). La base de impresión está unida a este tornillo y a su vez a dos varillas que guían el movimiento de esta (Figura 33). El movimiento del motor es programado según el espesor de cada capa de polímero que se va a imprimir.



Figura 33. Sistema del eje Z

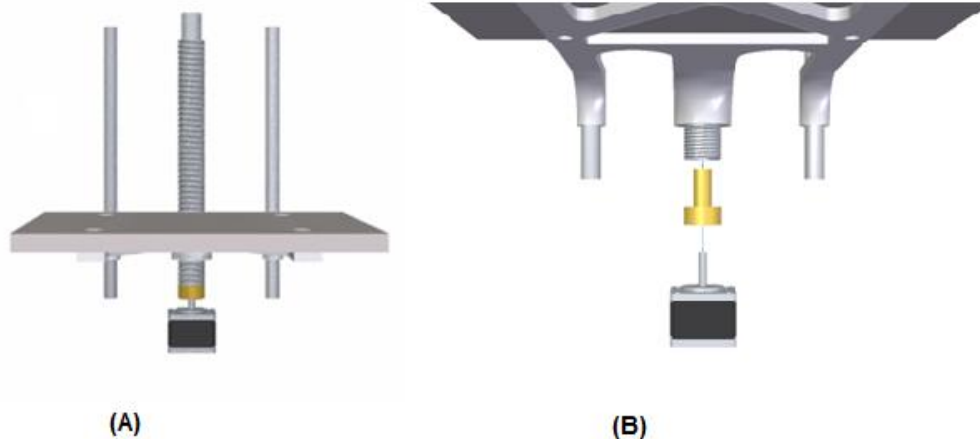


Figura 34. (A) Vista frontal del sistema del eje Z. (B) Vista explosionada de la zona motorizada del sistema del eje Z.

2.4.4. Estructura de soporte

Esta estructura se encarga de unir y sostener todos los sistemas de movimiento de los tres ejes, el sistema de extrusión y el tanque de almacenamiento del polímero (Figura 35). Adicionalmente es la base que soportará el recubrimiento externo del dispositivo para aislar el interior de este del ambiente externo.

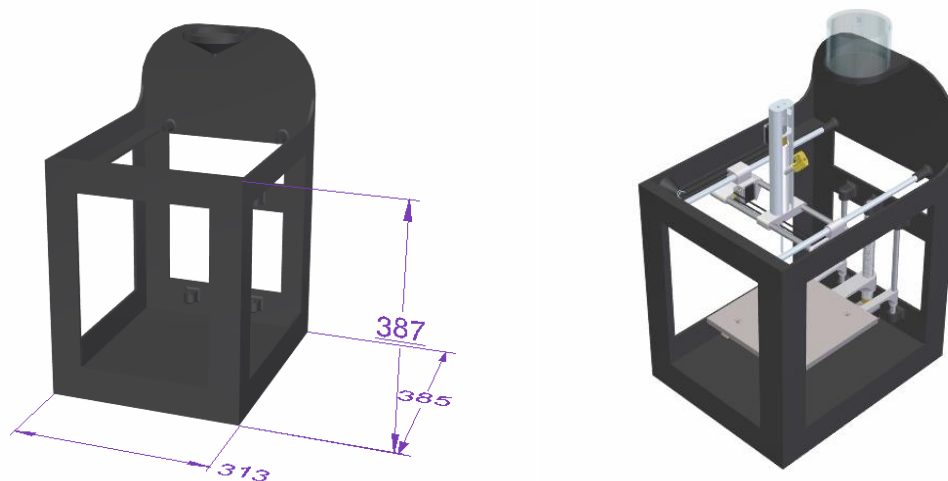


Figura 35. Configuración de la estructura de soporte. Ensamble de los sistemas de extrusión, sistemas de los tres ejes y la estructura de soporte. Adicionalmente se ensambla el tanque del polímero.

2.4.5. Estructura externa

La estructura externa se encarga de aislar el interior del dispositivo de contaminantes externos y da una apariencia agradable a todo el sistema, posee una tapa superior para el acceso a las estructuras internas del sistema para mantenimiento y un compartimento para el llenado del tanque. En los laterales se pueden acoplar ventiladores y filtros para la regulación térmica del sistema. En la parte anterior hay una puerta para acceder al interior de la zona de extrusión con el fin de colocar la bandeja sobre la que se imprime y retirarla con el producto final, también para mantenimiento y limpieza del sistema. La mayor parte del exterior será fabricada en acrílico o algún otro material que permita la visualización del proceso de impresión.

En la base del sistema se colocará la mayor parte electrónica del dispositivo como la alimentación del sistema, la implementación de los motores, el sistema de control, entre otros. En el exterior de esta base hay una pantalla táctil para manejar el sistema, el interruptor de encendido, el adaptador a la conexión AC, el botón de parada de emergencia y la entrada USB para el recibimiento de códigos de impresión.

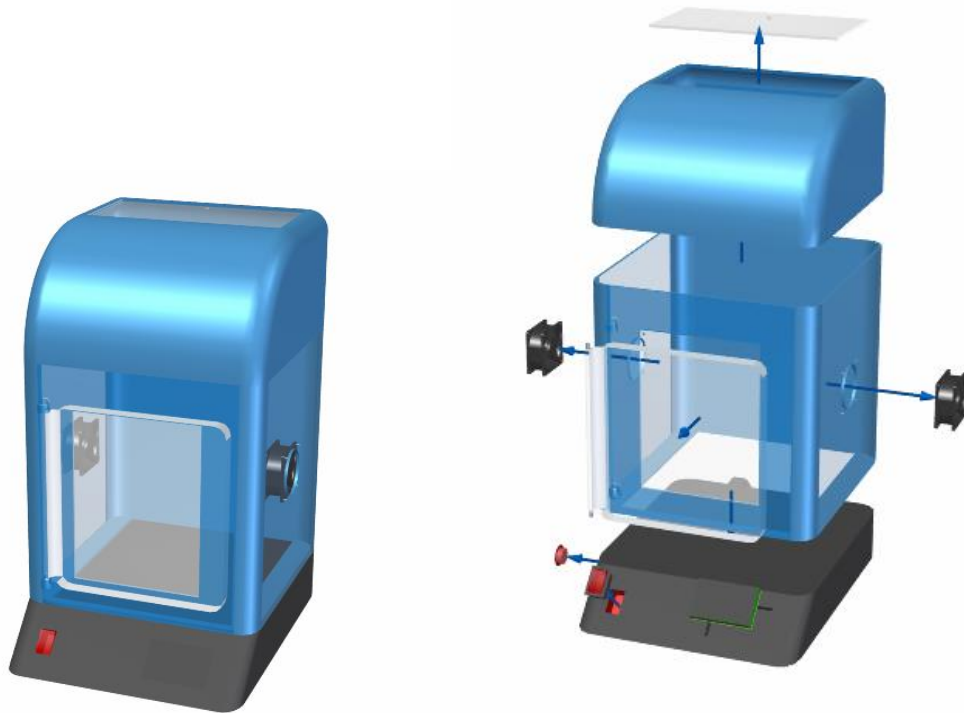


Figura 36. Estructura externa. Vista explosionada de la estructura externa del dispositivo

2.4.6. Accesorios

El dispositivo cuenta con un tanque de almacenamiento de vidrio para el polímero de impresión, este es removible para su limpieza y esterilización. Tiene una forma cónica en la parte inferior para facilitar la salida de material y un acople para adaptar una manguera para llevar este fluido hasta la extrusora.



Figura 37. Tanque de almacenamiento del fluido.

El sistema cuenta con dos ventiladores para regular la temperatura del sistema cuando este se eleva por encima del rango establecido.

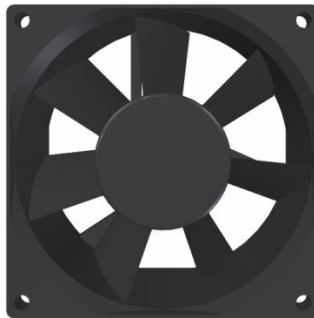


Figura 38. Ventilador para refrigerar el ambiente de extrusión en caso de elevarse la temperatura sobre el rango estimado.

2.4.7. Modelo finalizado

A continuación se presentan la Figura 39 y la Figura 40 donde se puede observar la configuración del modelo finalizado y dos de las diferentes vistas del modelo, donde se puede ver los elementos de los diferentes sistemas en conjunto.

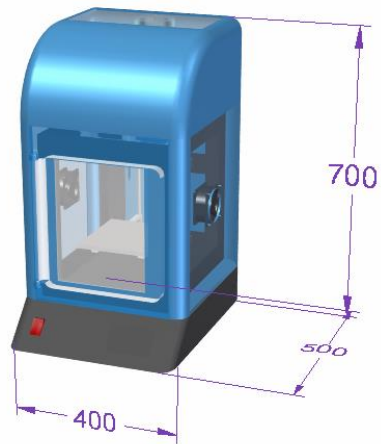


Figura 39. Configuración del modelo finalizado

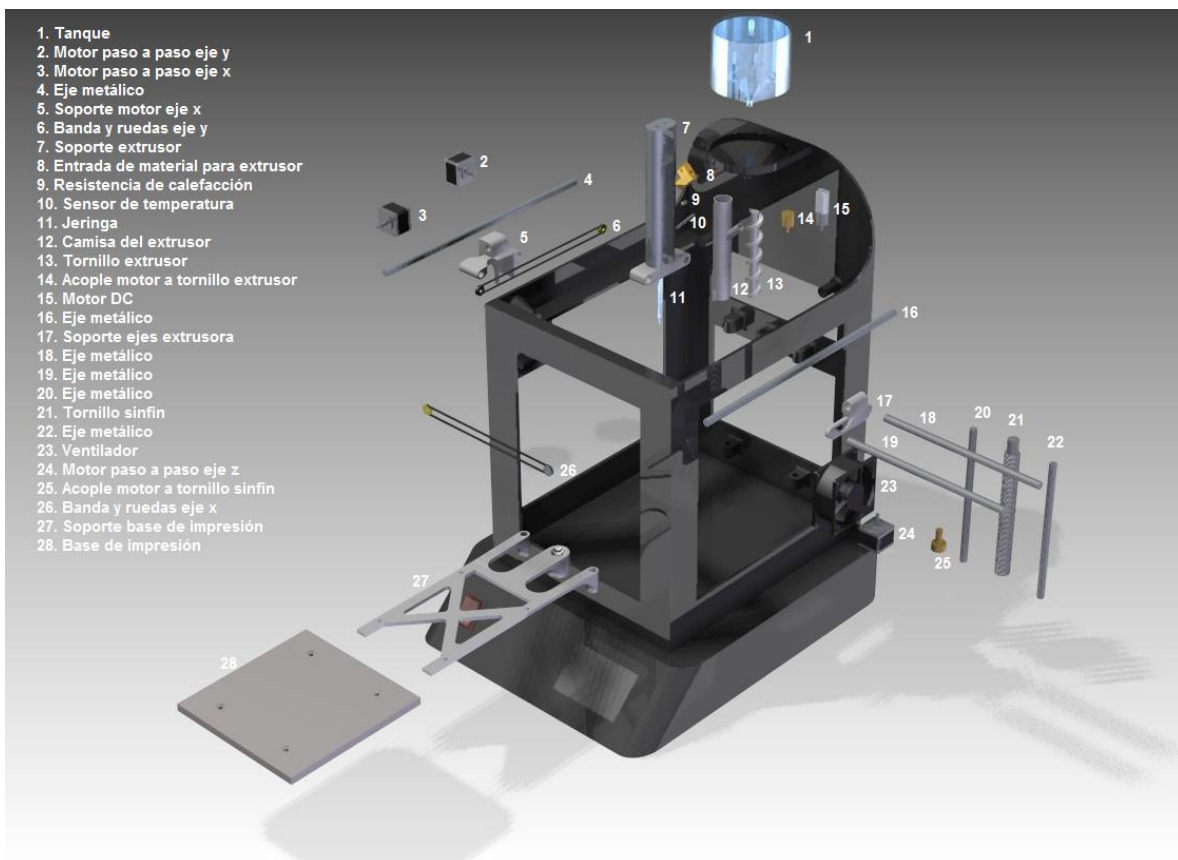


Figura 40. Explosionado de la impresora identificando cada una de sus partes

3.5.8. Resultados de montaje experimental del sistema de extrusión.

Se realizó el montaje físico del sistema de extrusión para observar una aproximación de los posibles patrones de extrusión y la consistencia del proceso de inyección del material. Para este montaje se imprimieron el tornillo y el cilindro en ABS que lo contiene en una impresora 3D debido a que era el material que se tenía a disposición en el laboratorio de biomateriales del CES de Sabaneta y al ser sólo un prototipo no hacía falta excederse en gastos de material. Se realizó el acople del motor y el tornillo en un torno y se utilizó un motor DC de 12V con motoreductor para 120 rpm. Posteriormente se ensamblaron todas las piezas y se sujetaron a un soporte universal para luego ingresar el PVA preparado con anterioridad y ver la funcionalidad de este arquetipo. Los resultados mostraron que el proceso de extrusión efectivamente se da y que los patrones de impresión se forman de manera adecuada después de cierto tiempo de espera (por lo que se supone que el proceso de creación de las MEC sería lento). Debido al poco control de velocidad y temperatura en el momento de realizar la prueba se observó la importancia de tener estos sistemas dentro del diseño del dispositivo. Debido a esto y a la resolución de la impresora que no hizo con suficiente detalle las piezas, se pudo observar algunas fugas que podrían mejorarse con un mejor acabado de los elementos del sistema. Sin embargo, se alcanzó a ver un buen comportamiento del material al ser extruido y una formación de patrones adecuado como se puede observar en la Figura 43.

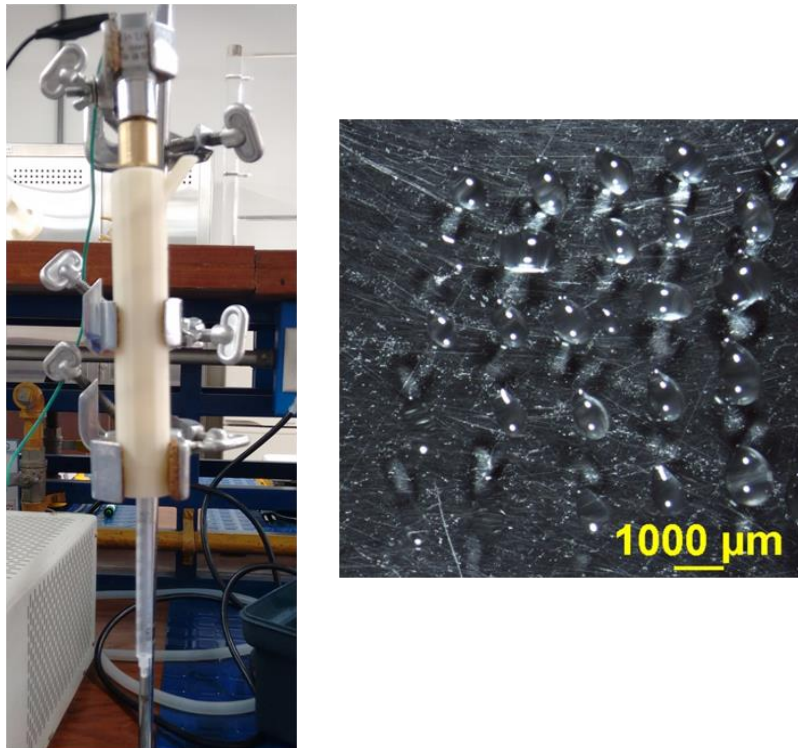


Figura 41. Montaje experimental del sistema de extrusión con PVA al 20% y resultados de los patrones de extrusión.

3. CONCLUSIONES

- El proceso de selección de variables para el diseño de un sistema de impresión es un proceso bastante complejo debido a que se debe agrupar todas las propiedades que afectan al proceso de extrusión de un polímero y posteriormente filtrar para utilizar sólo las más necesarias. Todo lo anterior comienza desde el esquema del diseñador, ya que pueden existir varias formas de darle solución a la necesidad de imprimir el material o diferentes puntos de vista respecto a la importancia de las variables y acerca de incluir o no más variables para el diseño. De cualquier forma, no se puede abstraer del grupo de variables las propiedades geométricas de la impresora que surgirán a partir de los diferentes valores de las propiedades del polímero a extruir o los materiales con los que se utilizaran algunos elementos del dispositivo final.
- Los resultados de las variables escogidas del polímero permitieron un proceso de diseño mucho más versátil y que reconoce la importancia de mantener las propiedades del polímero a la hora de ser extruido y depositado. Los resultados de las pruebas mostraron que el alcohol polivinílico es un fluido no newtoniano tipo Bingham con valores de viscosidad entre 1,168 y 1,392 y un τ_0 entre 19,835 y 23,511 a una temperatura entre 39°C y 44°C por lo que se debe mantener un control de temperatura estable que mantenga estas propiedades del polímero. Adicionalmente se encontró que las temperaturas de cambio de fase de este polímero están muy alejadas del rango de temperatura a manejar por lo que no afecta en lo absoluto en el diseño. Los valores de tensión superficial se obtuvieron mediante el método de la placa de Whilhelmy y dieron, para una concentración del 20%, el valor de $0,223 \pm 0,005$. Todos estos resultados se tuvieron en cuenta para el diseño de las propiedades geométricas de la extrusora para así conservar las propiedades del PVA y garantizar un mejor proceso de formado de las matrices extracelulares.
- Los resultados de la caracterización de la viscosidad del polímero por medio del método de los conos no fueron acertados debido a varias consideraciones que requieren un perfeccionamiento como lo es el tipo de fluido a caracterizar y el flujo radial que se mantiene al inicio del cono.
- La metodología de Ulrich facilitó en gran manera la generación del concepto del dispositivo. La forma de proceder desarticulando el problema en asuntos más sencillos y encontrando para estos funciones que permitieran resolverlos se reflejó en un diseño con características coherentes a las necesidades del producto final (MEC). La lista de requerimientos y medidas, las especificaciones y el diagrama de funciones permiten alcanzar un proceso ordenado con resultados de fácil entendimiento y considerando cada una de los requisitos. La generación de los conceptos por medio de alternativas de solución generadas por cada subfunción y

la selección del concepto a través de una matriz morfológica que admite la calificación del concepto de la manera más objetiva posible dio paso a los diseños de extrusión y de posicionamiento para que cumplieran con las características que se pedían en un principio para el dispositivo. El sistema de los ejes X y Y funciona por medio de motores paso a paso y bandas que desplazan todo el sistema de forma muy precisa y estable. El sistema del eje Z conformado por un tornillo sin fin y un motor paso a paso permite la formación de capas de polímero en la pieza a conformar de tal forma que garantiza un tamaño de capa adecuado. El sistema de extrusión conceptualmente conformado por un tornillo extrusor y una aguja facilita la salida del material en el tamaño adecuado y su diseño detallado responde a las necesidades de presión y el torque requeridos para una correcta extrusión.

4. CONSIDERACIONES PARA TRABAJO FUTURO

Como recomendaciones para trabajo posterior de futuros profesionales se recomienda una caracterización más profunda del polímero con mayores datos para una mayor robustez de los valores obtenidos; esto con el fin de proporcionar valiosa información para el estado del arte relacionado con este polímero y debido a que hay poca información al respecto. También se recomienda desarrollar los sistemas de control propuestos (Temperatura y velocidad) y evaluar la necesidad de otros sistemas adicionales (como lo es el control de presión). Adicionalmente se recomienda diseñar el sistema electrónico para el posicionamiento en 3D, implementar el prototipo físico y ensamblar ambos para poder realizar ajustes en alguno de los dos diseños. Por último se recomienda desarrollar el sistema de creación de capas de archivos STL y evaluar las piezas por medio de criterios de apariencia y funcionalidad; es decir, la viabilidad de estas para desempeñarse como matrices extracelulares apropiadamente.

BIBLIOGRAFÍA

4D Systems. (2014). *4.3" DIABLO16 TFT LCD Intelligent Display*. Retrieved Septiembre 17, 2015, from 4D Systems: http://www.4dsystems.com.au/product/uLCD_43D/

Abarrategui, A. (2008). *Estudio del Quitosano como Biomaterial Portador de rhBMP-2: Desarrollo, Caracterización y Aplicabilidad en Regeneración de Tejido Óseo*. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID. Retrieved from <http://eprints.ucm.es/8615/1/T30747.pdf>

Abdelaal, O. A., & Darwish, S. M. (2011). Fabrication of Tissue Engineering Scaffolds Using Rapid Prototyping Techniques, 577–585.

Alba Parada, J. D. (2014, Octubre 6). *Filtro de aire*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Mecánica: <http://4401danielmecanica.blogspot.com.co/2014/10/filtro-de-aire.html>

Ali Express. (n.d.). *3D Printer Accessories E3D all metal radiator pipe extruder sheet 1.75 / 3mm remote feed*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Ali Express: <http://es.aliexpress.com/item/3D-Printer-Accessories-E3D-all-metal-radiator-pipe-extruder-sheet-1-75-3mm-remote-feed/1888820290.html>

allbiz. (n.d.). *Tornillos extrusores*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from allbiz: <http://santiago.all.biz/tornillos-extrusores-g12126>

Arduino. (2015). *Arduino Pro*. Retrieved Septiembre 17, 2015, from Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardPro>

Barnes, H. ., Hutton, J. ., & Walters, K. (1989). *An introduction to Rheology* (Vol. 1, p. 201).

Butscher, a, Bohner, M., Hofmann, S., Gauckler, L., & Müller, R. (2011). Structural and material approaches to bone tissue engineering in powder-based three-dimensional printing. *Acta Biomaterialia*, 7(3), 907–20. doi:10.1016/j.actbio.2010.09.039

Celis Vargas, J. P. (2010). *Sistemas de control de posición y velocidad para máquinas usando PLC*. Proyecto de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería y Administración, Bucaramanga.

Corima. (2015). *Resistencias eléctricas para extrusoras*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Corima: <http://www.corima.info/es/17142/Resistencias-electricas-para-extrusoras>

Cuberos, R. (s.f.). *Sesión 4 del curso "Metodos de Diseño e Investigacion", Universidad del Zulia, en Maracaibo, Venezuela*. Recuperado el 2013, de <http://www.slideshare.net/ricardocuberos/metodos-de-diseo-clase-4>

Destaco Ingenieros. (2012). *Filtros*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Destaco Ingenieros: <http://www.destacoingenieros.com/filtros.html#prettyPhoto>

Direct Industry. (2015). *Bomba de extrusión ARO*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/aro-ingersoll-rand/product-20987-1040473.html>

Direct Industry. (2015). *Boquilla para líquido / de precisión / en miniatura*. Retrieved Septiembre 23, 2015, from Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/fisnar-inc/product-13752-1156667.html>

Direct Industry. (2015). *Botón pulsador de parada de emergencia*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/emas/product-38087-273127.html>

Direct Industry. (2015). *Caudalímetro inductivo / electromagnético / para líquido conductor / en línea*. Retrieved Octubre 22, 2015, from Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/spirax-sarco/product-18190-1655194.html>

Direct Industry. (2015). *Correntómetro para agua / portátil*. Retrieved Octubre 22, 2015, from Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/schiltknecht-messtechnik/product-15070-1525261.html>

Direct Industry. (2015). *Elcis Encoder*. Retrieved Septiembre 23, 2015, from Direct Industry: http://www.directindustry.es/prod/elcis-encoder-13774.html#product-item_1546433

Direct Industry. (2015). *Engranaje de tornillo sin fin / con cubo*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/framo-morat/product-12812-54468.html>

Direct Industry. (2015). *Escobilla de carbono*. Retrieved Septiembre 23, 2015, from Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/meech-international/product-30966-1609137.html>

Direct Industry. (2015). *Sensor de temperatura de resistencia / de alambre bobinado*. Retrieved Octubre 22, 2015, from Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/labfacility-limited/product-86559-852549.html>

Direct Industry. (2015). *Sistema de arrastre por correa dentada*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/cross-morse/product-20096-411757.html>

Direct Industry. (2015). *Termistor NTC / encapsulado de vidrio*. Retrieved Septiembre 23, 2015, from Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/measurement-specialties/product-9250-210768.html>

Direct Industry. (2015). *Ventilador de refrigeración*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/ebm-papst/product-9357-1654148.html>

Echeverri, C., Vallejo, C., & Londoño, M. (2009). SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE HIDROGELES DE ALCOHOL POLIVINÍLICO POR LA TÉCNICA DE CONGELAMIENTO / DESCONGELAMIENTO PARA APLICACIONES MÉDICAS. *Revista EIA*, (c), 59–66.

Electrónica 60 Norte. (n.d.). *Celda Peltier*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Electrónica 60 Norte: <http://www.electronica60norte.com/detalle.php?sku=955>

Emaresa. (2013). *Electrobomba sumergible drenaje 80C2-1.5*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Emaresa: <http://www.emaresa.cl/distribucion/index.php/canal-ferreteria/electrobombas-loncin/bombas-sumergibles/de-drenaje-80c2>

Ferrovicmar. (n.d.). *Pistola sopladora R-17 Kripxe*. Retrieved Octubre 22, 2015, from Ferrovicmar: <http://www.ferrovicmar.com/herramientas-electricas.asp?producto=pistola-sopladora-r17>

Gravitech. (2014). *16x2 Green on Lime Green Character LCD with Backlight*. Retrieved Septiembre 23, 2015, from Gravitech: <http://www.gravitech.us/16gronlgrch.html>

Gonzales, Y., & Vargas, R. (2011). ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y ELÉCTRICAS DE MATERIALES COMPUESTOS PÓLIMÉRICOS BASADOS EN EL POLI(VINIL ALCOHOL) (PVA) + H₃PO₂ + TiO₂. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 12(2), 64–75.

Hacedores. (2015). *Construye tu fuente de alimentación casera*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2015, de Hacedores: <http://hacedores.com/construye-tu-fuente-de-alimentacion-casera/>

Homecenter. (n.d.). *Manguera laboratorio 3/8 pulgada (0,95 cm ancho) x metro Flexco*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Homecenter: [http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/88958/Manguera-laboratorio-38-pulgada-\(0,95-cm-ancho\)-x-metro](http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/88958/Manguera-laboratorio-38-pulgada-(0,95-cm-ancho)-x-metro)

Humidificadores y Deshumidificadores. (2015). *Filtros de aire de alta eficiencia. El filtro HEPA*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Purificador del aire: <http://www.purificadordel aire.es/filtros-de-aire-de-alta-eficiencia-el-filtro-hepa/>

Inzana, J. A., Olvera, D., Fuller, S. M., Kelly, J. P., Graeve, O. A., Schwarz, E. M., ... Awad, H. A. (2014). 3D printing of composite calcium phosphate and collagen scaffolds for bone regeneration. *Biomaterials*, 35(13), 4026–34. doi:10.1016/j.biomaterials.2014.01.064

Kramschuster, A., & Turng, L.-S. (2013). *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics. Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics* (pp. 427–446). Elsevier. doi:10.1016/B978-1-4557-2834-3.00017-3

Kundu, J., Pati, F., Jeong, Y. H., & Cho, D. (2013). *Chapter 2. Biomaterials for Biofabrication of 3D Tissue Scaffolds*. *Biofabrication* (First Edit., pp. 23–46). Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-1-4557-2852-7.00002-0

Lantada, A. D. (Ed.). (2013). *Handbook on Advanced Design and Manufacturing Technologies for Biomedical Devices*. Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-1-4614-6789-2

Marion County, Oregon. (n.d.). *Waste Reduction/Recycling Images*. Retrieved from Marion County, Oregon.

MCI Electronics. (n.d.). *Inicio*. Retrieved Agosto 2015, from MCI Electronics: <http://www.olimex.cl/images/MCI-COM-00655.jpg>

Microchip. (2014). *PIC® Microcontrollers*. Retrieved Septiembre 18, 2015, from Microchip: <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/products/picmicrocontrollers>

Narayan, R. (Ed.). (2014). *Rapid Prototyping of Biomaterials: Principles and Applications* (p. 328). Elsevier Science. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=9mjbAgAAQBAJ&pgis=1>

Pati, F., Shim, J.-H., Lee, J.-S., & Cho, D.-W. (2013). 3D printing of cell-laden constructs for heterogeneous tissue regeneration. *Manufacturing Letters*, 1(1), 49–53. doi:10.1016/j.mfglet.2013.09.004

PCEL. (n.d.). *Cable 91cm de Alimentación Corriente para PC Computadora C13 a NEMA5-15P 14AWG - Toma a Tierra*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from PCEL: <https://pcel.com/StarTech.com-PXT101143-98830>

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. (n.d.). *Mecánica de fluidos*. Retrieved Agosto 2015, from Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid: <https://fluidsmechanics.wikispaces.com/>

Rao, P. N. (2004). *CAD/CAM: Principles and Applications* (p. 735). Tata McGraw-Hill Education. Retrieved from http://books.google.com/books?id=QaY_sQC4-5YC&pgis=1

Revista TOPE. (n.d.). *Actuador lineal peso mosca*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Revista TOPE: http://www.revistatope.com/179_art_igus_Mecanizado_en_Seco.html

Shenoy, A. V., Chattopadhyay, S., & Nadkarni, V. M. (1983). From melt flow index to rheogram. *Rheologica Acta*, 22(1), 90–101. doi:10.1007/BF01679833

Taringa. (n.d.). *Ayudas de Cálculo y Matemáticas. RAZón de cambio*. Retrieved Agosto 2015, from Taringa: <http://www.taringa.net/comunidades/solomatematico/6011638/Ayuda-Razon-de-cambio.html>

Termocuplas S.A. (n.d.). *Termocupla con racor de conexión*. Retrieved Octubre 10, 2015, from Termocuplas S.A.: <http://www.termocuplas.com.co/web/product/termocupla-con-racor-de-conexion/>

The MathWorks, Inc. (2014, Octubre 9). *PID Control*. Retrieved Octubre 22, 2015, from MATLAB CENTRAL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/48060-pid-control>

TotClinic. (n.d.). *Agujas subcutáneas G25 Naranja 0,5 X 16 mm. Caja de 100 und.* Retrieved Septiembre 23, 2015, from TotClinic: <http://www.jeringasyagujas.com/agujas-hipodermicas-intramusculares-subcutaneas-intradermicas/59-agujas-subcutaneas-esteriles.html>

Ulrich, K. (2004). *Product Design and Development*. McGraw-Hill.

WebElectronicos. (2015). *Relé estado sólido de potencia para control. 5V a 15V*. Retrieved Septiembre 16, 2015, from Web electrónicos: http://webelectronicos.com/product_info.php?products_id=6755

Zhou, Z., Buchanan, F., Mitchell, C., & Dunne, N. (2014). Printability of calcium phosphate: calcium sulfate powders for the application of tissue engineered bone scaffolds using the 3D printing technique. *Materials Science & Engineering. C, Materials for Biological Applications*, 38, 1–10. doi:10.1016/j.msec.2014.01.027