

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño, simulación y fabricación de un disco microfluídico centrífugo para la generación de microgotas

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Luis Fernando Hernández Reyes

DIRECTOR DE TESIS

M. en I. David Abraham Santoyo García



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DISEÑO, SIMULACION Y FABRICACION DE UN DISCO MICROFLUIDICO CENTRIFUGO PARA LA GENERACION DE MICROGOTAS que presenté para obtener el titulo de INGENIERO MECÁNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.



LUIS FERNANDO HERNANDEZ REYES
Número de cuenta: 318048431

Resumen

La microfluídica centrífuga es una alternativa para el transporte y manipulación de pequeños volúmenes de fluido mediante la rotación de un dispositivo microfluídico, generalmente fabricado en formato de disco compacto (CD). El control de la velocidad de rotación permite generar un gradiente de presión centrífuga que impulsa el fluido a través de los microcanales, evitando la necesidad de utilizar sistemas externos de bombeo. Dentro de las aplicaciones de la microfluídica, la generación de microgotas permite manipular pequeños volúmenes de fluido de manera individual y puede emplearse en diferentes procesos de análisis y procesamiento de muestras. Este trabajo presenta el diseño y evaluación de un dispositivo microfluídico en CD para la generación de microgotas, considerando la geometría de los microcanales y las condiciones necesarias para la emulsificación por escalón mediante la rotación del disco.

Tabla de contenido

1 Introducción 6
2 Objetivos 10
2.1.1 Objetivo general: 10
2.1.2 Objetivos particulares: 10
3 Marco Teórico 11
3.1 Microfluídica centrífuga en Disco Compacto (CD) 11
3.1.1 Simulaciones de microfluídica en CD 24
3.1.2 Consideraciones de microfabricación de dispositivos microfluídicos en CD 27
3.2 Generación de microgotas 31
3.2.1 Emulsificación por escalón 31
3.2.2 Parámetros para la generación de microgotas 31
3.2.3 Fluidos de trabajo para la generación de microgotas 37
3.2.4 Geometría del canal de salida de la microgota 37
4 Diseño experimental 39
4.1 Diseño conceptual del sistema 39
4.2 Definición de parámetros de diseño 41
4.3 Modelado digital 49
4.4 Simulación CFD mediante ANSYS Fluent 51
4.5 Iteraciones diseño–simulación 56
4.6 Fabricación del CD microfluídico 58
4.7 Iteraciones diseño–manufactura 61
4.8 Plataforma de rotación 64
4.9 Validación funcional y observación de microgotas 65
5 Resultados 66
5.1 Simulación CFD de flujo en microcanales 66
5.2 Resultado de manufactura 71
5.3 Generación de microgotas 75
5.4 Desempeño de la plataforma de rotación 80

5.5 Discusión sobre eficiencia y reproducibilidad 81
6 Discusión 82
6.1 Comparación con tecnologías existentes 82
6.2 Ventajas y limitaciones del prototipo 84
6.3 Consideraciones para escalabilidad 85
7 Conclusiones 86
7.1 Conclusiones generales 86
7.2 Aportes destacables 89
7.3 Recomendaciones para trabajos futuros 91
8 Anexos 92
8.1 Dimensiones para el cálculo de velocidades en el apartado 4.2 92
8.2 Figuras de métricas de calidad de malla para primera iteración de modelo curvo. 93
8.3 Figuras de métricas de calidad de malla para el modelo recto. 96
8.4 Figuras de métricas de calidad de malla para segunda iteración de modelo curvo. 99
8.5 Agregado para obtener material de tesis 102
9 Agradecimientos 103
9.1 Agradecimientos personales 103
9.2 Agradecimientos Institucionales 104
Referencias 105

1 Introducción

La miniaturización de sistemas destinados al análisis y manipulación de fluidos ha permitido desarrollar dispositivos capaces de realizar diferentes operaciones utilizando pequeños volúmenes de muestra. En este contexto, la microfluídica es la ciencia y la tecnología que se ocupa del estudio y manipulación de pequeños volúmenes de fluidos en estructuras cuyas dimensiones características se encuentran en la escala micrométrica, generalmente de decenas a cientos de micrómetros. La reducción de las dimensiones de los canales permite disminuir el consumo de muestras y reactivos, así como integrar diferentes operaciones dentro de un mismo dispositivo. Estas características han favorecido su aplicación en áreas como el análisis químico, el diagnóstico biomédico, la biología y el desarrollo de sistemas de laboratorio miniaturizados [1].

Una de las plataformas desarrolladas a partir de la microfluídica son los dispositivos *Lab-on-a-Chip* (LOC), en los cuales diferentes operaciones que tradicionalmente requieren equipos de laboratorio independientes pueden integrarse dentro de un dispositivo de dimensiones reducidas. Estos sistemas pueden incorporar estructuras destinadas al transporte, mezcla, separación y procesamiento de fluidos, empleando materiales como polímeros, vidrio, silicio y papel, entre otros. Algunos de los avances recientes en el campo de la microfluídica incluyen el tratamiento de células individuales en chip, el monitoreo rápido de reacciones químicas, la carga directa de sangre para la separación de plasma y el diagnóstico rápido de enfermedades como malaria, sepsis y VIH/SIDA. Para realizar estas operaciones se requieren mecanismos que permitan controlar adecuadamente el movimiento de los fluidos dentro de los microcanales [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8].

El transporte de fluidos constituye, por lo tanto, uno de los aspectos fundamentales en el diseño de sistemas microfluídicos. Para este propósito se han desarrollado diferentes mecanismos de actuación, entre los que se encuentran los mecanismos de desplazamiento y los mecanismos dinámicos que

utilizan campos externos para proporcionar energía al fluido. Entre los sistemas empleados tradicionalmente se encuentran las bombas de jeringa y las bombas peristálticas, las cuales presentan una amplia aplicación en microfluídica. Sin embargo, estos sistemas pueden requerir elementos externos, además de tubos y conexiones para establecer la comunicación entre el sistema de bombeo y el dispositivo microfluídico. Estas configuraciones pueden incrementar la complejidad del montaje y limitar la portabilidad del sistema [1], [5], [7] .

Una alternativa a estos sistemas es la microfluídica centrífuga, en la cual el transporte del fluido se produce mediante la rotación del dispositivo. Estas plataformas generalmente presentan una geometría similar a la de un disco y contienen microcanales, cámaras y otras estructuras distribuidas radialmente. Al hacer girar el disco, la fuerza centrífuga genera un gradiente de presión que permite transportar el fluido a través de los microcanales sin requerir necesariamente conexiones externas con bombas. Esta característica permite desarrollar sistemas compactos y facilita su utilización en aplicaciones que requieran portabilidad [1], [5].

El comportamiento del fluido dentro de estos dispositivos depende de diferentes parámetros, entre ellos la velocidad de rotación, la geometría de los microcanales y las propiedades físicas de los fluidos utilizados. Por esta razón, el análisis del transporte de fluidos constituye una etapa importante en el diseño de dispositivos microfluídicos centrífugos. Para ello, existen herramientas de dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) que permiten estudiar el efecto de estos parámetros y estimar variables como la velocidad, la presión y otras propiedades del flujo [9].

Dentro de la microfluídica se ha desarrollado una línea de investigación que se centra en el desarrollo de sistemas capaces de generar y manipular microgotas, las cuales son pequeños volúmenes discretos de una fase líquida dispersos dentro de otra fase. Estas microestructuras favorecen una rápida transferencia de calor y aceleran las reacciones químicas. Además, la encapsulación de muestras, células o reactivos en microgotas también puede reducir el contacto directo entre

las muestras y la superficie del dispositivo, así como favorecer un control independiente de cada gota, que puede producirse, transportarse y analizarse individualmente. Algunos ejemplos de su aplicación se encuentran en la cuantificación absoluta de alguna bacteria, como la *L. monocytogenes*, en la producción de alimentos; la producción de partículas monodispersas para la liberación controlada de soluciones médicas, el desarrollo de diagnósticos POC basados en gota; y ensayos de cultivo, encapsulación celular y análisis de células individuales [1], [3], [5], [6], [7].

En estos sistemas se requiere un proceso de emulsificación para generar las microgotas. Las emulsiones son sistemas multifásicos termodinámicamente inestables, constituidos por al menos dos líquidos inmiscibles, en los que pequeñas gotas de una fase, denominada fase dispersa, se encuentran distribuidas dentro de otra fase, denominada fase continua. Entre las configuraciones microfluídicas empleadas para producir gotas homogéneas y monodispersas, se encuentran las uniones en T, la focalización de flujo y la emulsificación por escalón.

En una unión en T, dos canales de entrada se intersecan y el flujo de fase continua corta gotas de la fase dispersa. En la focalización del flujo, la fase dispersa es confinada por dos corrientes de la fase continua, lo que favorece la formación de gotas. Finalmente, en la emulsificación por escalón, la fase dispersa atraviesa un cambio abrupto en la geometría del canal, lo que modifica las condiciones de presión capilar y favorece la formación de las gotas. Las dos primeras configuraciones se muestran en la **Figura 1** [1], [9], [10], [11].

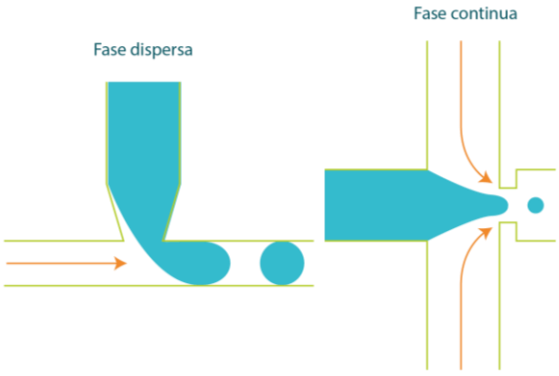


Figura 1. Esquema que muestra la emulsificación en unión en T y en focalización de flujo, ordenadas de izquierda a derecha.

La generación de microgotas también ha sido estudiada específicamente en plataformas microfluídicas centrífugas mediante la implementación de las estrategias anteriormente mencionadas. En específico, la emulsión por escalón tiene la ventaja de que las fluctuaciones tanto en el canal como en la presión no tienen un efecto significativo en la monodispersidad de las gotas. Además, las dimensiones relativamente uniformes, hacen que este método sea muy simple y robusto en comparación con los sistemas de unión en T y de flujo cruzado. Estos antecedentes muestran que la generación de microgotas mediante plataformas centrífugas constituye un área de investigación en la que se han desarrollado diferentes configuraciones y estrategias de diseño [1].

El desarrollo de un dispositivo microfluídico centrífugo requiere considerar aspectos relacionados con su diseño geométrico, comportamiento fluidodinámico, fabricación y operación experimental. La geometría de los microcanales debe permitir transportar el fluido y cumplir con la función para la cual fue diseñado bajo las condiciones de rotación establecidas, mientras que el método de fabricación debe ser capaz de reproducir las dimensiones y características necesarias para garantizar el funcionamiento del dispositivo.

En este contexto, el presente trabajo aborda el diseño, simulación y fabricación de un disco microfluídico centrífugo para la generación de microgotas. Para ello, se analiza el transporte de fluidos dentro de los microcanales considerando el efecto de la rotación del dispositivo y las características geométricas del sistema. Posteriormente, se desarrolla un prototipo mediante procesos de manufactura sustractiva y se implementa una plataforma de rotación que permite controlar la velocidad angular durante las pruebas experimentales. Finalmente, se evalúa el comportamiento del sistema mediante el transporte de fluido y la generación de microgotas. De esta manera, el trabajo integra el análisis teórico, la simulación computacional, la fabricación y la evaluación experimental de una plataforma microfluídica centrífuga destinada a la generación de microgotas.

2 Objetivos

2.1.1 Objetivo general:

Diseñar, simular y fabricar un prototipo de dispositivo microfluídico centrífugo en formato de disco para el transporte de fluidos orientado a la generación de microgotas mediante el control de la velocidad de rotación.

2.1.2 Objetivos particulares:

- Analizar mediante herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) el comportamiento del flujo en el dispositivo microfluídico, considerando el efecto de la velocidad de rotación y de las características geométricas de los microcanales.
- Fabricar el dispositivo microfluídico mediante manufactura sustractiva, empleando mecanizado CNC para la elaboración de los microcanales y de las geometrías destinadas a la generación de microgotas.
- Desarrollar e implementar un prototipo de una plataforma de rotación que permita controlar y monitorear la velocidad angular del dispositivo microfluídico durante las pruebas experimentales.
- Evaluar experimentalmente el transporte de fluidos y la generación de microgotas en la región de las boquillas bajo las condiciones de operación establecidas.

3 Marco Teórico

3.1 Microfluídica centrífuga en Disco Compacto (CD)

La microfluídica centrífuga manipula pequeños volúmenes de fluido contenidos en un arreglo de microcanales mediante la rotación de un dispositivo habilitado por un motor. Estos dispositivos suelen tener la forma de un disco plano similar a un CD, tanto en tamaño como en geometría. Al ponerse en funcionamiento el motor, el disco adquiere una velocidad angular $\omega(t)$ haciendo que el fluido se desplace hacia la periferia del CD. Este proceso depende tanto del modelo geométrico del sistema microfluídico como de la combinación de fuerzas centrífugas, de Euler y de Coriolis.

Para describir el movimiento del fluido se considera el desplazamiento de una partícula dentro de un volumen de fluido que va a ir cambiando su posición radial $r(t)$ y angular $\phi(t)$ con el tiempo. Se establece un sistema de referencia inercial fijo en el centro del eje del motor, el cual permite describir la evolución de la posición de la partícula dentro del canal.

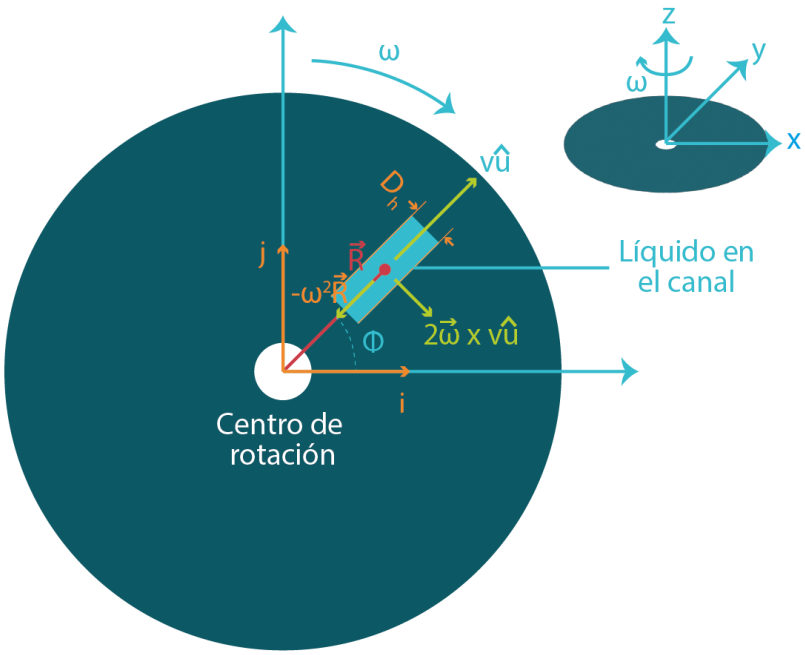


Figura 2. Descripción cinemática del pequeño volumen de flujo dentro del campo centrífugo.

De acuerdo con la **Figura 2** la posición del punto de interés está definida por la función $\vec{R}(t)$.

$$\begin{aligned}\vec{R}(t) &= r(t)\hat{u}(t) \\ &= r(t)\big(\cos\big(\phi(t)\big)\,\hat{\imath} + \sin\big(\phi(t)\big)\,\hat{\jmath}\big)\end{aligned} \tag{1}$$

Para obtener la velocidad ($\vec{V}(t)$) se aplica la derivada total respecto al tiempo a la posición. Debido a que ambos términos $r(t)\ y\ \hat{u}(t)$ dependen del tiempo, se utiliza la regla del producto, generando el desarrollo mostrado en la **ecuación 2**.

$$\begin{aligned}\vec{V}(t) &= \frac{d\vec{R}(t)}{dt} \\ &= \frac{d\big(r(t)\hat{u}(t)\big)}{dt} \\ &= \frac{d\big(r(t)\big)}{dt}\hat{u}(t) + r(t)\,\frac{d\big(\hat{u}(t)\big)}{dt}\end{aligned} \tag{2}$$

Desarrollando la segunda componente de la suma, se tiene:

$$\begin{aligned}r(t)\,\frac{d\big(\hat{u}(t)\big)}{dt} &= r(t)\left[\frac{d}{dt}\big(\cos\big(\phi(t)\big)\,\hat{\imath} + \sin\big(\phi(t)\big)\,\hat{\jmath}\big)\right] \\ &= r(t)\left[\Big(-\sin\big(\phi(t)\big)\,\frac{d\phi(t)}{dt}\Big)\,\hat{\imath} + \Big(\cos\big(\phi(t)\big)\,\frac{d\phi(t)}{dt}\Big)\,\hat{\jmath}\right] \\ &= r(t)\big[\big(-\sin\big(\phi(t)\big)\omega(t)\big)\,\hat{\imath} + \big(\cos\big(\phi(t)\big)\omega(t)\big)\,\hat{\jmath}\big] \\ &= r(t)\big[\big(\omega(t)\,\hat{k}\big) \times \big(\cos\big(\phi(t)\big)\,\hat{\imath} + \sin\big(\phi(t)\big)\,\hat{\jmath}\big)\big] \\ &= r(t)[\vec{\omega}(t) \times \hat{u}(t)] \\ &= \vec{\omega}(t) \times r(t)\hat{u}(t) \\ &= \vec{\omega}(t) \times \vec{R}(t)\end{aligned}$$

Donde:

$\hat{u}(t)$*: Vector unitario de posición.*

$r(t)$*: Posición radial.*

$\phi(t)$*: Posición angular.*

$\vec{\omega}(t)$*: Velocidad angular.*

$\hat{k}, \hat{\imath}, \hat{\jmath}$*: Vectores unitarios que definen el espacio tridimensional.*

De esta manera, la velocidad queda expresada como la **ecuación 3**.

$$\vec{V}(t) = v(t)\hat{u}(t) + \vec{\omega}(t) \times \vec{R}(t) \quad (3)$$

Posteriormente se aplica nuevamente la derivada con respecto al tiempo para obtener la aceleración mostrada en la **ecuación 4** y el desarrollo se puede visualizar a continuación:

$$\begin{aligned}\vec{A}(t) = \frac{d\vec{V}(t)}{dt} &= \frac{dv(t)}{dt}\hat{u}(t) + v(t)\frac{d\left(\hat{u}(t)\right)}{dt} + \frac{d\left(\vec{\omega}(t)\right)}{dt} \times \vec{R}(t) + \vec{\omega}(t) \times \frac{d\vec{R}(t)}{dt} \\ &= a(t)\hat{u}(t) + v(t)\left(\vec{\omega}(t) \times \hat{u}(t)\right) + \alpha(t) \times \vec{R}(t) + \vec{\omega}(t) \times \left(v(t)\hat{u}(t) + \vec{\omega}(t) \times \vec{R}(t)\right) \\ &= a(t)\hat{u}(t) + 2\vec{\omega}(t) \times \left(v(t)\hat{u}(t)\right) + \alpha(t) \times \vec{R}(t) - \omega^2(t)\vec{R}(t)\end{aligned}$$

Donde:

$\hat{u}(t)$*: Vector unitario de posición.*

$\vec{R}(t)$*: Función de posición.*

$\phi(t)$*: Posición angular.*

$\vec{\omega}(t)$*: Velocidad angular.*

$\alpha(t)$*: Aceleración angular.*

$v(t)$*: Velocidad radial.*

$a(t)$*: Aceleración radial*

Del desarrollo anterior se obtienen la **ecuación 4**.

$$\vec{A}(t) = a(t)\hat{u}(t) + 2\vec{\omega}(t) \times \left(v(t)\hat{u}(t)\right) + \alpha(t) \times \vec{R}(t) - \omega^2(t)\vec{R}(t) \quad (4)$$

Organizando los términos de la aceleración se obtienen las **ecuaciones 5-7**.

$$\vec{A}_{Cor} = 2\vec{\omega}(t) \times \left(v(t)\hat{u}(t)\right) \quad (5)$$

$$\vec{A}_N = -\omega^2(t)\vec{R}(t) \quad (6)$$

$$\vec{A}_T = \alpha(t) \times \vec{R}(t) \quad (7)$$

Donde:

$\vec{A}_{Cor}$ *: aceleración de Coriolis*

$\vec{A}_T$ *: aceleración tangencial*

$\vec{A}_N$: *aceleración normal*

De acuerdo con la segunda ley de Newton la aceleración que experimenta un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa, como se muestra en la **ecuación 8**.

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \tag{8}$$

En un sistema de referencia no inercial es necesario introducir fuerzas inerciales para representar la dinámica del fluido en ese marco de referencia que gira junto al disco, como se ilustra en la **ecuación 9**.

$$\vec{F}_{inerciales} = -m\vec{a} \tag{9}$$

Un ejemplo es la fuerza centrífuga, que actúa radialmente hacia el exterior en el marco de referencia que se mueve con el disco y es opuesta a la aceleración centrípeta asociada con la rotación. Aplicando la **ecuación 9** a las **ecuaciones 5-7** se tienen las **fuerzas 10,11 y 12** [1], [5], [12], [13], [14].

$$F_C = m\,\omega^2(t)\vec{R}(t) \tag{10}$$

$$F_{Cor} = -2m\vec{\omega}(t) \times \left(v(t)\hat{u}(t)\right) \tag{11}$$

$$F_E = -m\,\alpha(t) \times \vec{R}(t) \tag{12}$$

Donde:

F_C: *Fuerza de centrífuga*

F_{Cor}*: Fuerza de Coriolis*

F_E*: Fuerza de Euler*

m *: Masa*

Estas fuerzas se representan en la **Figura 3**.

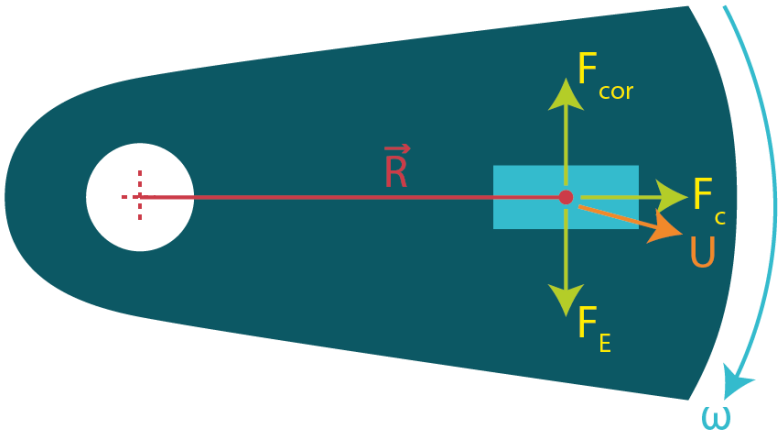


Figura 3. Fuerzas inerciales presentes en el volumen del fluido.

La fuerza centrífuga, que actúa radialmente hacia la parte exterior del disco como se muestra en la **Figura 3** es la principal responsable del trasporte radial del fluido. Por otro lado, la fuerza de Coriolis actúa perpendicularmente a la fuerza centrífuga (F_C) que tiene el fluido, contribuyendo al cambio de dirección dentro de los microcanales. Y por último la fuerza de Euler, presente solo cuando hay aceleración angular. Las 3 fuerzas proporcionan un control preciso del fluido [5], [13].

Debido a que la fuerza centrífuga actúa en dirección radial, cualquier columna de fluido dispuesta de manera radial posee una diferencia de presión centrífuga. Al analizar un volumen fluídico en vez de una sola partícula dentro del fluido, se utiliza los elementos diferenciales descritos a continuación.

El diferencial de masa se pude definir como en la **ecuación 13**.

$$dm = \rho \, dV \tag{13}$$

Tomando esta idea, el diferencial de volumen se puede definir como en la **ecuación 14**.

$$dV = A \, dr \tag{14}$$

Sustituyendo la ecuación 14 en la ecuación 13, podemos definir el diferencial de masa como en la **ecuación 15.**

$$dm = \rho\, A\, dr \tag{15}$$

Donde:

dm: *Elemento de masa infinitesimal* dV: *Elemento de volumen infinitesimal*

ρ*: Densidad del fluido* *A: Área transversal del canal*

Posteriormente, en los sistemas microfluídicos de interés la velocidad angular del CD puede considerarse mayormente constante, exceptuando el inicio del giro y el cambio de las revoluciones para diferentes procedimientos, por ende, se puede suponer que la velocidad angular es mayormente constante. Si se analiza un instante específico en el tiempo dentro del canal la **ecuación 10** pasa a tener la siguiente notación: $\omega^2(t) \rightarrow \omega^2$ y $\vec{R}(t) \rightarrow r$, dando lugar a la **ecuación 16**.

$$F_C = m\, \omega^2 r \tag{16}$$

Aplicando los elementos diferenciales a la **ecuación 16** se tiene la **igualdad diferencial 17** y su desarrollo a continuación, obteniendo la ecuación 16.

$$\begin{aligned} dF_C &= dm\, \omega^2 r \\ &= \rho\, A\, dr \omega^2 r \\ &= \rho\, A\, \omega^2 r dr \end{aligned} \tag{17}$$

Sustituyendo la **ecuación 15** en la **igualdad diferencial 17**, se genera la **ecuación 18.**

$$dF_C = \rho\, A\, \omega^2 r dr \tag{18}$$

Por otro lado, se sabe que la presión se define como $P = \frac{F}{A}$ por ende, para un elemento diferencial de presión la expresión quedaría como:

$$dP = \frac{dF}{A} = \frac{\rho\, A\, dr \omega^2 r}{A} = \rho\, \omega^2 r dr$$

Integrando la expresión anterior entre la posición radial inicial y la final del fluido.

$$\int_{P_1}^{P_2} dP = \int_{r_1}^{r_2} \rho\, \omega^2 r dr = \rho\, \omega^2 \int_{r_1}^{r_2} r dr$$

Se genera la **ecuación 19**.

$$\triangle P = \frac{1}{2}\rho\, \omega^2 (r_2^2 - r_1^2) \tag{19}$$

Donde:

P: Presión

A: Área transversal del canal

ρ: Densidad

r_2: Radio donde termina el volumen del fluido

r_1: Radio donde inicia el volumen del fluido

Usando la identidad $r_2^2 - r_1^2 = (r_2 - r_1)(r_2 + r_1)$ y el valor promedio de las distancias radiales que delimitan el volumen de fluido analizado, definido en la **ecuación 20**, la **ecuación 19** se simplifica y se expresa como la **ecuación 21** [15].

$$\bar{r} = \frac{\rho\, A\, dr \omega^2 r}{A} \tag{20}$$

$$\triangle P = \frac{1}{2}\rho\, \omega^2 (r_2 - r_1)(r_2 + r_1)$$

$$= \frac{1}{2}\rho\, \omega^2 \Delta \mathrm{r}\ 2\bar{r}$$

$$\triangle P = \rho\, \omega^2 \Delta \mathrm{r}\ \bar{r} \tag{21}$$

Por otro lado, dentro de los canales el comportamiento del fluido sigue la suposición de flujo de Poiseuille; considerando un flujo laminar, en estado estacionario, a través de un canal infinitamente largo y bajo la influencia de un gradiente de presión constante, como se muestra en la **Figura 4** [12].

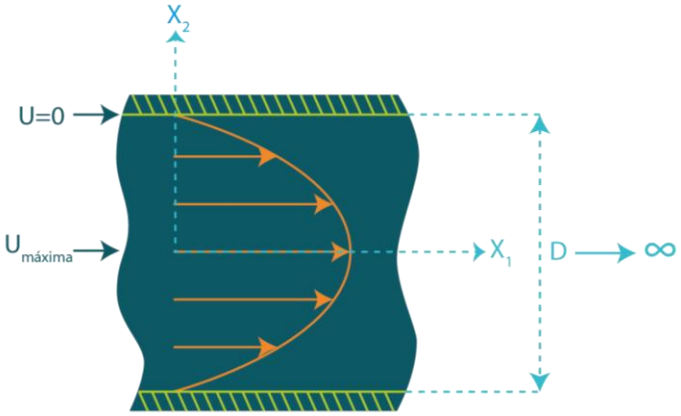


Figura 4. Perfil de velocidades dentro de un canal con flujo laminar.

Para llegar al modelo que describe el flujo de Poiseuille se define la **ecuación** de continuidad en la expresión **22** y se iguala a cero por la consideración de flujo incompresible y de densidad constante.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = \frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = \frac{\partial U_i}{\partial x} + \frac{\partial U_j}{\partial y} + \frac{\partial U_k}{\partial z} = 0 \quad (22)$$

Donde:

$\vec{\nabla}$: operador nabla

$\vec{U}$: Velocidad del fluido

Otra ecuación para considerar en la descripción del fluido es la cantidad de movimiento del flujo, o la ecuación de Navier–Stokes, que representa una formulación matemática de la segunda ley del movimiento de Newton aplicada al flujo de fluidos. Se representa de manera general en la **ecuación 23** [4], [14].

$$\rho \frac{D\vec{U}}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \left(\vec{U} \cdot \nabla \right) \vec{U} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{U} + \hat{f_r} \quad (23)$$

Donde:

μ: *Viscosidad dinámica* P: *Presión*

ρ: *Densidad del fluido* $\hat{f}_r$: *Fuerzas de superficie adicionales*

Las componentes del lado derecho de la igualdad de la **ecuación 23** representan la sumatoria de las fuerzas de superficie o de cuerpo, las cuales se definen en la **ecuación 24**.

$$\sum \hat{f} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{U} \tag{24}$$

Donde:

$$\hat{f} = \frac{F}{dx\ dy\ dz} = \frac{F}{dV}$$

Para integrar los efectos de la fuerza centrífuga y de Coriolis cuando la velocidad angular (ω) del disco llega a establecerse a una constante, se sustituye la variable de la masa de la **ecuación 10 a la 12** por el elemento diferencial descrito en la **ecuación 13**. Remplazando el resultado en la definición de fuerzas de superficie obteniendo la **ecuación 25 y 26** para la fuerza centrífuga y de Coriolis respectivamente.

Para la fuerza de superficie centrífuga:

$$\begin{aligned} \hat{f}_C &= \frac{F_C}{dx\ dy\ dz} \\ &= \frac{\rho\ dV\ \omega^2(t)\vec{R}(t)}{dV} \\ &= \rho\omega^2(t)\vec{R}(t) \end{aligned}$$

$$\hat{f}_C = \rho\omega^2(t)\vec{R}(t) \tag{25}$$

Para la fuerza de superficie de Coriolis:

$$\hat{f}_{Cor} = \frac{F_{Cor}}{dx\ dy\ dz}$$
$$= \frac{-2\ \rho\ dV\ \vec{\omega}(t) \times \left(v(t)\hat{u}(t)\right)}{dV}$$
$$= -2\ \rho\vec{\omega}(t) \times \left(v(t)\hat{u}(t)\right)$$

$$\hat{f}_{Cor} = -2\ \rho\vec{\omega}(t) \times \left(v(t)\hat{u}(t)\right) \quad (26)$$

Tomando las consideraciones del flujo de Poiseuille y suponiendo que dentro de los canales ya el flujo esta desarrollado, la ecuación de continuidad de movimiento se expresa como en la **ecuación 27** [14], [16] .

$$0 = -\nabla \cdot P + \mu\nabla^2\vec{U} + \rho\omega^2(t)\vec{R}(t) - 2\ \rho\vec{\omega}(t) \times \left(v(t)\hat{u}(t)\right) \quad (27)$$

Reordenando los componentes tenemos la **ecuación 28**.

$$\mu\nabla^2\vec{U} = \nabla \cdot P - \rho\omega^2(t)\vec{R}(t) + 2\ \rho\vec{\omega}(t) \times \left(v(t)\hat{u}(t)\right) \quad (28)$$

Al analizar el perfil de velocidad en la sección trasversal de un canal dispuesto radialmente, se considera que el movimiento del fluido está dominado por la fuerza centrífuga. La contribución de la fuerza de Coriolis puede despreciarse cuando su magnitud es pequeña en comparación con la fuerza centrífuga, condición que puede ser evaluada mediante el número de Rossby (Ro). Bajo esta consideración y suponiendo que las paredes del canal cumplen con la condición de no deslizamiento, se puede emplear un modelo bidimensional para obtener el perfil de velocidades, presentada en la **ecuación 29** [12], [14].

$$U_1 = -\frac{\rho\omega^2\vec{R}(t)}{2\mu}x_2^2 + \frac{\rho\omega^2\vec{R}(t)D^2}{8\mu} \quad (29)$$

Donde:

D: Diámetro del canal

Cuando se tiene un flujo de Poiseuille con viscosidad finita, el perfil de velocidades forma una parábola. Donde la mayor velocidad se presenta en el centro de canal

y va decreciendo conforme se acerca a la pared, por la condición de no deslizamiento, como se muestra en la **Figura 4.** Por ende, cuando $x_2 = 0$ obtenemos la velocidad máxima expresada en la **ecuación 30** [12], [16] .

$$U_{max} = \frac{\rho\omega^2\vec{R}(t)D^2}{8\mu} \tag{30}$$

Para caracterizar el fluido sin ocupar directamente la velocidad máxima, se considera la velocidad característica del fluido V_c que se puede definir como $V_c = \frac{1}{2}U_{max}$ [12], [16]. Bajo esta consideración, la magnitud de la fuerza de superficie de Coriolis se expresa mediante la **ecuación 31**.

$$\hat{f}_{Cor} = -2\,\rho\vec{\omega}(t) \times \left(\frac{\rho\omega^2\vec{R}(t)D^2}{(2)8\mu}\hat{u}(t)\right)$$

$$= -\rho\vec{\omega}(t) \times \frac{\rho\omega^2\vec{R}(t)D^2}{8\mu}\hat{u}(t) \tag{31}$$

Empleando la definición del producto cruz ($|\vec{a} \times \vec{b}| = ab\ \sin\theta$) y considerando que el vector de velocidad radial es perpendicular al eje de rotación, la **ecuación 31** se puede expresar mediante la **ecuación 32** [12], [16] .

$$\left|\hat{f}_{Cor}\right| = \frac{\rho^2\omega^3\vec{R}(t)D^2}{8\mu} \tag{32}$$

Otra forma de calcular la velocidad del fluido es considerando el gradiente de presión en un capilar circular de diámetro (D) con comportamiento laminar [15], [17], como se expresa en la **ecuación 33**.

$$\frac{\Delta \mathrm{P}}{\Delta \mathrm{x}} = \frac{32\mu U}{D^2} \tag{33}$$

Despejando la velocidad del fluido de la **ecuación 33**, sustituyendo la **ecuación 21** en la **ecuación 33** y sustituyendo el $\Delta \mathrm{x}$ por la longitud que contiene al volumen de fluido a analizar (l) , la **ecuación 33** pasa a ser la **ecuación 34** [5], [9], [15], [17] .

$$U = \frac{\Delta \mathrm{P}\ D^2}{32\mu\ l} = \frac{\rho\ \omega^2 \Delta \mathrm{r}\ \bar{r}\ \ D^2}{32\mu\ l} \tag{34}$$

Este modelo está tomando como base una sección trasversal circular, sin embargo, al utilizar el diámetro hidráulico se puede acoplar a cualquier forma. El diámetro hidráulico se define en la **ecuación 35** [15].

$$D_h = -\frac{4A}{Pe} \tag{35}$$

Donde:

A: *Área de la sección transversal de canal.*

Pe: *perímetro de la sección transversal de canal*

El flujo laminar es un comportamiento habitual en la microfluídica. Para definir si el fluido se comporta como tal se utiliza el número de Reynolds definido en la **ecuación 36** [4], [12], [17] .

$$R_e = \frac{\rho D U}{\mu} \tag{36}$$

El número de Reynolds describe la relación entre la densidad de fuerza inercial (**ecuación 37**) y la densidad de fuerza viscosa (**ecuación 38**) ambas dependen del diámetro característico del sistema. Al poseer una escala micrométrica el número de Reynolds, en sistemas micros, es bajo (típicamente por debajo de 100), enfatizando la predominancia de fuerzas viscosas sobre inerciales. Por ende, el flujo tiene un comportamiento laminar [4], [12].

$$f_i = \frac{\rho\ U^2}{D} \tag{37}$$

$$f_v = \frac{\mu\ U}{D^2} \tag{38}$$

En algunos trabajos se establece un valor de referencia para el número de Reynolds a partir del cual puede presentarse la transición de un régimen laminar a uno turbulento. Madou et al. utilizan Re = 2300 como referencia para la transición

entre ambos regímenes [15], [17], mientras que Schwarz et al. emplean un valor de Re = 2000 como criterio para considerar la transición de régimen [12].

Un ejemplo del comportamiento del número de Reynolds tomando en consideración agua a 20 °C ($\mu = 1mPa\ s$) que pasa a través de un canal orientado radialmente de sección cuadrada entre una posición radial interior $r_1 = 40\ [mm]$ y una posición radial exterior $r_2 = 45\ [mm]$. Considerando 3 anchos diferentes y a diferente frecuencia de rotación, se tiene la siguiente tabla comparativa del comportamiento del fluido [12].

Tabla 1: Ejemplos del número de Reynolds calculados para una sección rectangular con diferentes anchos de canal (50, 100, 500 µm) a diferentes RPMs (300, 1800, 4800 RPM).

Ancho del canal /Revoluciones	300 [RPM]	1800 [RPM]	4800 [RPM]
50 μm	0.185	6.64	47.2
200 μm	11.8	425	3020
500 μm	185	6637	47200

Otro aspecto para considerar son las fuerzas capilares, ya que a bajas revoluciones y en estructuras pequeñas las presiones capilares suelen dominar el comportamiento fluídico. Las presiones capilares se originan a partir de la energía necesaria para crear un área superficial entre las sustancias que estén en contacto. Esta energía por superficie está dada por la tensión superficial (γ_{12}) para cada par de fases 1 y 2. En la interacción entre las fases, se forma una curvatura característica. El comportamiento de esta curva se relaciona con la diferencia de presión capilar entre una fase y otra mediante la ecuación de Young-Laplace expresada en la **ecuación 39** [12].

$$\Delta p_{Sur\ f} = \gamma_{12}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{39}$$

Donde:

γ_{12}: *Tensión superficial*

R_1, R_2 : *Radio de las curvaturas principales de interacción.*

3.1.1 Simulaciones de microfluídica en CD

La simulación numérica permite estudiar el comportamiento del sistema sin necesidad de fabricar inicialmente un modelo físico. El uso de herramientas de ingeniería asistida por computadora (CAE) permite evaluar diferentes diseños y condiciones de operación mediante modelos computacionales, lo que puede reducir el número de iteraciones necesarias durante el desarrollo experimental.

Al modelar un sistema es necesario definir los fenómenos físicos y las condiciones que sean relevantes para el objetivo del estudio. La incorporación de fenómenos adicionales puede aumentar la complejidad del modelo y, con ello, los recursos computacionales y el tiempo requerido para realizar las simulaciones. Por esta razón, es necesario establecer las condiciones y simplificaciones que permitan representar adecuadamente el comportamiento de la parte de interés, manteniendo un equilibrio entre la fidelidad del modelo y el costo computacional.

En el caso de los dispositivos microfluídicos, la selección de los fenómenos físicos que se consideran en el modelo debe realizarse de acuerdo con las características geométricas del dispositivo, las propiedades del fluido y las condiciones de operación. Entre estas últimas se consideran, por ejemplo, el régimen de flujo, la viscosidad y la densidad del fluido, así como la velocidad de entrada, el movimiento de rotación y la presión de salida. De esta manera, se pueden establecer modelos que permitan analizar el comportamiento del fluido dentro de los microcanales sin incorporar fenómenos que no sean relevantes para el objetivo de la simulación.

Uno de los pasos fundamentales de una simulación CFD (*Computational fluid dynamics)* es el mallado. El mallado divide el modelo en celdas o elementos sobre los cuales se discretizan las ecuaciones que gobiernan el flujo. La calidad y distribución de la malla influyen en la estabilidad y costo computacional de la solución.

La calidad de la malla puede evaluarse mediante distintos indicadores. Los principales son: la proporción de aspecto de las celdas de la malla (*Aspect Ratio*),

que mide la relación que hay entre las dimensiones de las aristas, revelando la similitud entre las longitudes; la distorsión (*skewness*) que cuantifica la asimetría de un elemento (triángulo, cuadrilátero, tetraedro, hexaedro) con respecto a un elemento ideal, donde valores bajos indican celdas con una forma regular mayormente; y la calidad ortogonal (*Orthogonal Quality*), que evalúa que tan perpendiculares son las líneas que conectan los centros de los elementos adyacentes con respecto a la línea normal de la arista que los separa. Este último indicador presenta valores entre 0 y 1, siendo 1 el valor ideal. En la **Figura 5** se muestra la relación de cada parámetro [18].

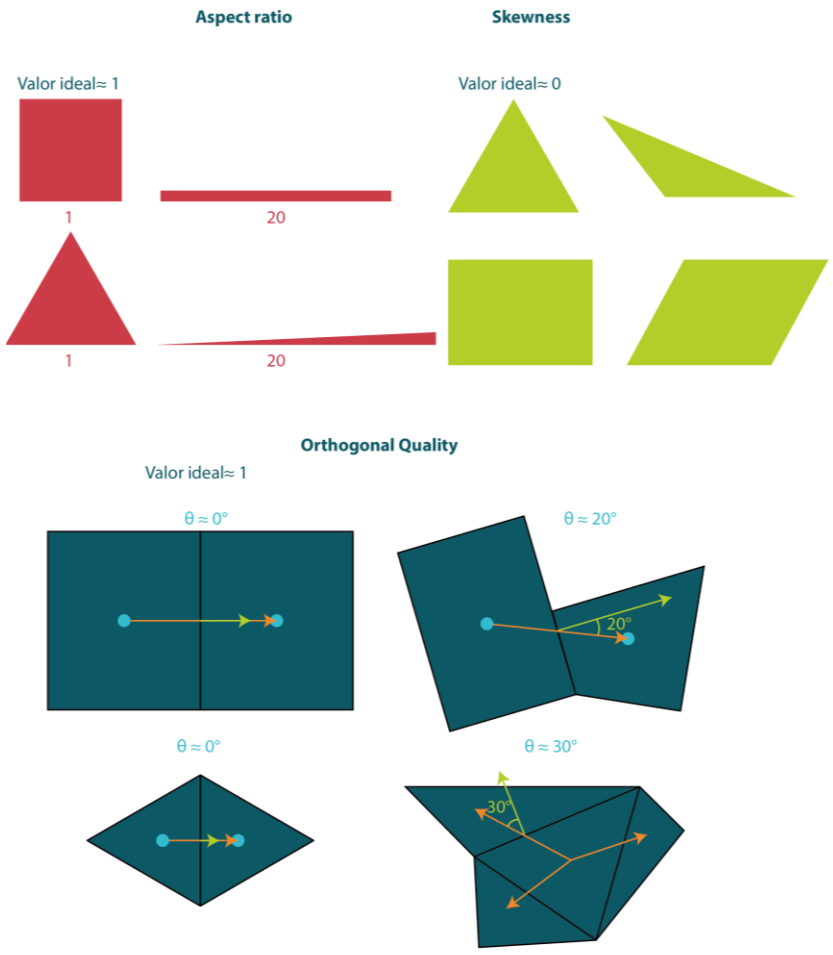


Figura 5. Descripción de los principales indicadores de calidad de malla para una simulación 2D con elementos triangulares y cuadráticos.

De acuerdo con Gilmore, Fluent recomienda que el parámetro de calidad de las celdas sea superior a 0.01 para todas las celdas individuales. Asimismo, se

recomienda que la asimetría (*skewness*) sea inferior a 0.95 para elementos tetraédricos y a 0.85 para elementos hexaédricos [19].

El tipo de mallado también tiene una relevancia importante en la estabilidad y el costo computacional del proceso de simulación. Para ello hay que considerar si el sistema requiere un espacio tridimensional para su funcionamiento o se puede simplificar a una simulación 2D. Para cada tipo de simulación hay diferentes tipos de elementos como se observa en la **Figura 6** [20].

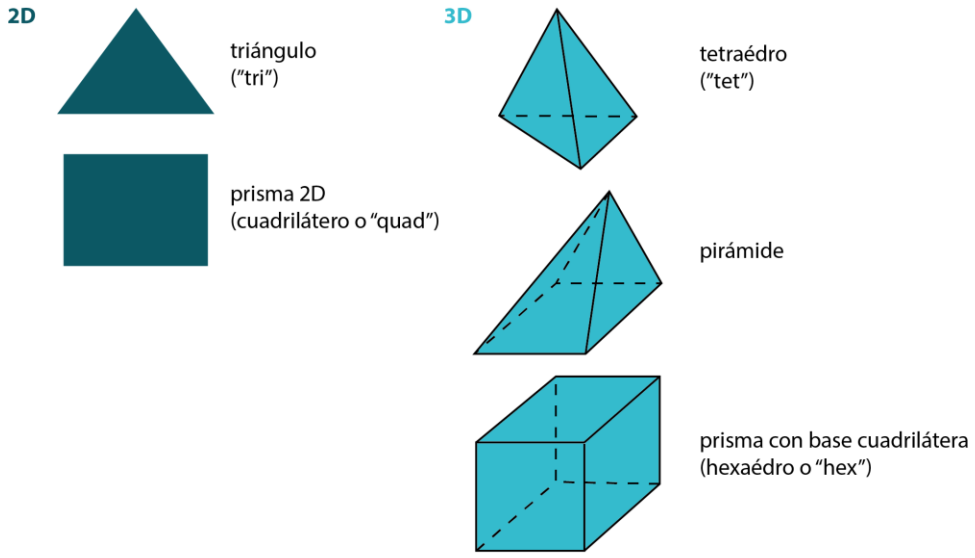


Figura 6. Elemento de malla para cada tipo de simulación.

Si se implementa una simulación bidimensional, se reduce el número de celdas y, en consecuencia, el costo computacional con respecto a un modelo tridimensional equivalente. La simplificación del modelo puede ser útil para realizar evaluaciones preliminares, siempre que las características tridimensionales que gobiernan el fenómeno puedan despreciarse o se consideren sus limitaciones. Otra estrategia que puede ser empleada es refinar la malla en regiones donde se esperan gradientes elevados, como cerca de interfaces o donde hay cambios abruptos de geometría, así como emplear una malla más gruesa en regiones donde el cambio sea relativamente uniforme [19].

La elección del tipo de elementos debe realizarse de acuerdo con la geometría y el fenómeno físico. De acuerdo con la referencia consultada, los elementos

hexaédricos (o su equivalente en 2D, cuadriláteros) son más apropiados en regiones de flujo laminar. En cambio, para regiones turbulentas, los elementos tetraédricos (o triángulos para 2D) son más adecuados [19].

Para solucionar el sistema se puede utilizar el criterio de convergencia. Una solución numérica converge cuando el cambio en las variables que describen al flujo entre iteraciones sucesivas se reduce por debajo de un umbral predefinido.

Sin embargo, es necesario comprobar que los indicadores de convergencia y las variables de interés se hayan estabilizado y que el resultado sea físicamente consistente [20].

3.1.2 Consideraciones de microfabricación de dispositivos microfluídicos en CD

Para la fabricación de los microcanales en el dispositivo, es relevante considerar la orientación de cada canal respecto al eje de rotación. En un canal orientado radialmente, el movimiento del fluido está relacionado principalmente con el gradiente de presión generado por el efecto centrífugo. Para canales aproximadamente isorradiales, los efectos asociados con la fuerza de Coriolis pueden adquirir mayor relevancia debido a la dirección del movimiento relativo del fluido. Asimismo, durante los procesos de aceleración o desaceleración del dispositivo, la fuerza de Euler puede adquirir importancia debido a los cambios en la velocidad angular, como se muestra en la **Figura 7** [12].

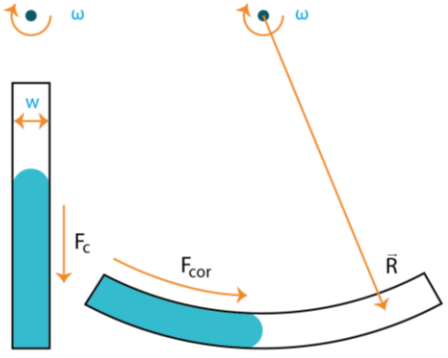


Figura 7. Disposición de las fuerzas para cada tipo de orientación presente en los microcanales.

Los canales reales no van a ser perfectamente radiales o isorradiales, por lo que las curvaturas y cambios de dirección modifican el perfil de velocidades. En

particular, un cambio de dirección genera que las velocidades presentes en el centro del flujo se trasladen a la pared exterior del canal [12]. Además, en los microcanales el transporte de masa suele estar impulsado por difusión, mientras que el régimen laminar dificulta la mezcla. Estas características pueden ser útiles para manipular muestras biológicas delicadas y células [1], [6], [8].

Dependiendo del tipo de fabricación y el material, la sección transversal del microcanal puede tener diferentes formas que afecten directamente la resistencia fluídica en los canales. Por ejemplo, la forma trapezoidal (**Figura 8**) que se puede dar con la manufactura de un cortador en V estaría dada por la **ecuación 40** [12].

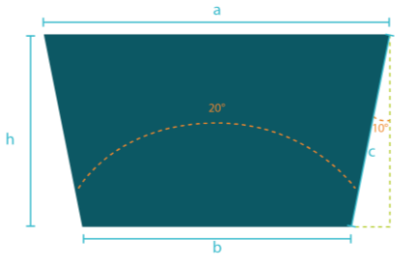


Figura 8. Geometría trapezoidal.

$$R_{f\ Trapez} = \frac{4\pi^2 \mu l}{9\varepsilon^3 d^4}(2(3\varepsilon^2 + 1) + \beta(1 - 3\varepsilon^2) \tag{40}$$

Donde:

l: *Longitud de canal*

$\beta = \frac{4\ ab}{(a+b)^2}$

$\varepsilon = \frac{a+b}{2d}$

c: *Lado lateral*

b: *Base menor*

a: *Base mayor*

Un canal microfluídico pude tener diferentes geometrías en la sección transversal, generando diferentes modelos para calcular la resistencia fluídica generada. Sin embargo, hay un modelo que se puede aproximar a cualquier geometría. Esta relación está dada por la **ecuación 41** [12].

$$R_{f\ Arbitrary} = \frac{2\mu l Pe}{A^3} \tag{41}$$

Donde:

l: *Longitud de canal* A: *Área*

Pe : *Perímetro* μ: *Viscosidad dinámica*

Igualmente, la relación entre la fuerza de Coriolis y centrífuga resulta relevante para tener una aproximación del comportamiento del fluido dentro del canal. Esta relación está dada por el número adimensional de Rossby, *Ro*, definido en la **ecuación 42** [9], [12], [13], [14], [16].

$$R_o = \frac{|\hat{f}_{Cor}|}{|\hat{f}_C|} \tag{42}$$

Esta relación nos ayuda a identificar una velocidad angular $\vec{\omega}(t)$ donde el comportamiento del fluido puede verse más influenciado por la fuerza de Coriolis que por la centrífuga. Cuando los efectos de la fuerza centrífuga predominan, la disipación del flujo en una bifurcación tiende a ser uniforme. Por otro lado, cuando la fuerza de Coriolis tiene una mayor presencia, aparece una distribución preferencial hacia una de las ramas de la bifurcación (**Figura 9**). En la manipulación de gotas un número de Rossby mayor a 1 podría influenciar la adherencia de las gotas a una pared distorsionándolas o rompiéndolas [9], [13], [21].

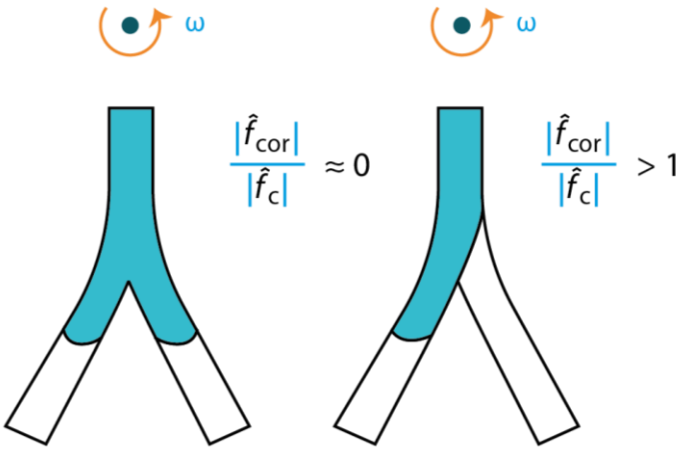


Figura 9. Comportamiento del flujo en una bifurcación con valores diferentes de Rossby.

Por ejemplo, para las características líquidas del agua ($\rho \approx 10^3 kg\, m^{-3}, \mu \approx 1 mPa\, s$) y un ancho de canal D =200[μm], la velocidad angular ω, en la que se puede encontrar un mayor efecto de la fuerza de Coriolis sobre la Centrífuga, se encuentra entre 100 a 200 rad s^{-1} ≈ 950 a 1900 rpm. Otros datos recabados muestran que experimentalmente con un ancho de canal de 360 [μm] y una profundidad de 125 [μm] el valor es de aproximadamente 3340 RPMs [13], [14], [16].

3.2 Generación de microgotas

La generación de microgotas requiere una geometría o configuración adecuada de los microcanales que favorezca la formación de un cuello en la fase dispersa y su posterior ruptura debido al balance de las fuerzas que actúan sobre el fluido. Si las condiciones de operación se mantienen, este proceso puede repetirse de manera continua, permitiendo la generación de gotas [10], [11].

3.2.1 Emulsificación por escalón

En la emulsificación por escalón, la fase dispersa atraviesa una boquilla y se expande, en forma de disco (proceso de inflado), sobre una terraza. Esta forma presenta una mayor área interfacial que una forma esférica, lo que genera inestabilidad a causa de la energía libre interfacial. Debido a que la sección correspondiente a la unión entre la boquilla y la terraza se encuentra confinada por la estructura microfluídica, la curvatura de la superficie y la presión capilar son significativamente mayores que las del borde de la terraza, lo que genera un gradiente de presión. Este gradiente provoca el desplazamiento del fluido fuera de la terraza, donde la curvatura de la superficie disminuye y el gradiente de presión aumenta. Como consecuencia, el flujo de líquido a través del borde de la terraza es mayor que el proveniente de la boquilla, formando un hilo acuoso que se va reduciendo hasta romperse, dando lugar a la formación de una gota que se deposita en el pozo que contiene la fase continua (**Figura 10**) [1], [22], [23], [24]

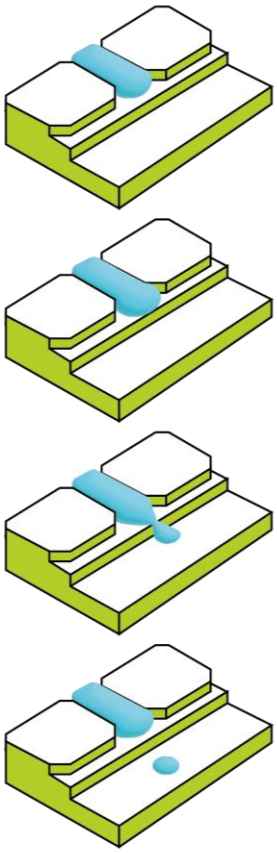


Figura 10. Proceso de generación de microgota en emulsificación por escalón. Comenzado desde la entrada del flujo a la boquilla hasta la separación de la gota en el pozo.

3.2.2 Parámetros para la generación de microgotas

Durante la generación de gotas, la tensión interfacial y las fuerzas viscosas e inerciales están presentes en el proceso. Para identificar cuál de estos efectos

tiene mayor influencia, se emplean números adimensionales, como el número capilar (Ca), que relaciona los efectos viscosos con la tensión interfacial, y el número de Weber (We), que relaciona los efectos inerciales con la tensión interfacial. Estas relaciones se muestran en las **ecuaciones 43 y 44** [1], [9], [10], [23].

$$Ca_{CP} = \frac{\mu_{DP}\, v_{DP}}{\gamma_{12}} = \frac{Fuerzas\ viscosas}{tensión\ interfacial} \tag{43}$$

$$We_{DP} = \frac{\rho_{DP}\, {v_{DP}}^2\, D}{\gamma_{12}} = \frac{Fuerzas\ inerciales}{tensión\ interfacial} \tag{44}$$

Donde:

μ_{DP} *: Viscosidad dinámica de la fase dispersa.*

γ_{12} *: Tensión superficial*

v_{DP}*: Velocidad de la fase dispersa.*

ρ_{DP}*: Densidad de la fase dispersa*

D *: Escala de longitud característica, como el ancho o el diámetro hidráulico*

Dependiendo de los valores de estos parámetros, pueden distinguirse diferentes regímenes de flujo. En el régimen de goteo predominan las fuerzas de tensión interfacial, por lo que Ca y We tienen valores reducidos, formando gotas que tienden a ser esféricas. Al aumentar los efectos viscosos o inerciales puede aparecer un régimen de chorro donde las gotas se deformen fácilmente en la segunda fase líquida. La transición entre ambos regímenes depende de las condiciones de operación, las propiedades de los fluidos y la geometría del dispositivo. Sin embargo, experimentalmente el artículo de Sugiura et al. demostró que el punto de transición entre regímenes esta dado por un número capilar crítico (Ca_{Cri}), que depende de la velocidad de la fase dispersa y se encuentra entre 0,023 y 0,050 para sus condiciones [1], [10], [23], [25].

En la **Figura 11** el diámetro adimensional es casi constante por debajo del *Ca* crítico a pesar de que el tamaño del microcanal, la viscosidad y la tensión

interfacial sean diferentes. Donde el diámetro adimensional de la gota ($\overline{D}$) está dada por la **ecuación 45** [23].

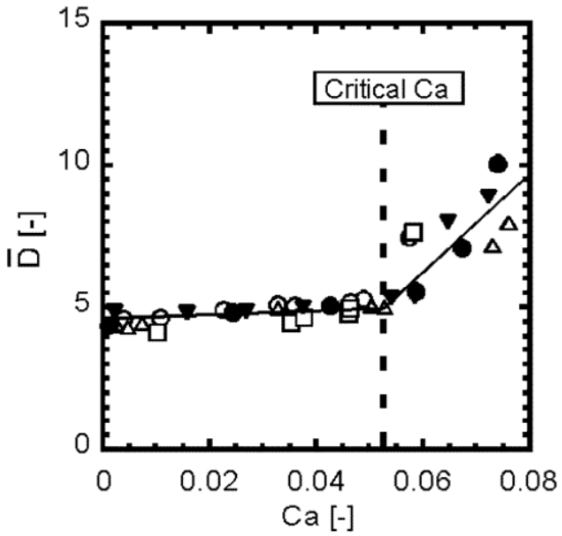


Figura 11. Gráfico de relación entre el diámetro adimensional $\overline{D}$ y capilaridad de una emulsificación por escalón con diferentes tamaños de boquilla, diferentes relaciones de viscosidad y diferentes tensiones interfaciales. Los sistemas experimentales son (o) con 8 [µm]; 56; 5.9 [mN/m], (□) con 16 [µm]; 56; 5.9 [mN/m], (Δ) con 8 [µm]; 56.4; 5.7 [mN/m], (·) con 8 [µm]; 55; 5.3 [mN/m] y (▾) con 8 [µm]; 54.4; 2.9 [mN/m]. Reproducida de [29].

$$\overline{D} = \frac{D}{d} \tag{45}$$

Donde:

D: *Dímetro de la gota.*

d: *longitud característica (para el estudio consultado la profundidad del microcanal fue lo más representativo)*

El número capilar no incorpora explícitamente el efecto del campo centrífugo ni las dimensiones del canal sobre la que actúa. Para contemplar estos efectos de manera explícita puede emplearse el número de enlace o de Bond (Bo) mostrado en la **ecuación 46**. Este número permite estimar el impacto de la gravedad centrífuga frente a la tensión superficial [1], [9], [23], [25].

$$B_O = \frac{\Delta\rho g {D_h}^2}{\gamma_{12}} = \frac{\Delta\rho r\omega^2 {D_h}^2}{\gamma_{12}} = \frac{Fuerza\ gravitacional}{tensión\ interfacial} \quad (46)$$

Donde:

$\Delta\rho$: *Diferencia de densidades entre la fase dispersa y continua.*

r: *Radio respecto al centro de rotación*

ω: *Velocidad angular.*

D_h : *Escala de longitud característica, en este caso el diámetro hidráulico.*

La tasa de producción de las gotas puede modificarse mediante la velocidad de rotación y la geometría del dispositivo, parámetros que son explícitos en el número de Bond, por lo que números altos pueden indicar una mayor tasa de producción (**Figura 14**). No obstante, un aumento de la velocidad de rotación desmedida puede cambiar el régimen de goteo a chorro, por ello podemos definir una velocidad de cambio igual a la ocupada para obtener Ca_{Cri}. Debajo de la velocidad de cambio o crítica, los diámetros de las gotas pueden tener una tendencia a ser constantes como se muestra en las **Figura 12 y 13** [9], [22], [23], [25], [26].

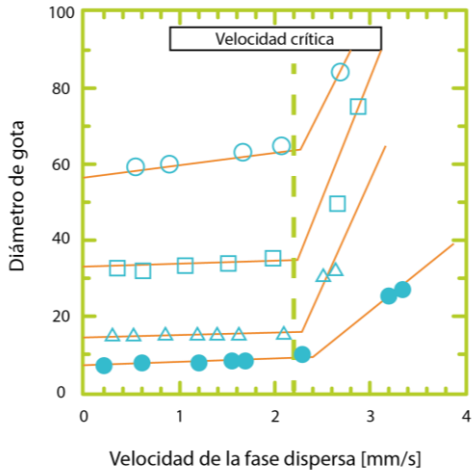


Figura 12. Relación entre el diámetro de la gota y la velocidad de la fase dispersa utilizando diferentes tamaños de boquillas. Las profundidades de las boquillas son 16 (o), 8 (□), 4 (Δ) y 2 μm (·). Donde se puede apreciar una velocidad critica. Adaptada de [23].

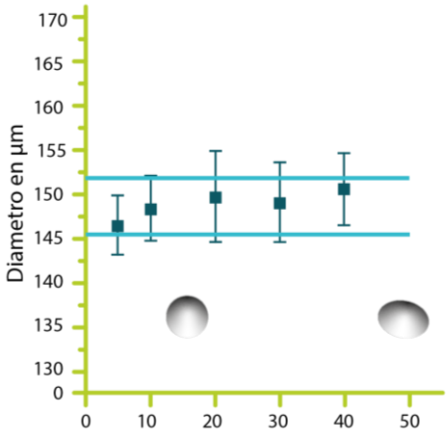


Figura 13. Relación entre el diámetro de la gota y la frecuencia de giro donde se puede apreciar un umbral en el que el valor se mantiene. Adaptada de [22] .

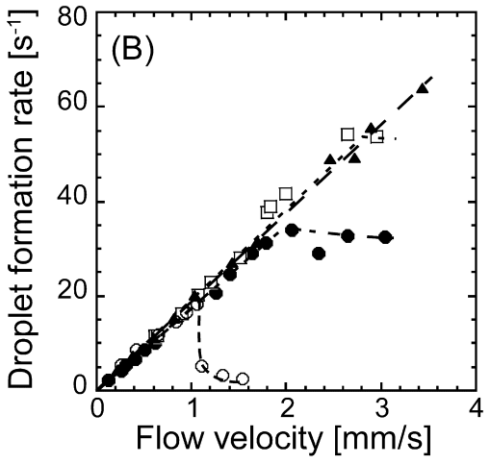


Figura 14. Relación entre la tasa de generación de gotas y la velocidad del flujo de la fase dispersa. Donde las tensiones interfaciales fueron 3.6 mN/m (o), 4.5 mN/m (▲), 13.7 mN/m (□) y 17.5 mN/m (●). Reproducida de [26].

En la emulsificación por escalón, el tamaño de la gota está influenciado por la medida característica de la boquilla y por la longitud de la terraza. Cuando la longitud de la terraza es pequeña respecto de la escala característica de la boquilla (como el diámetro hidráulico), su influencia sobre el diámetro de la gota puede ser limitada. Conforme aumenta la longitud de la terraza, esta puede adquirir mayor importancia en el proceso de generación, en especial si es mayor que la medida característica del canal (**Figura 15**). Algunos estudios han reportado longitudes críticas (por ej. de 500 µm) a partir de las cuales no aumenta el volumen de las gotas y forman gotas satélites [22], [24].

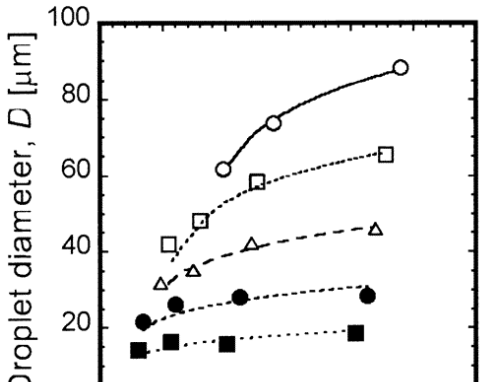


Figura 15. Relación entre el diámetro de la gota y la longitud de la terraza, utilizando diferentes profundidades en la boquilla; 16 µm (○), 11 µm (□), 7 µm (△), 4 µm (·) y 2 µm (▪). Reproducida de [24] .

La longitud característica de la boquilla tiene una relación lineal con el diámetro de las gotas, si la longitud es grande el volumen de la fase dispersa desprendida es de la misma proporción, como se muestra en la **Figura 16** [22], [26].

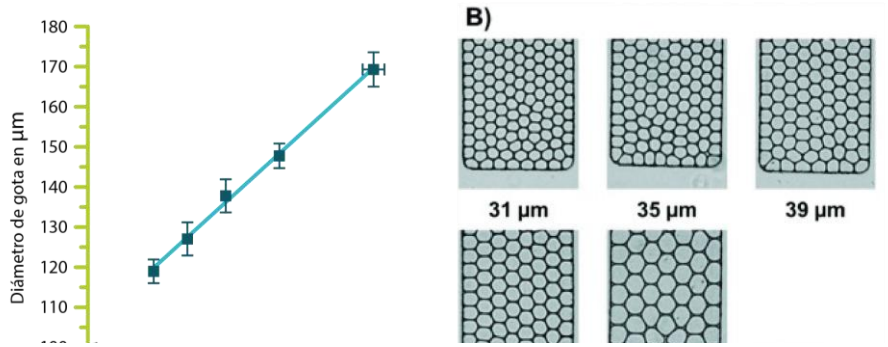


Figura 16. A la izquierda se puede visualizar que a mayor profundidad en la boquilla se genera un mayor diámetro. En B) muestra el tamaño de las gotas con las profundidades establecidas en la relación lineal. Adaptada de [22] .

3.2.3 Fluidos de trabajo para la generación de microgotas

Las emulsiones se producen en una mezcla de dos fluidos inmiscibles donde la fase dispersa queda suspendida como gotas en la fase continua. Dependiendo de la propiedad de la superficie del dispositivo microfluídico, se elige uno de los dos fluidos inmiscibles (normalmente agua y aceite) como fase continua. La superficie hidrofílica es óptima para la generación de emulsiones con fase continua acuosa (*O/W*), mientras que la superficie hidrofóbica es adecuada para emulsiones con fase continua aceitosa (*W/O*). Sin embargo, se puede modificar la humedad superficial por medios químicos y/o físicos. [9], [10], [27].

Para cada fase se requiere saber la densidad, la viscosidad y por último la tensión interfacial entre ellas. Algunos de los datos que se pueden recabar de los artículos leídos, se concentran en la **Tabla 2** [9], [23], [24], [25], [27], [28].

Tabla 2: Datos de los fluidos para la emulsificación.

Fluido/Propiedades	μ(mPa s)	ρ (kg/m^3)	γ_12 (mN/m)	Temperatura
Agua	1.09	1005		25°
Aceite de girasol	62.2	909	28.33	25°
Aceite de silicon	64.3	997	14.26	25°
Trioleína	60	909	4.25	25°
Agua MilliQ	1.1	998.2		
Aceite de Palma	28	897	14-20	50°

3.2.4 Geometría del canal de salida de la microgota

Los parámetros geométricos más importantes para la emulsificación escalonada son la profundidad, el ancho de la boquilla y la longitud de la terraza, como se ilustra en la **Figura 17**. La siguiente tabla recaba algunas medidas reportadas en diferentes investigaciones [22], [23], [26], [27], [29].

Tabla 3: Medidas importantes para la emulsificación por escalón según autores selectos.

Características	Medidas de Schuler et al. [µm]	Medidas de Sugiura et al. [µm]				Medidas de Kubicki et al. [µm]	Medidas de Gowda et al. [µm]
Volumen de la cámara de entrada.	17 [µL]					215 [µL]	100 [µL]
Ancho del canal de conexión [A].	200					1000	150
Profundidad del canal [h1].	100					200	
Ancho de la boquilla [w2].	90	3.3	4.7	8.3	16	200 hasta 500	140
Profundidad de la boquilla [h1].	60	2	4	8	16	200	
Longitud de la boquilla [l].		7.7	14	32	68	1000	
Longitud de la terraza [t].	100	15	28	57	113	200	
Ancho de la cámara de recolección de gotas.	13.5 [mm]						
Longitud de la cámara de recolección de gotas.	10 [mm]						
Volumen de la cámara de salida.						330 [µL]	
Ancho y longitud de los pilares.	500						
Profundidad de la cámara de recolección de gotas [h2].	200	100	100	100	100	600	200
Diametro de gota.	145-152	9	14	33	58-60		187+-16.3

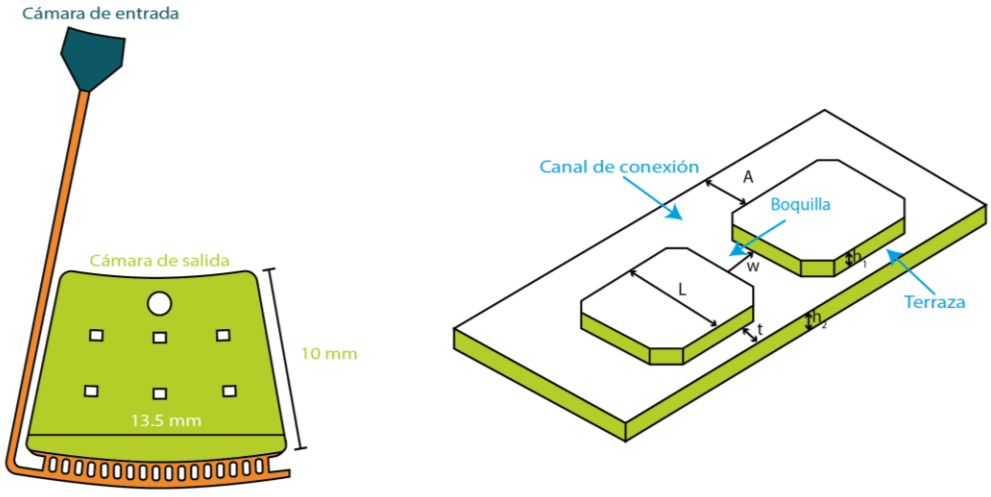


Figura 17. Variables del dispositivo microfluídico para generar microgotas a través de la emulsificación por escalón.

4 Diseño experimental

4.1 Diseño conceptual del sistema

Como se mencionó en la introducción y en el primer apartado del marco teórico, los dispositivos de microfluídica centrífuga suelen adoptar una geometría de disco similar a la de un CD. Estos dispositivos suelen estar conformados por varias láminas que se diseñan y fabrican individualmente, para posteriormente ser unidas mediante láminas adhesivas sensibles a la presión, generando una estructura microfluídica sellada. Las láminas empleadas en estos dispositivos pueden estar fabricadas con materiales biocompatibles, translúcidos y rígidos, como el polimetilmetacrilato (PMMA, acrílico) o el policarbonato [28]. Para el dispositivo desarrollado en este trabajo se adoptaron dimensiones similares a las de un CD estándar; por ello, el diámetro del disco es de 12 cm y el diámetro del orificio central es de 15 mm, destinado al montaje del disco en el motor [21], [22], [29] .

Con el fin de optimizar el uso de material de fabricación, se optó por utilizar únicamente una región central del disco, en la que se pueden integrar dos pruebas en cada extremo. Para facilitar el sellado del dispositivo se incorporaron seis orificios de alineación de 1/8 in como se muestra en la **Figura 18.**

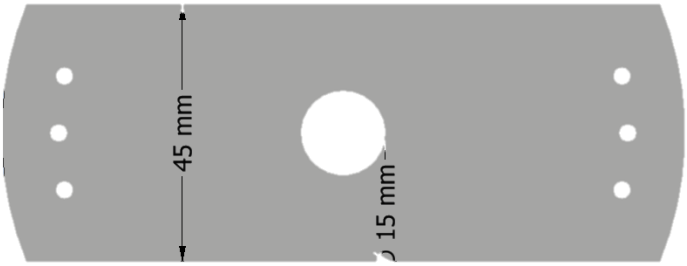


Figura 18. CD reducido con orificios de alineación. Tapa inferior del disco.

Para la distribución de los componentes del dispositivo, se tomó como referencia el concepto presentado por Schuler et al., que contempla una cámara de entrada, microcanales, boquillas y una cámara de salida. A partir de esta configuración se determinaron las dimensiones necesarias para su implementación en el

dispositivo desarrollado en este trabajo. Además, se propuso una distribución que incorpora canales radiales e isorradiales, como se muestra en la **Figura 19** [22].

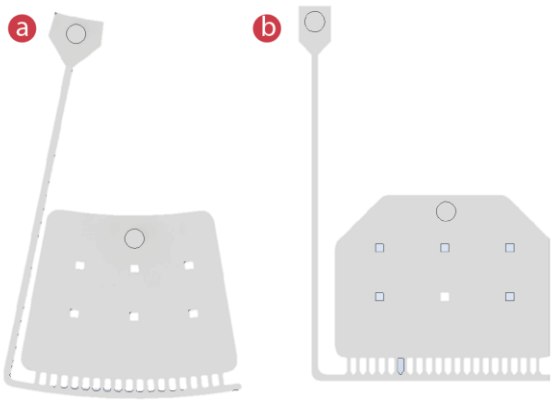


Figura 19. Propuestas de chip microfluídico. A) Modelo radial e isoradial. B) Modelo de Schuler et al.

Se emplearon varias boquillas con el propósito de aumentar la probabilidad de éxito en la generación de microgotas y reducir el impacto de una posible obstrucción en alguna de ellas.

4.2 Definición de parámetros de diseño

Las dimensiones del dispositivo microfluídico se determinaron con base en los datos de la **Tabla 3**, la resolución del equipo de manufactura y los materiales disponibles. El cortador más pequeño de la CNC MDX-50 tiene un diámetro de 397 [μm] (1/64 in), el cual se empleará para realizar el canal de conexión entre las boquillas y la cámara de entrada, con una profundidad de 100 [μm]. La longitud del canal de conexión se determinó tomando como referencia el modelo de Kubicki et al. y una aproximación del modelo de Schuler et al., obteniendo una longitud de 20 [mm]. Asimismo, se realizó una aproximación de las dimensiones de las cámaras de entrada y de salida [22], [27] .

Como se mencionó en la sección 3.2.4, en la emulsificación por escalón las dimensiones de la geometría son relevantes para la generación de las gotas. Para la región de las boquillas se definieron el ancho, la profundidad y la longitud, representados como w, h_1y L, respectivamente, en la **Figura 17**. De acuerdo con los datos de la **Tabla 3**, el parámetro L presenta un intervalo de 7.7 a 1000 [μm], por lo que se seleccionó una longitud de 800 [μm]. Para determinar el ancho y la profundidad de las boquillas se utilizó la caracterización del cortador en V de 20°, mostrada en la **Figura 20**. Considerando una profundidad de 100 [μm] se obtiene un ancho de 211[μm]. Para la terraza se seleccionó una longitud de 100 [μm], mientras que para el pozo se estableció una profundidad de 140 [μm].

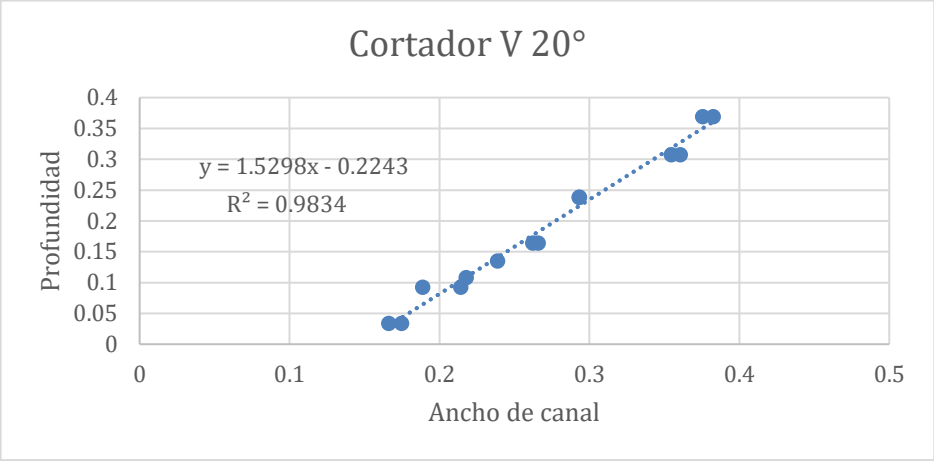


Figura 20. Relación entre profundidad y ancho del canal para cortador en V de 20°

Para determinar las propiedades de la fase dispersa, es necesario definir el fluido que cumplirá este papel. Para este trabajo se seleccionó el agua como fase dispersa. Esta elección se relaciona con las propiedades superficiales del policarbonato, cuya absorción de agua se encuentra entre 0.1 y 0.35 %, y presenta un ángulo de contacto con el agua de $87.8° \pm 0.4°$, cercano a 90° [30].

Una vez definidas las dimensiones del dispositivo y la fase dispersa, es posible determinar las velocidades de operación y los números adimensionales que pueden utilizarse como referencia para establecer las condiciones de diseño. Entre estos parámetros se considera el número de Rossby, cuya magnitud puede utilizarse para evaluar la importancia relativa de los efectos asociados a la fuerza de Coriolis respecto al movimiento debido a la rotación. Para establecer un límite de referencia, se considera $Ro = 1$, condición a partir de la cual los efectos asociados a Coriolis pueden adquirir una mayor relevancia respecto a los efectos rotacionales considerados en el modelo.

$$R_o = \frac{|\hat{f}_{Cor}|}{|\hat{f}_C|} = \frac{\frac{2\,\rho^2\omega^3\vec{R}(t)D^2}{8\mu}}{\rho\omega^2\vec{R}(t)} = \frac{2\,\rho^2\omega^3\vec{R}(t)D^2}{\rho\,\omega^2\vec{R}(t)8\mu} = \frac{\rho\,\omega D^2}{4\,\mu}$$

Calculando el diámetro hidráulico

$$D_h = \frac{4A}{Pe} = \frac{4(397 * 100)}{2(397) + 2(100)} = 159.75\ [\mu m]$$

Igualando $\mathrm{R_o} = 1$ se despeja ω

$$\omega = \frac{4\,\mu}{\rho\,\mathrm{D}^2} = \frac{4(1.09\mathrm{x}10^{-3})}{1005(159.75\mathrm{x}10^{-6})^2} = 169.995\,\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}} = 1623.332\ \mathrm{RPMs}$$

A una velocidad de $1623.332\ RPMs$ la fuerza centrífuga sugerentemente pierde efecto frente a la fuerza de Coriolis. Valores menores a esta velocidad sugieren una mayor prevalencia en los efectos centrífugos.

De acuerdo con estudios previos, el régimen de goteo se encuentra por debajo de un número capilar crítico que se encuentra aproximadamente entre 0.023 y 0.055. Por lo tanto, se determinó la velocidad correspondiente a este intervalo utilizando como referencia las propiedades del agua y del aceite vegetal de girasol mostradas en la **Tabla 2** [23].

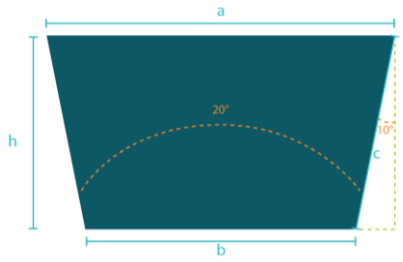
$$Ca_{DP} = \frac{\mu_{DP}\,U}{\gamma_{12}} - - \rightarrow U = \frac{\gamma_{12}\,Ca_{CP1}}{\mu_{DP}} = \frac{28.33x10^{-3} * (0.023)}{1.09x10^{-3}} = 0.5977\left[\frac{m}{s}\right]$$

$$U = \frac{\gamma_{12}\,Ca_{Cp2}}{\mu_{DP}} = \frac{28.33x10^{-3} * (0.055)}{1.09x10^{-3}} = 1.4229\left[\frac{m}{s}\right]$$

Para convertir estos valores a RPM se utilizaron los modelos de velocidad descritos en el marco teórico, comenzando con la velocidad característica definida como v_c = ½U_{max} [12]. Para el análisis se seleccionó un punto cercano a la salida de las boquillas, cuya distancia radial aproximada respecto al centro del disco es de 39.4 [mm] (**anexo 8.1**).

$$v_c = \frac{\rho\omega^2\vec{R}(t)D^2}{16\mu} \rightarrow\ \omega = \sqrt{\frac{16\mu\ v_c}{\rho\vec{R}(t)D^2}}$$

Considerando la sección transversal trapezoidal generada por el cortador en V, se definieron las dimensiones de la geometría.



Donde $a$corresponde a la medida de 211 $[\mu m]$, b corresponde al ancho de la punta del cortador, por especificaciones de la herramienta tiene un valor de 100 $[\mu m]$ y "c" se puede deducir de la profundidad de corte de 100 $[\mu m]$ y haciendo uso de la propiedad de $\cos\theta$:

$$c = \frac{h}{\cos 10°} = \frac{100}{\cos 10°} = 101.54[\mu m]$$

Por lo tanto, el área y el perímetro de la sección transversal tienen los siguientes valores:

$$A = \frac{a+b}{2} * h = 15550\ [\mu m^2]$$

$$Pe = 514.08\ [\mu m]$$

Aplicando el concepto de diámetro hidráulico se obtiene:

$$D_h = \frac{4A}{Pe} = 120.9928\ [\mu m]$$

Sustituyendo el D por D_h se tiene:

$$\omega 1 = \sqrt{\frac{16(1.09x10^{-3}) * 0.5977}{1005(39.4x10^{-3})(120.9928x10^{-6})^2}} = 134.09\left[\frac{m}{s}\right] = 1280.46\ RPMs$$

$$\omega 2 = \sqrt{\frac{16(1.09x10^{-3}) * 1.4229}{1005(39.4x10^{-3})(120.9928x10^{-6})^2}} = 206.90\left[\frac{m}{s}\right] = 1975.74\ RPMs$$

A continuación, se utilizó el modelo de velocidad capilar. En este modelo es posible realizar la simplificación de Δr y l, debido a que representan el mismo valor.

$$U = \frac{\Delta P\, D^2}{32\mu\, l} = \frac{\rho\, \omega^2 \Delta r\, \bar{r}\; D^2}{32\mu\, l} = \frac{\rho\, \omega^2\, \bar{r}\; D^2}{32\mu} \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{32\mu\, U}{\rho\, \bar{r} D^2}}$$

$$\omega 1 = 189.64 \left[\frac{m}{s}\right] = 1810.92\, RPMs$$

$$\omega 2 = 292.60 \left[\frac{m}{s}\right] = 2794.124\, RPMs$$

Con estos resultados se estableció un intervalo inicial de operación. Para el límite inferior se tomó como referencia el trabajo de Kubicki et al. mostrado en la **Tabla 4**, en el que se reportan condiciones iniciales para la generación centrífuga de gotas. Debido a que en el dispositivo no se aplicó un tratamiento superficial específico, se seleccionó una velocidad inicial de 700 RPM, equivalente a 73.3 rad/s, con posibilidad de incrementarla durante las pruebas. Con este valor se calcularon los números de Weber y de Bond para evaluar la importancia relativa de los efectos inerciales y centrífugos respecto a los efectos asociados con la tensión superficial [27].

Tabla 4: Revoluciones mínimas para la generación de microgotas.

	Superficie no tratada		Superficie tratada	
Diámetro de boquilla [µm]	Agua como fase dispersa	Aceite como fase dispersa	Agua como fase dispersa	Aceite como fase dispersa
200	700 RPM	1200 RPM	500 RPM	1000 RPM
300	650 RPM	1000 RPM	500 RPM	800 RPM
400	600 RPM	1000 RPM	450 RPM	700 RPM
500	750 RPM	1000 RPM	500 RPM	600 RPM

$$B_O = \frac{\Delta \rho r \omega^2 {D_h}^2}{\gamma_{12}} = \frac{(1005 - 909) * (39.4x10^{-3}) * 73.3038^2 * (120.9928x10^{-6})^{\,2}}{28.33x10^{-3}}$$

$$= 0.0105$$

Para el número de Weber (We) primero necesitamos saber la velocidad teórica del fluido, usando la velocidad de rotación que se acaba de definir. Usando el modelo de velocidad característica.

$$v_c = \frac{\rho \omega^2 \vec{R}(t) D^2}{16\mu} = \frac{1005 * \ 73.3038^2 * 39.4x10^{-3} * (120.9928x10^{-6})^2}{16(1.09x10^{-3})} = 0.1786$$

Usando la velocidad capilar.

$$U = \frac{\rho\ \omega^2\ \bar{r}\ \ D^2}{32\mu} = \frac{1005 *\ 73.3038^2 * 39.4x10^{-3} * (120.9928x10^{-6})^2}{32(1.09x10^{-3})} = 0.089$$

Sustituyendo los valores:

$$We_{DP} = \frac{\rho_{DP}\ {v_{DP}}^2\ L}{\gamma_{12}} = \frac{1005 * 0.1786^2 * 120.9928x10^{-6}}{28.33x10^{-3}} = 0.1369$$

$$We_{DP} = 0.089$$

Con los valores obtenidos se estimó que, bajo las condiciones consideradas, los números de Weber y Bond permanecen en un intervalo bajo, lo que sugiere que los efectos interfaciales en la generación de microgotas tienen una importancia considerable. Sin embargo, esto no garantiza por sí solo la generación de microgotas.

Para evaluar el comportamiento laminar del fluido, se calculó el número de Reynolds considerando inicialmente una velocidad de rotación de 700 RPM. El análisis se realizó en dos puntos de interés: uno ubicado en el canal de conexión, próximo al arreglo de boquillas, y otro ubicado en la región de las boquillas.

Para el primer punto, se seleccionó la sección en la que se realizó el corte del canal de conexión para definir la entrada de la simulación de ANSYS, debido a que el interés principal se encuentra en analizar el comportamiento del fluido en la región de las boquillas. La velocidad inicial del fluido se calculó a partir de la distancia entre la sección de entrada y el centro del disco, la cual fue de aproximadamente 39.2 mm, como se ilustra en el **anexo 8.1.** Para este cálculo se utilizó el modelo de velocidad característica, debido a que proporciona una estimación de velocidad mayor que el otro modelo considerado y, por lo tanto, permite evaluar el caso más desfavorable dentro del microcanal.

$$v_c = \frac{\rho\omega^2\vec{R}(t)D^2}{16\mu} = \frac{1005 *\ 73.3038^2 * 39.2x10^{-3} * 159.75x10^{-6^2}}{16(1.09x10^{-3})} = 0.30977[m/s]$$

Para calcular el número de Reynolds se utilizaron las propiedades de la fase dispersa previamente definidas y el diámetro hidráulico correspondiente al canal de conexión.

$$R_e = \frac{\rho D U}{\mu} = \frac{1005(159.75\text{x}10^{-6})(0.30977)}{1.09x10^{-3}} = 45.6277$$

Para el segundo punto, ubicado cerca de la salida de las boquillas, se consideraron las mismas propiedades de la fase dispersa y la distancia al eje de rotación previamente establecida para este análisis, correspondiente a 39.4 mm como se muestra en **el anexo 8.1.** Asimismo, se utilizó el diámetro hidráulico de la sección transversal trapezoidal, calculado anteriormente en esta sección, con un valor de $120.9928\ [\mu m]$. El parámetro restante corresponde a la velocidad del fluido en este punto.

Utilizando la velocidad característica:

$$v_c = \frac{\rho \omega^2 \vec{R}(t) D^2}{16\mu} = \frac{1005 * \ 73.3038^2 * 39.4x10^{-3} * 120.9928x10^{-6^2}}{16(1.09x10^{-3})} = 0.178\ [m/s]$$

se calculó el número de Reynolds:

$$R_e = \frac{\rho D U}{\mu} = \frac{1005(120.9928\text{x}10^{-6})(0.17868)}{1.09x10^{-3}} = 19.933$$

El mayor valor del número de Reynolds obtenido teóricamente fue de 45.628. Por lo tanto, bajo las condiciones y dimensiones consideradas, los resultados indican que el flujo permanece dentro de un régimen laminar tanto en el canal de conexión como en la región inicial de las boquillas.

En resumen, los principales parámetros empleados para establecer las condiciones de diseño se presentan en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Parámetros de diseño

Características	Medida [µm]	Símbolo
Ancho del canal .	397	A
Profundidad del canal.	100	h1
Ancho de la boquilla sup.	211	w2
Ancho de la boquilla inf.	100	w
Profundidad de la boquilla.	100	h1
Longitud de la boquilla.	800	l
Longitud de la terraza.	100	t
Ancho de la cámara de recolección de gotas.	13.5 [mm]	
Longitud de la cámara de recolección de gotas.	10 [mm]	
Rango de RPMs de operación.	500-1280.46 RPMs	
Profundidad de la cámara de recolección de gotas.	140	h2

4.3 Modelado digital

Un modelo digital se puede entender como una representación virtual de un objeto, sistema o proceso físico, mediante la cual es posible definir sus características geométricas y de diseño. En ingeniería, estos modelos pueden utilizarse posteriormente para realizar análisis, simulaciones y procesos de manufactura antes de construir el objeto físicamente [31].

Con las medidas establecidas se generaron los modelos digitales; unos destinados al análisis CFD y otro destinado a la manufactura CNC. Para los modelos de simulación, las geometrías se dividieron en diferentes regiones con el propósito de controlar el tamaño de la malla y aumentar la resolución en las zonas de interés, particularmente en las boquillas. También se recortó el canal de conexión con el propósito de reducir el dominio de simulación y evitar modelar todo el recorrido del fluido, concentrando el análisis en la región correspondiente al arreglo de boquillas, como se muestra en las **Figuras 21, 22 y 23**. Este procedimiento se empleó en dos configuraciones: el modelo recto, cuyos canales no presentan una orientación radial o isorradial, y el modelo curvo, cuyos canales presentan estas orientaciones. Ambas configuraciones se muestran en la **Figura 19**.

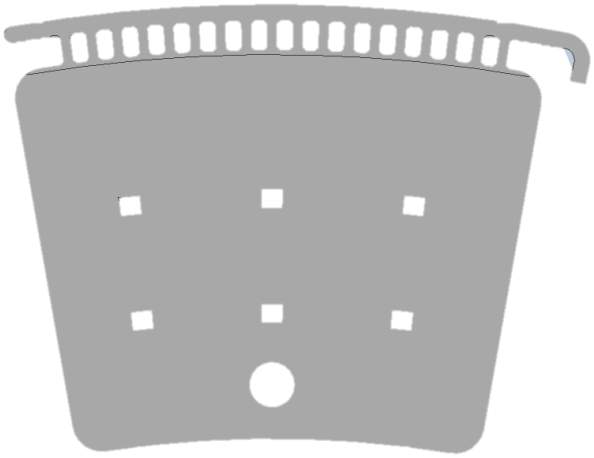


Figura 21. Modelo curvo para análisis CFD primera iteración.

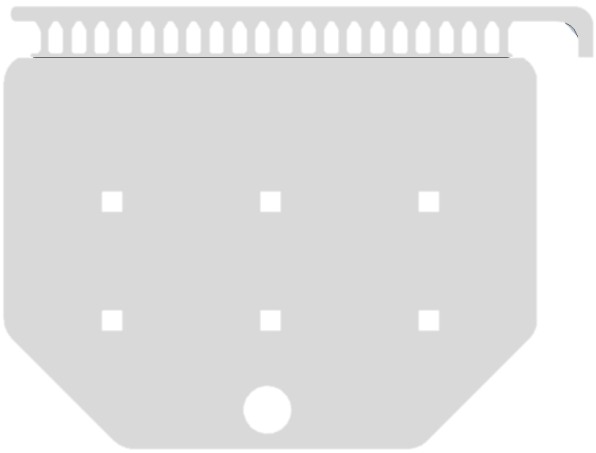


Figura 22. Modelo recto para análisis CFD

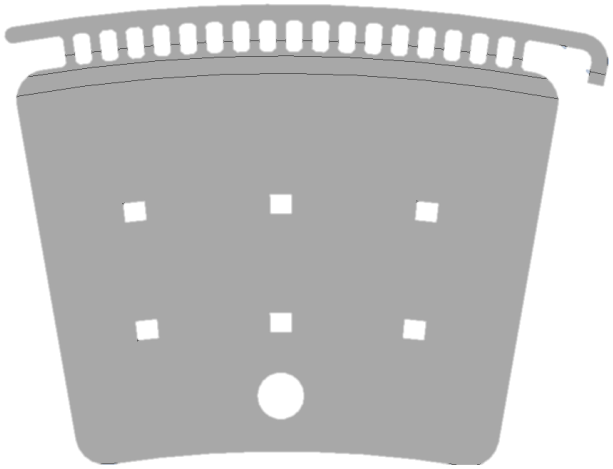


Figura 23. Modelo curvo para análisis CFD segunda iteración

Por otra parte, el modelo destinado a la manufactura se generó tomando como referencia el modelo curvo mostrado en la **Figura 19**. Posteriormente, se generó la geometría del disco y se extruyó el modelo en las zonas de interés, de manera que se removiera material y se generaran las cavidades correspondientes a la estructura microfluídica. A partir de esta geometría se generaron las trayectorias de mecanizado para la fabricación del dispositivo. El modelo empleado para la manufactura se muestra en la **Figura 24**.

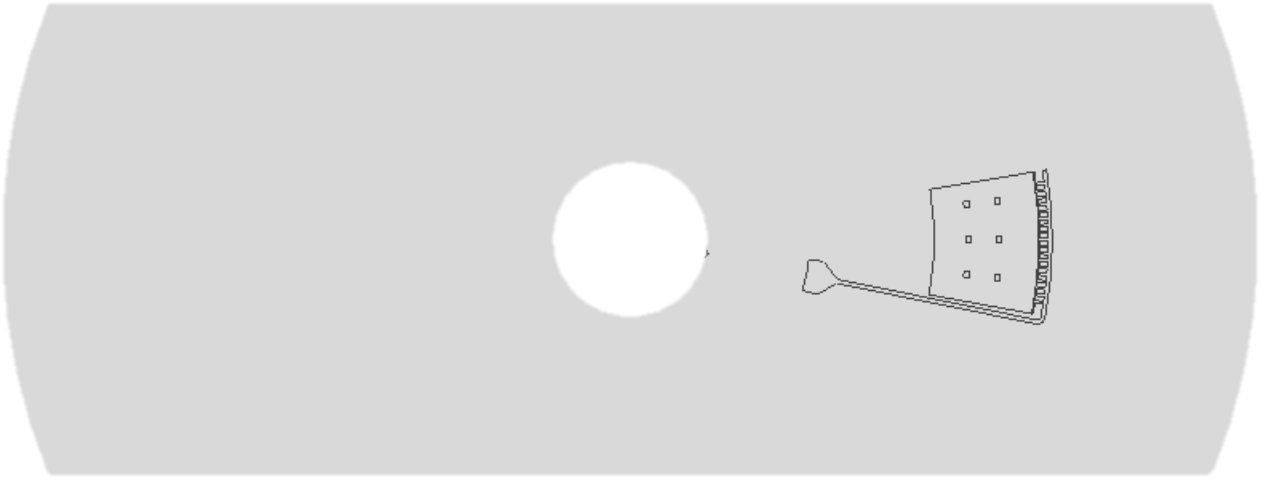


Figura 24. Modelo para la manufactura.

4.4 Simulación CFD mediante ANSYS Fluent

Se utilizaron las superficies de los modelos mostrados en las **Figuras 21** y **22** para realizar una simulación bidimensional, con el fin de reducir el tiempo de cómputo y evaluar de manera preliminar el movimiento del fluido en la región de las boquillas. Esta simplificación debe considerarse como una aproximación preliminar, debido a que la emulsificación por escalón depende de una geometría tridimensional, particularmente de la diferencia de profundidad entre la terraza y el pozo. La superficie del modelo se obtuvo, usando el entorno de *DesignModeler* en ANSYS, con la herramienta "*superfaces from faces*".

Como se ilustra en las **Figuras 21 y 22**, ambos modelos (curvo y recto) se dividieron en dos regiones para controlar de manera independiente el mallado de cada una. La región correspondiente a la boquilla y la terraza se refinó debido a las características de su geometría y a la interacción entre las fases que se presenta en esta zona, utilizando elementos triangulares. La segunda región, correspondiente al pozo, se malló utilizando elementos cuadráticos. En algunas zonas próximas a las paredes se empleó un refinamiento local para representar con mayor precisión la condición de no deslizamiento. Las mallas obtenidas para los modelos curvo y recto se muestran en las **Figuras 25 y 26**, respectivamente, mientras que sus parámetros de calidad se presentan en las **Tablas 6 y 7**, respectivamente.

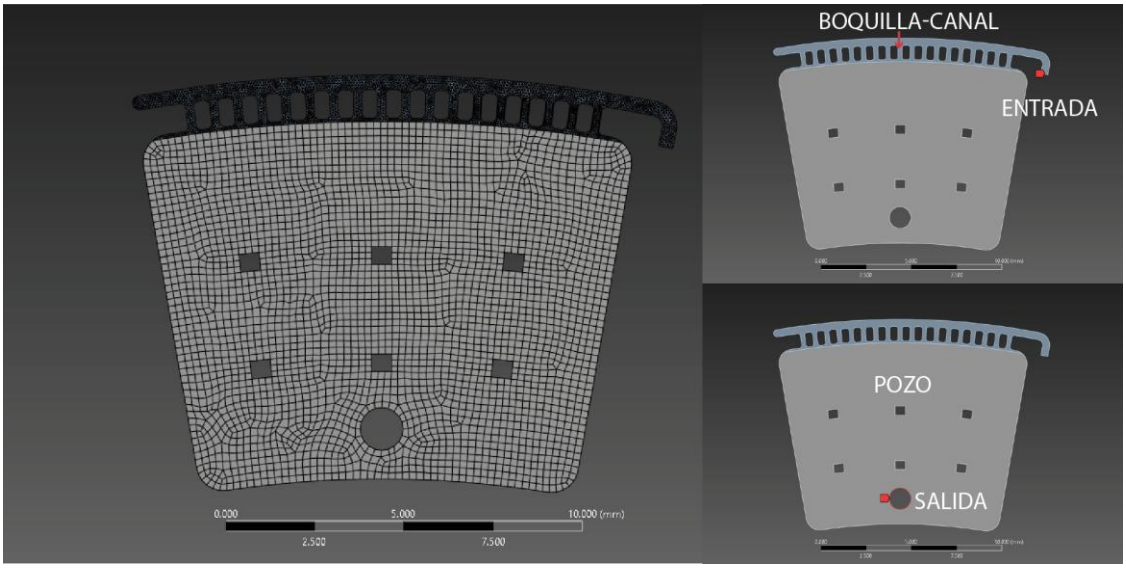


Figura 25. Mallado del modelo curvo donde se muestra la entrada, la salida y las dos secciones en las que se dividió el modelo.

Los valores de *Aspect Ratio*, *Skewness* y *Orthogonal Quality* de las mallas mostradas en las **Figuras 25 y 26** se evaluaron como métricas de calidad de malla, con el propósito de identificar zonas que presentaran elementos con posible distorsión. La evaluación se realizó considerando su proximidad a las condiciones ideales. Los valores ideales para cada métrica son los siguientes: para *Aspect Ratio*, valores cercanos a 1; para *Skewness*, valores cercanos a 0; mientras que para *Orthogonal Quality*, valores cercanos a 1. Las imágenes correspondientes a estos parámetros se presentan en los **Anexos 8.2 y 8.3**.

Tabla 6. Datos de malla para modelo curvo.

Características	Valor
Tamaño del elemento de malla en la geometría del pozo.	200 [µm]
Tamaño del elemento de malla en la geometría de las boquillas y demás elementos	70 [µm]
Aspect Ratio	1 a 5.09
Skewness	1.3x10^-10 a 0.776
Orthogonal Quality	0.36 a 1
Número de elementos	6535
Número de nodos	8399

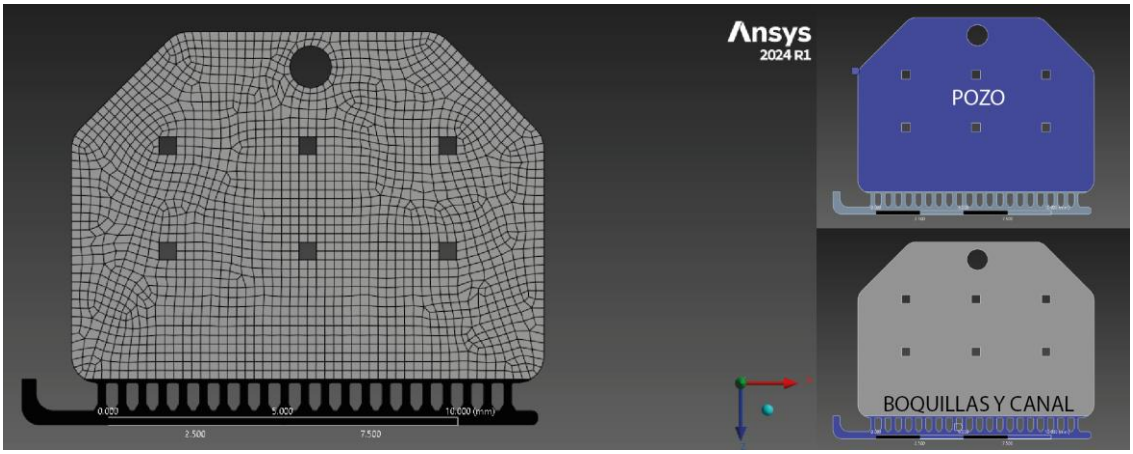


Figura 26. Mallado del modelo recto donde se muestra entrada, salida y las dos regiones en las que se dividió la geometría.

Tabla 7. Datos de malla para modelo recto.

Características	Valor
Tamaño del elemento de malla en la geometría del pozo.	250 [µm]
Tamaño del elemento de malla en la geometría de las boquillas y demás elementos	25 [µm]
Aspect Ratio	1 a 2.45
Skewness	1.608x10^-7 a 0.774
Orthogonal Quality	0.58 a 1
Número de elementos	40251
Número de nodos	22712

En el modelo curvo, los valores críticos de calidad de malla se localizaron principalmente en las paredes de las boquillas y regiones próximas. Sin embargo, la mayor parte de la superficie presenta valores de calidad adecuados, lo que resulta suficiente para realizar una evaluación preliminar del flujo. Véase en el **anexo 8.2.**

Para el modelo recto se aumentó el número de elementos en la zona de las boquillas y el canal de conexión. Esta modificación redujo las variaciones e intervalos de las métricas de calidad de malla mostradas en la iteración curva en la **tabla 6**, mejorando la calidad de la malla. Las regiones críticas se localizaron principalmente en zonas donde se presentaron cambios de tamaño entre regiones, véase en el **anexo 8.3.**

Posterior a realizar la malla se definió la configuración de la simulación (*setup*). De acuerdo con el marco teórico, se espera un régimen laminar. Debido a que se busca observar la evolución de la fase dispersa en la fase continua, se utilizó una formulación transitoria. Al ser fases incompresibles el tipo de solución sería a través de la presión. Asimismo, debido a las dimensiones reducidas del dispositivo, la gravedad no tiene efecto alguno. Esta configuración se muestra en la **Figura 27**.

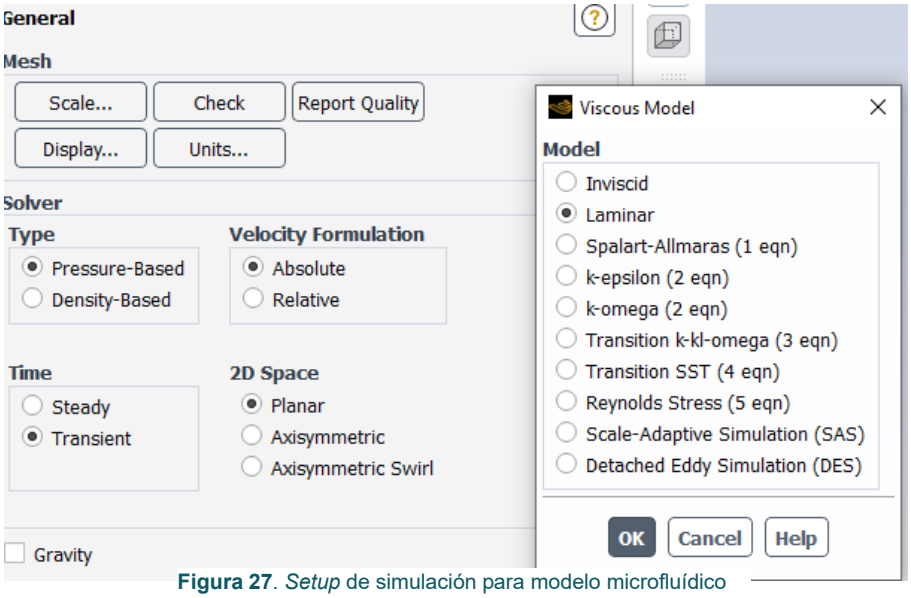


Figura 27. *Setup* de simulación para modelo microfluídico

Para representar la interacción entre agua, aceite y aire se activó el modelo multifásico VOF (*volume of fluid*). Se empleó una formulación explícita y se activaron las fuerzas de cuerpo implícitas. Los valores de densidad, viscosidad y fuerza interfacial fueron tomados del agua y aceite de girasol mostrados en la **Tabla 2** para tener un aproximado del comportamiento.

En el apartado "*Cell zone conditions*" se definió el movimiento rotacional del dispositivo mediante "*Frame Motion*", estableciendo una velocidad de 700 RPM. En el apartado de "*Boundary Conditions*" definimos condiciones de entrada del flujo. Debido a que se recortó el canal de conexión porque nos interesa el comportamiento en las boquillas, calculamos la velocidad inicial del fluido a partir

de la distancia entre la sección de entrada y el centro del disco. Esta distancia fue de aproximadamente 39.2 milímetros (**anexo 8.1**).

$$v_c = \frac{\rho\omega^2\vec{R}(t)D^2}{16\mu} = \frac{1005 * 73.3038^2 * 39.2x10^{-3} * 159.75x10^{-6^2}}{16(1.09x10^{-3})} = 0.30977[m/s]$$

Esta velocidad se utilizó como condición de entrada en la simulación. Para la estimación se empleó la velocidad característica definida en el marco teórico, con el propósito de utilizar un valor representativo más alto con el que se pueda iniciar.

La inicialización se realizó mediante *Hybrid Initialization*. Posteriormente, se utilizó un *patch* para establecer inicialmente la distribución del aceite en la región del pozo y ver la interacción de los dos fluidos inmiscibles durante la simulación.

En la simulación el "*number of time steps"* fue de 5000 con un "*time step size*" de 0.0001[s] y un "*time step*" de 20. En la **Tabla 8** se muestran las especificaciones del simulador ANSYS.

Tabla 8. Datos de la simulación de Ansys.

Parámetro	Valor	
Tipo de estudio	Fluid Flow	
Tipo de solución	Pressure-Based	
Versión	Ansys 2024 R1	
Criterio de residuo relativo	1x10^-3	
Hardware	CPU	AMD Ryzen 5 3600 6-Core Processor
	GPU	NVIDIA Quadro P1000
	Memoria	16 GB

4.5 Iteraciones diseño–simulación

Para la segunda iteración se utilizó el diseño radial, debido a que esta configuración permite que la fuerza centrífuga tenga un protagonismo mayor en el trasporte del flujo. En esta iteración el modelo curvo fue dividido en más partes en comparación con la primera iteración, como se muestra en la **Figura 23**, para posteriormente proyectar la cara seleccionada en *DesignModeler* y obtener un cuerpo con múltiples superficies y así controlar el tamaño de la malla en cada zona. El mayor refinamiento se concentró en la región pozo-boquilla y a diferencia de la primera iteración, se empleó una malla triangular en todo el dominio para adaptarse a la geometría de las boquillas, como se muestra en la **Figura 28**.

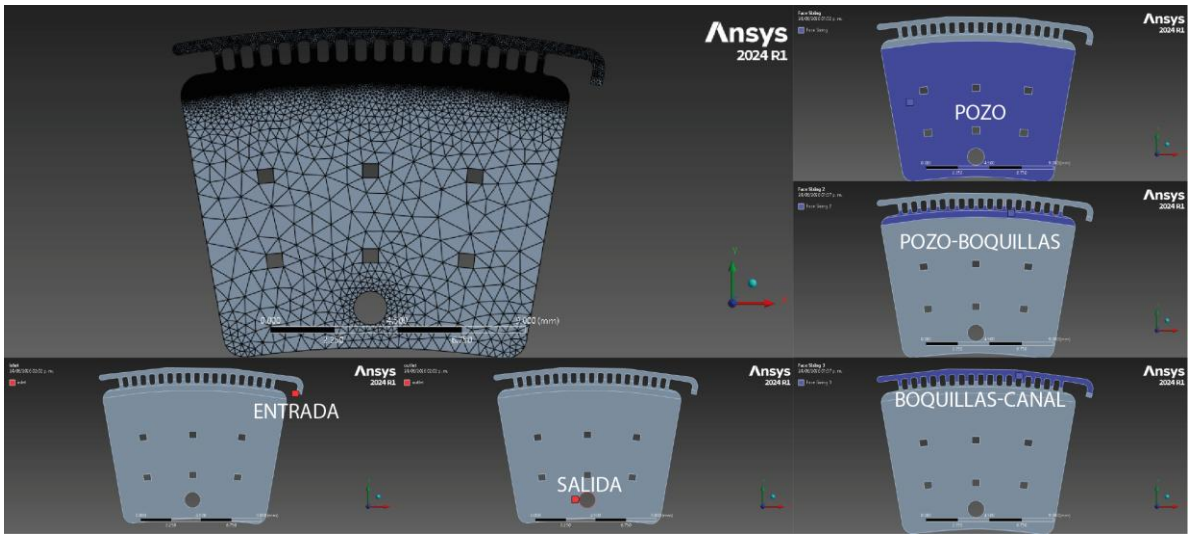


Figura 28. Mallado de la segunda iteración del modelo curvo, mostrando las secciones en las que se dividió la superficie, así como la entrada y salida definida en el modelo.

Los valores de las métricas de calidad de malla para esta segunda iteración se encuentran recopilados en la **Tabla 9** y pueden visualizarse en el **anexo 8.4**

Tabla 9. Datos de malla para segunda iteración de ANSYS.

Características	Valor
Tamaño de sección pozo	1 [mm]
Tamaño de sección pozo-boquilla	10 [µm]
Tamaño de sección boquilla-canal de conexión	70 [µm]
Aspect Ratio	1 a 2.56
Skewness	3.6218x10^-7 a 0.62
Orthogonal Quality	0.62 a 1
Número de elementos	109571
Número de nodos	246300

En comparación con las iteraciones anteriores, se redujo el intervalo de valores de las métricas de calidad de malla. Las regiones críticas se localizaron principalmente en las transiciones entre las distintas zonas de refinamiento, véase en el **anexo 8.4.** Para trabajos posteriores podría evaluarse un refinamiento tridimensional en estas regiones.

Para el *setup* se siguió el mismo procedimiento general utilizado en las primeras simulaciones como se muestra en la **Figura 27**. En esta iteración se aplicó un *patch* a toda la geometría con una fracción de volumen de aceite de 0.8, con el propósito de iniciar la simulación con la geometría parcialmente llena y observar la interacción entre fases.

4.6 Fabricación del CD microfluídico

Para realizar el contorno y los orificios de las cámaras de entrada y salida se utilizó la cortadora láser (**Figura 29**), con el objetivo de reducir el tiempo de manufactura. Antes del corte se colocó la cinta adhesiva de doble cara sobre el material para evitar operaciones posteriores de remoción de adhesivo en las zonas de entrada y salida de la estructura microfluídica.

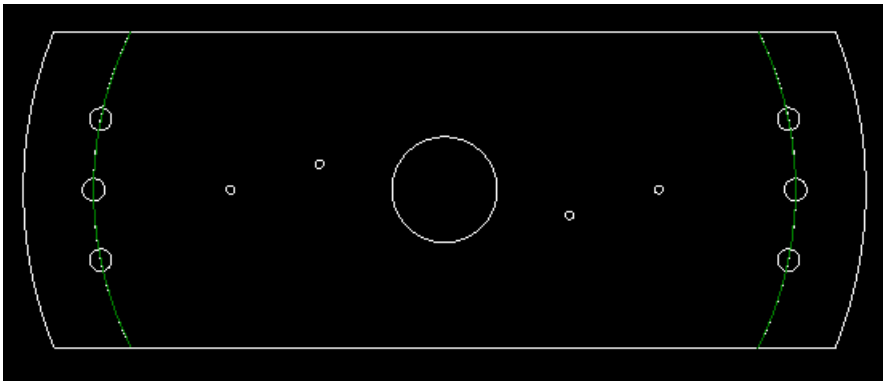


Figura 29. Tapa superior del dispositivo microfluídico, con orificios de las cámaras de entrada y salida del arreglo microfluídico. Cortado con la cortadora láser.

Para el proceso de manufactura sustractiva, se mecanizaron las estructuras microfluídicas sobre la superficie del disco, como se muestra en la **Figura 30,** utilizando el modelo de la **Figura 24**.

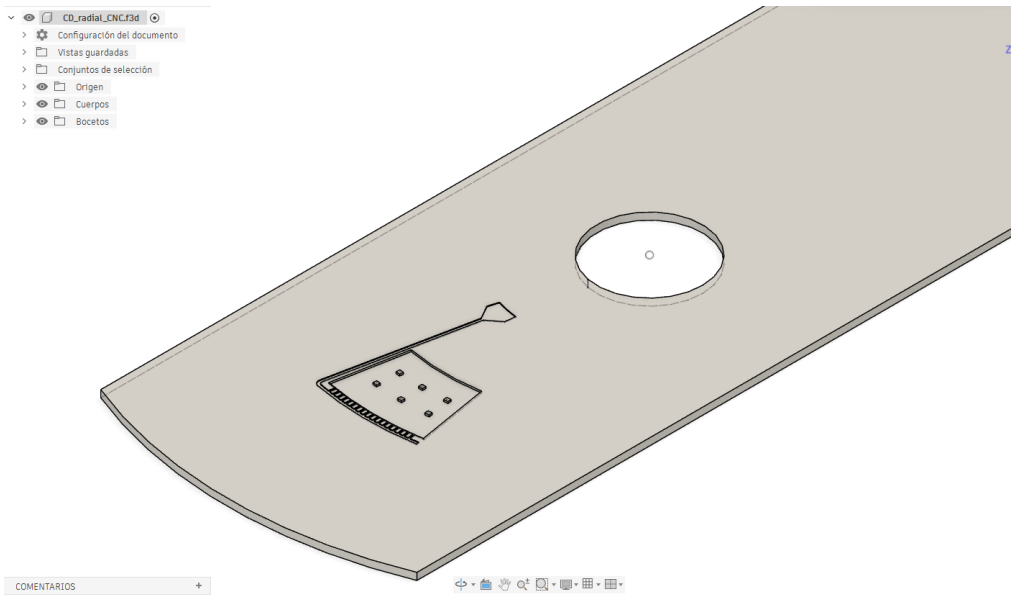


Figura 30. Modelo CD con la estructura microfluídica en el software Fusion 360.

El programa de manufactura se realizó mediante Fusion 360. Los parámetros de RPM y de Feedrate de cada herramienta se calcularon mediante el programa Gwizard [32], en el cual previamente se ingresaron las características de la CNC MDX-50 y el material de trabajo. Dando como resultado la **Tabla 10** con los parámetros de mecanizado y las características dimensionales de cada cortador.

Tabla 10. Datos para manufactura

MATERIAL		HERRAMIENTA							STICKOUT (mm) 67% MAX	CORTE MAX		Vc (m/min)	Ataque %	HIGH SPEED MACHINING							
PIEZA	PROCESO	# HTA	Ø Cortador	Descripción	Coating	Longitud total (mm)	Longitud filo (mm)	Ø Zanco (mm)		AXIAL (mm)	RADIAL (mm)			RPM	Adj. Chipload (mm/tooth)	FEEDRATE (mm/min)	RAMP (mm/min)	PLUNGE (mm/min)	Defle %	MRR (mm)	Tool Torque (Nm)
CD	Cajera	4	1.5	2F	HSS	38.0	6.5	3.175	25	0.5	1.5	33	10	7000	0.0031	43	43	22	6.0	0.0	0.0
	Cajera	4	0.397	2F	HSS	38.0	0.8	3.175	18	0.035	0.397	9	12	7000	0.0029	41	41	21	1.4	0.0	0.0
	Ranurado	V	20°	1F	HSS	38.0	9.0	3.175	20	0.3		100	10	10000		80					
	Contorneado	4	0.794	2F	HSS	38.0	3.8	3.175	18	0.0	0.8	17	12	7000	0.0040	55.90	56	28	2.8	0.0	0.0
									0												
									0												
									0												

Para realizar las diferentes trayectorias de mecanizado se hizo uso de diferentes operaciones de fresado, como se ilustra en la **Figura 31.** El tiempo teórico de manufactura fue de 30 min 26 s, como se muestra en la **Figura 32**. Sin embargo, considerando los cambios de herramienta, el proceso tuvo una duración aproximada de 37 min.

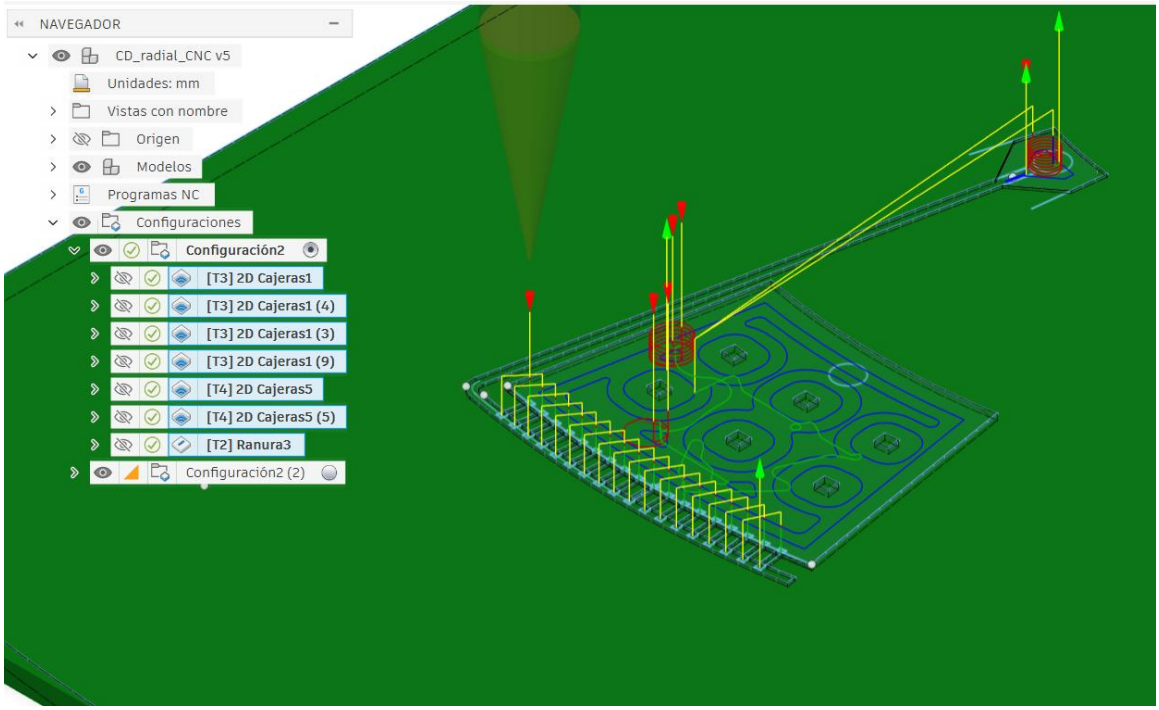


Figura 31. Trayectorias de mecanizado para estructura microfluídica.

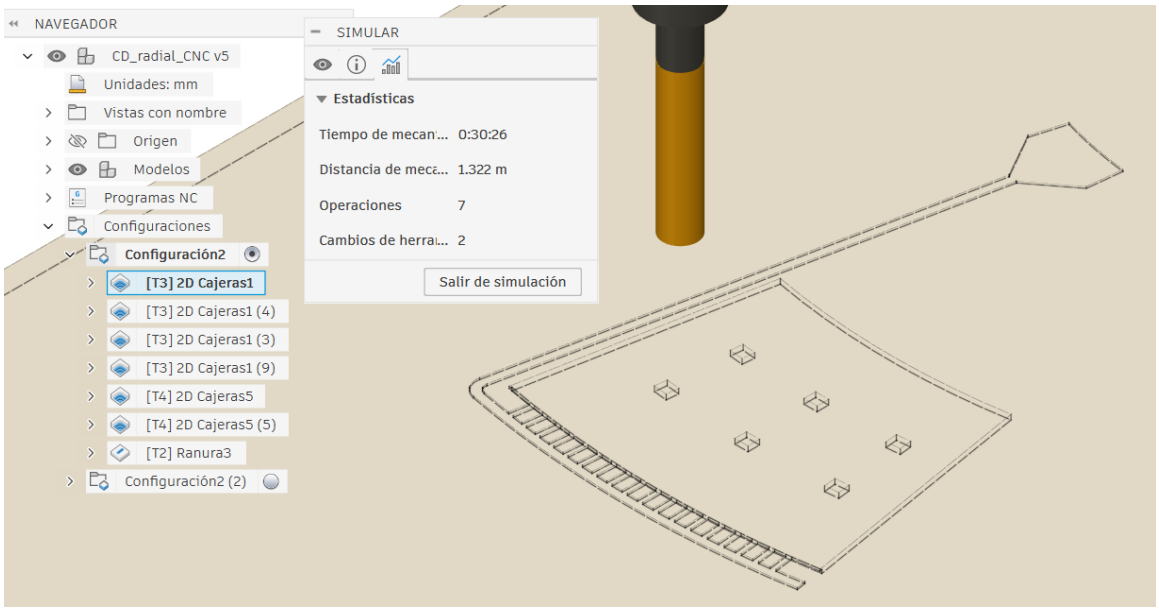


Figura 32. Tiempo teórico de manufactura.

Las trayectorias incluyeron una pasada de acabado. Posteriormente se agregaron cuatro pasadas adicionales con el fin de mejorar la superficie lo más posible y reducir la posibilidad de obstrucciones por viruta. Posterior al mecanizado, se limpió la superficie microfluídica con papel absorbente y alcohol isopropílico (IPA) para retirar residuos.

Posteriormente se realizó el sellado, acoplando la tapa del CD (**Figura 29**) con la parte mecanizada mediante los orificios de alineación localizados en los extremos del modelo. Finalmente, el conjunto se colocó en una prensa para retirar las burbujas y asegurar un buen sellado, como se muestra en la **Figura 33**.

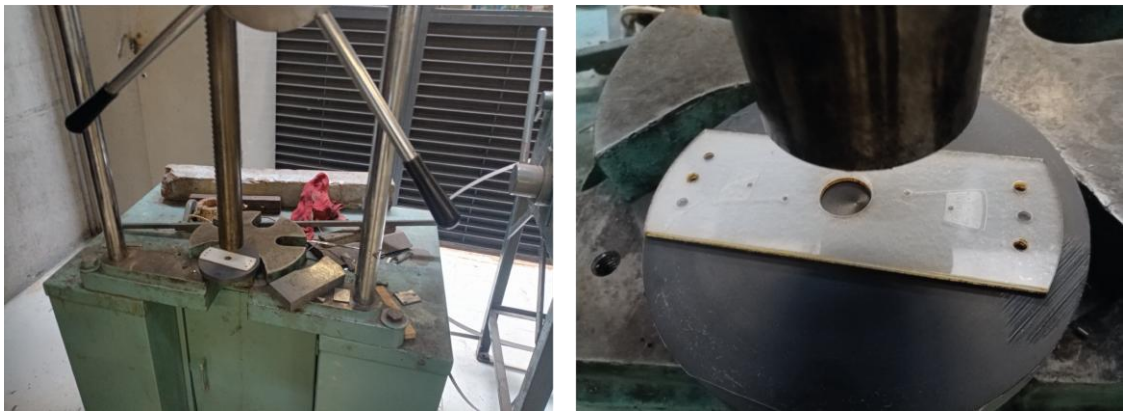


Figura 33. Sellado de CD con prensa.

4.7 Iteraciones diseño–manufactura

En total se realizaron cuatro iteraciones de fabricación. En la primera iteración se ocuparon las dimensiones descritas en la **Tabla 5** para realizar el modelo digital mostrado en la **Figura 24** y posteriormente realizar la manufactura. Este modelo se puede ver a mayor detalle en la **Figura 34**.

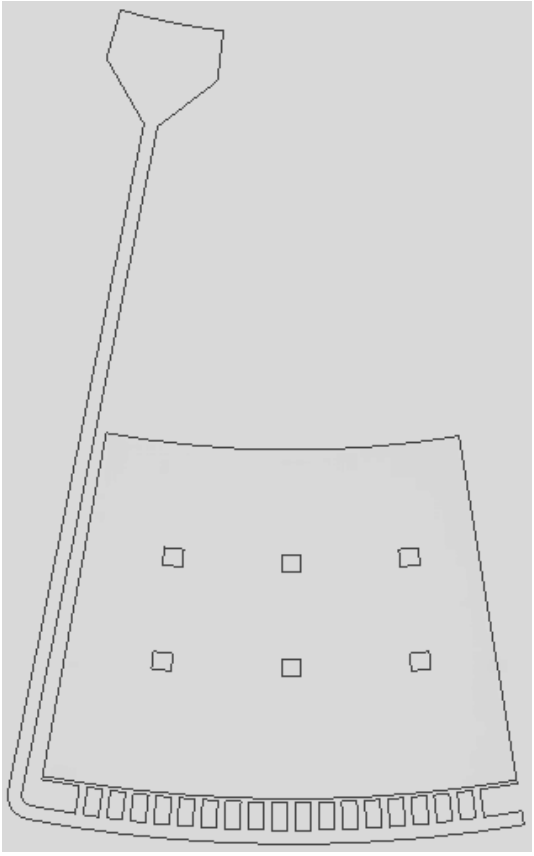


Figura 34. Modelo para primera y segunda iteración de manufactura.

En la segunda iteración de manufactura se ocupó el mismo modelo de la **Figura 34**. En esta iteración se utilizaron las mismas herramientas de corte y las mismas dimensiones de la **Tabla 5** exceptuando la profundidad del canal de conexión y de las boquillas, pasando de 100 micras a 38 micras, con el fin de reducir el ancho de las boquillas y así aumentar la separación entre ellas.

En la tercera iteración de manufactura se redujo el número de boquillas con el fin de aumentar la distancia entre ellas. En esta iteración las medidas modificadas fueron: por un lado, la profundidad del pozo de 140 micras a 600 micras y la

terraza aumento de 100 micras a 150 micras. Al igual que la segunda iteración de manufactura la profundidad del canal y de las boquillas fue de 38 micras. Además, se agregó un chaflán en la parte final de las boquillas. El modelo con estos cambios se puede observar en la **Figura 35**.

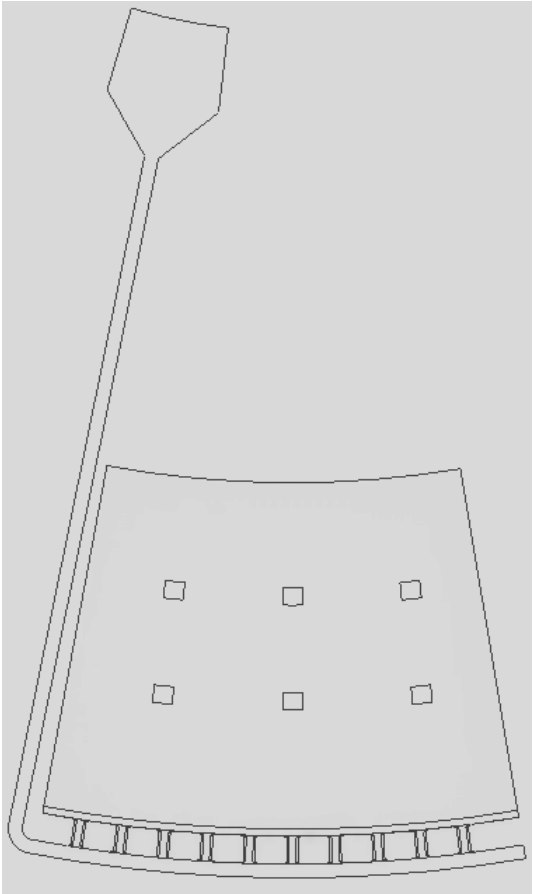


Figura 35. Modelo para la tercera iteración de manufactura.

Por último, en la cuarta iteración de manufactura se sustituyó el cortador en V de 20° por un cortador recto de 1/64 in para conseguir una sección transversal rectangular en las boquillas. Se aumentó la separación entre boquillas, el ancho del canal de conexión y las dimensiones de la cámara de entrada. Se conservaron las dimensiones de la terraza y la profundidad del pozo de la tercera iteración de manufactura. Las medidas restantes siguieron lo establecido en la **Tabla 5**. La representación de este modelo se ilustra en la **Figura 36**

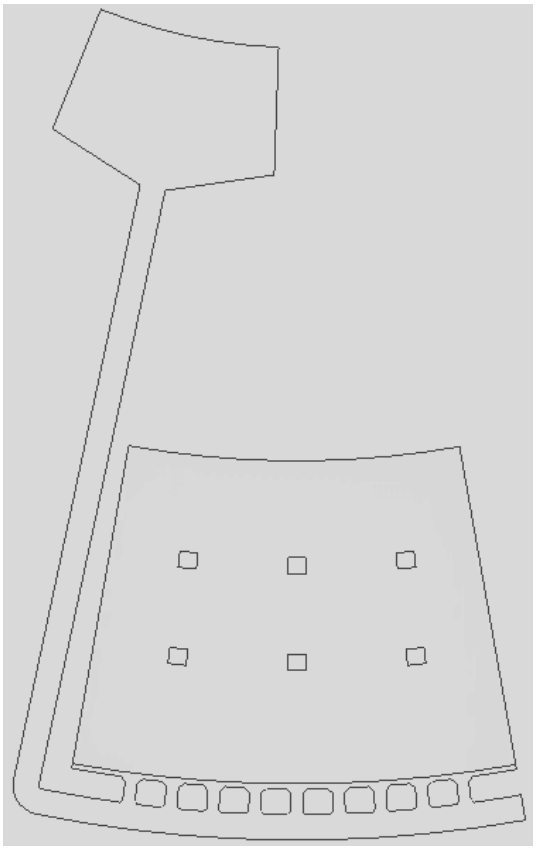


Figura 36. Modelo para la cuarta iteración de manufactura.

4.8 Plataforma de rotación

Tomando como referencia el banco de pruebas reportado por Rondot et al. [33] se generó el modelo mostrado en la **Figura 37**. El diseño permite separar la parte superior para facilitar el acoplamiento con el modelo citado, haciendo modificaciones mínimas al modelo original. Se buscó que el banco de pruebas fuera sencillo de modificar durante la etapa de desarrollo, con posibilidad de implementar posteriormente un modelo más sofisticado fabricado mediante impresión 3D.



Figura 37. banco de pruebas para la generación de campo centrífugo

El monitoreo de las revoluciones se realizó mediante un sensor infrarrojo F249. El procesamiento de los datos se realizó a través de una ESP32. La velocidad de rotación se reguló mediante una fuente de alimentación. El motor implementado fue un RF-12350 de 5.9 V que cuenta con un acoplador para el CD.

4.9 Validación funcional y observación de microgotas

Inicialmente, la cámara de entrada se llenó con aproximadamente 15 μl de agua desionizada con colorante para diferenciar el flujo de agua, mientras la cámara de salida se llenó con aproximadamente 50 μl de aceite. El disco se hizo girar a una revolución de 300 RPM durante aproximadamente 20 s para promover la distribución inicial de los fluidos en sus respectivos espacios. Posteriormente, se incrementó la velocidad a 700 RPM para iniciar el transporte del agua por los microcanales. A continuación, se alternaron valores de 300 y 700 RPM durante 5 s y 1 s respectivamente, alrededor de 20 veces, siguiendo el procedimiento reportado por Kubicki et al. [27].

La observación de las gotas se hará a través de microscopio Nikon Eclipse LV100ND. una vez que el dispositivo termine de hacer las 20 repeticiones. Adicionalmente, se realizarán algunas intervenciones durante el procedimiento para visualizar el progreso del flujo.

5 Resultados

5.1 Simulación CFD de flujo en microcanales

En las primeras iteraciones de simulación no se observó la interacción entre la fase dispersa y la fase continua. Sin embargo, se puede obtener la velocidad presente en la región de las boquillas y observar la distribución de las fases bajo la acción del campo rotatorio, como se ilustra en las **Figuras 38 y 39**.

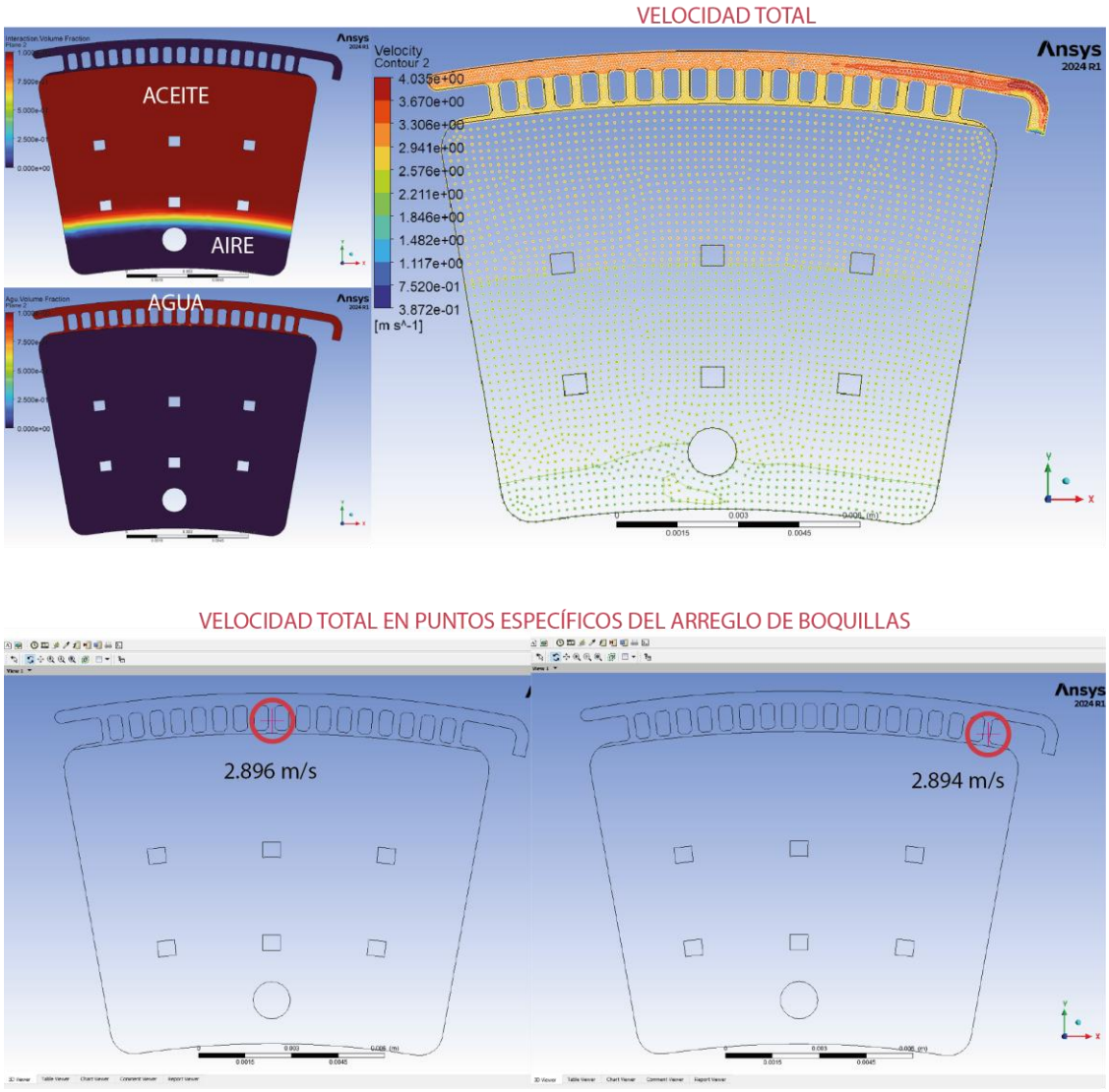


Figura 38. Distribución de las fases y velocidades presentes en el modelo curvo. Resaltando velocidades cercanas a la salida de las boquillas.

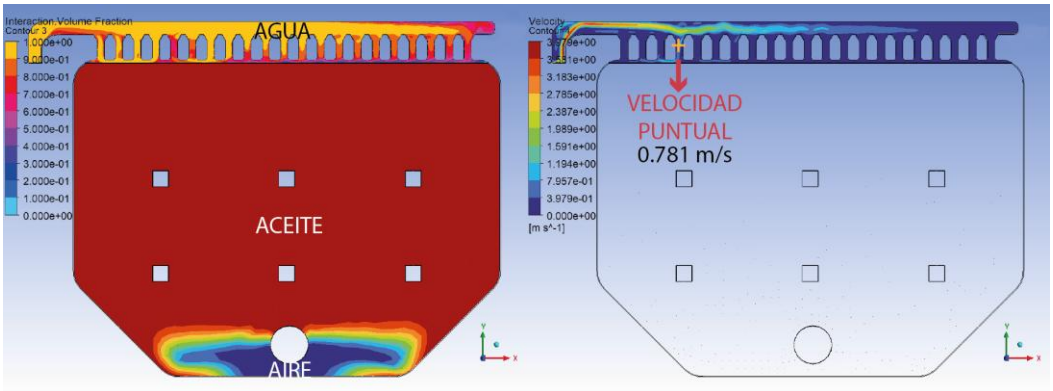


Figura 39. Distribución de fluidos, velocidad total presente en el modelo recto y velocidad puntual cerca del final de la boquilla.

Para el modelo curvo se obtuvo una velocidad total aproximada de 2.9 m/s en las boquillas, mientras que para el modelo recto se obtuvo aproximadamente 0.78 m/s. Estos valores corresponden a la velocidad absoluta calculada por el modelo, por ende, gran parte de esta velocidad es tangencial al radio donde se ubica el análisis. Sin embargo, deseamos saber la velocidad radial que estaría actuando en los microcanales. Para ello evaluamos puntos diferentes sobre el final de las boquillas, separando las componentes de velocidad en “y” y “x”.

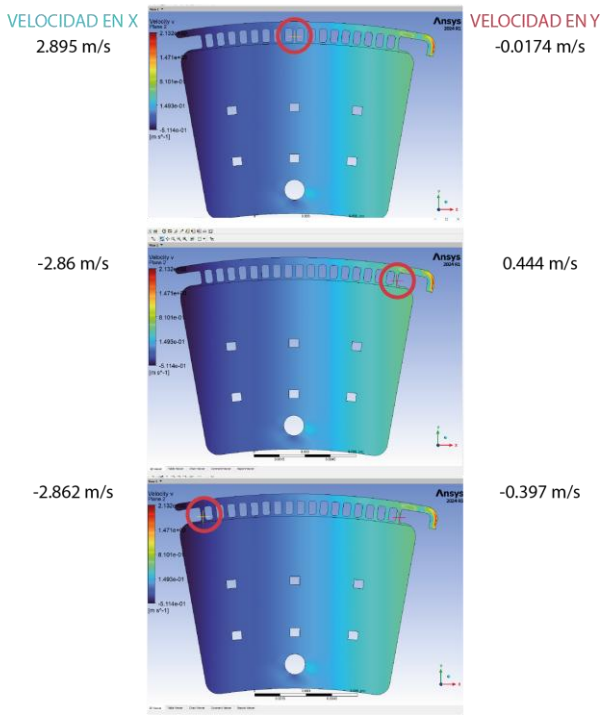


Figura 40. Velocidades en el eje “x” y “y” en diferentes puntos del arreglo de boquillas.

De acuerdo con los valores de la **Figura 40**, la componente de velocidad tangencial presentó la mayor magnitud y es muy parecida al valor de la velocidad total presentada en la **Figura 38**. La velocidad de menor magnitud es la velocidad en el eje “y”, que si bien, no tiene la dirección radial puede utilizarse como aproximación y ayudarnos a saber con qué velocidad se mueve el flujo dentro del canal.

La velocidad en la componente “x” presentó valores similares en los extremos y en el centro, con valores aproximados de -2.86 m/s a -2.89 m/s. La velocidad en “y” presentó valores de aproximadamente -0.39 m/s en un extremo, 0.44 m/s en el otro y -0.0174 m/s en el centro.

Los valores de la componente de velocidad en el eje “y”, evaluados en los extremos, son consistentes con el modelo de velocidad característica ocupado para calcular la velocidad de inicio de la fase dispersa en la simulación (0.309 m/s). La única excepción corresponde al valor obtenido en el centro, ubicado sobre el eje *y.* Este comportamiento podría indicar que la velocidad en el centro actúe como un punto de referencia, donde los valores van creciendo hacia los extremos generando signos opuestos, debido a la proyección de la velocidad tangencial sobre el eje “y”, sin indicar necesariamente un cambio real en el sentido del flujo.

En el modelo recto, la velocidad en la componente “y” presento una variación aproximada de entre -0.977 m/s a 0.26 m/s (**Figura 41**), donde la parte negativa podría indicar que el flujo se mueve hacia el eje de rotación. Comparando estos valores con las velocidades de referencia, de la sección 4.2, hay magnitudes que sobrepasan esta métrica, considerando como valor de referencia entre las 2 velocidades la de 0.5977 m/s.

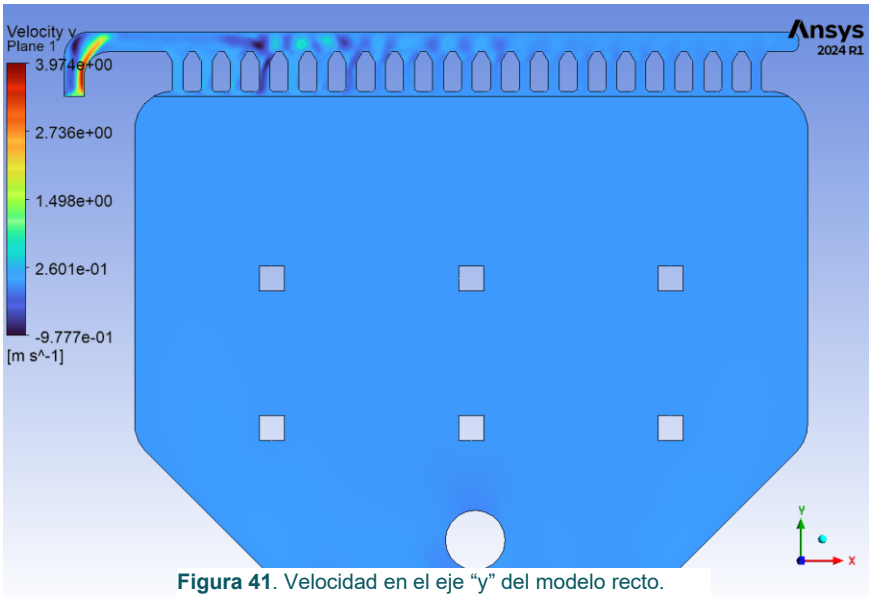


Figura 41. Velocidad en el eje “y” del modelo recto.

Ambos modelos mostraron indicios de transporte de la fase dispersa hacia la región de las boquillas. El modelo curvo no sobrepaso el valor inferior crítico teórico del régimen de goteo, tomando como referencia la velocidad en “y”, y además el comportamiento de la fase dispersa fue más estable, que en el modelo recto donde el llenado de las boquillas no sucedió de manera uniforme. Por último, el aprovechar mayormente la fuerza centrífuga en canales dispuestos de manera radial puede representar una ventaja.

Posteriormente se realizó una segunda iteración con el modelo curvo, en la que se eliminó la frontera utilizada en el primer modelo para permitir la interacción entre las dos fases. La simulación se inició con la región de salida parcialmente llena de aceite. Dando como resultado las velocidades que se muestran en la **Figura 42**.

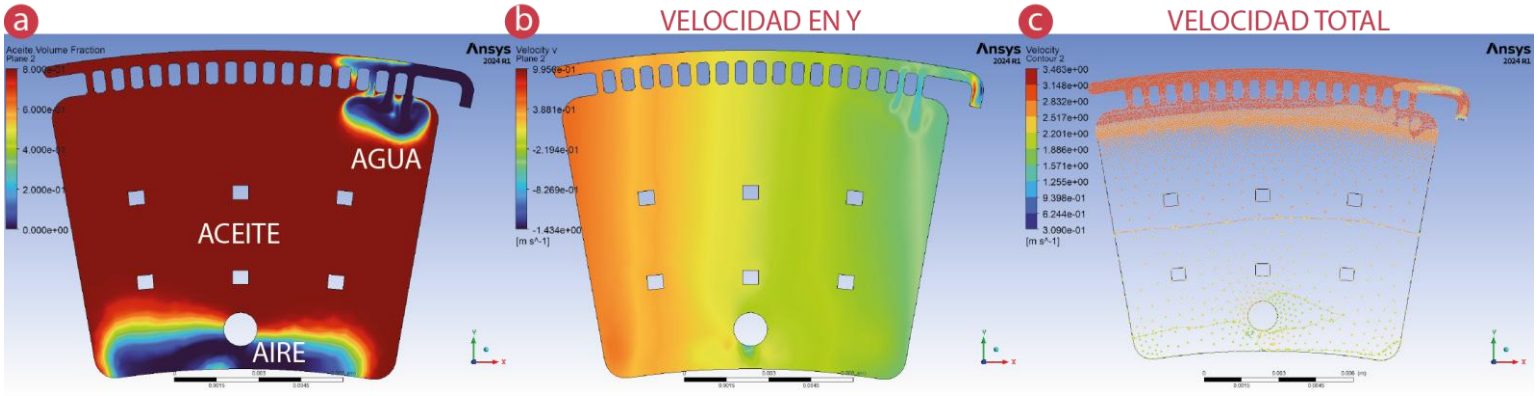


Figura 42. a) Distribución de fases, b) velocidad en el eje “y”, c) velocidad total del modelo microfluídico.

En esta iteración se visualizó el desplazamiento de la fase dispersa por las boquillas y el proceso de inflado en una de sus salidas. Sin embargo, la expansión fue continua y el flujo proveniente de otras boquillas se terminó uniendo a un solo cumulo de fluido. Este comportamiento puede atribuirse, al menos parcialmente, a la ausencia de una geometría tridimensional que permita el desprendimiento de las gotas.

La velocidad total mostrada en la parte c) de la **Figura 42** corrobora lo que ya se había visto en el modelo anterior, la velocidad aumenta conforme el punto de análisis se aleja del centro del CD.

La velocidad en la componente “y” de las primeras boquillas presentó valores aproximados entre -0.82 m/s a 0.38 m/s. La diferencia de signo respecto de la primera iteración se debe al cambio en el sentido de giro empleado para modificar la orientación de la fuerza de Coriolis y alinearla con el movimiento del fluido.

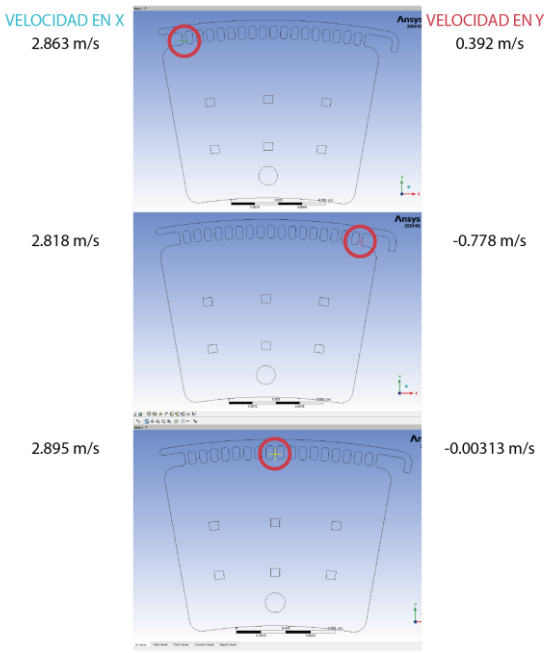


Figura 43. Velocidades puntuales a lo largo del arreglo de boquillas, de la segunda iteración.

En puntos específicos se obtuvieron velocidades de aproximadamente 0.392 m/s en un extremo, -0.778 m/s en el otro y -0.0031 m/s en el centro como se muestra en la **Figura 43**. Se cumple el mismo patrón del modelo anterior, en el centro hay un punto de inicio que va creciendo con respecto a la proyección del eje “y”. Puede que estas velocidades no sean un punto de referencia para definir lo que pasa dentro de las boquillas. Sin embargo, en la simulación la fase dispersa empezó uno de los primeros pasos para generar las microgotas.

5.2 Resultado de manufactura

Se observó una discrepancia entre las dimensiones teóricas obtenidas con el modelo y las dimensiones medidas después de la manufactura con el cortador en V de 20°.

Se presenta la primera iteración de manufactura, donde el arreglo de boquillas fue realizado con el cortador en V de 20°, la observación del acabado de manufactura se muestra en la **Figura 44** y la comparación de medidas teóricas y reales en la **Tabla 11**.

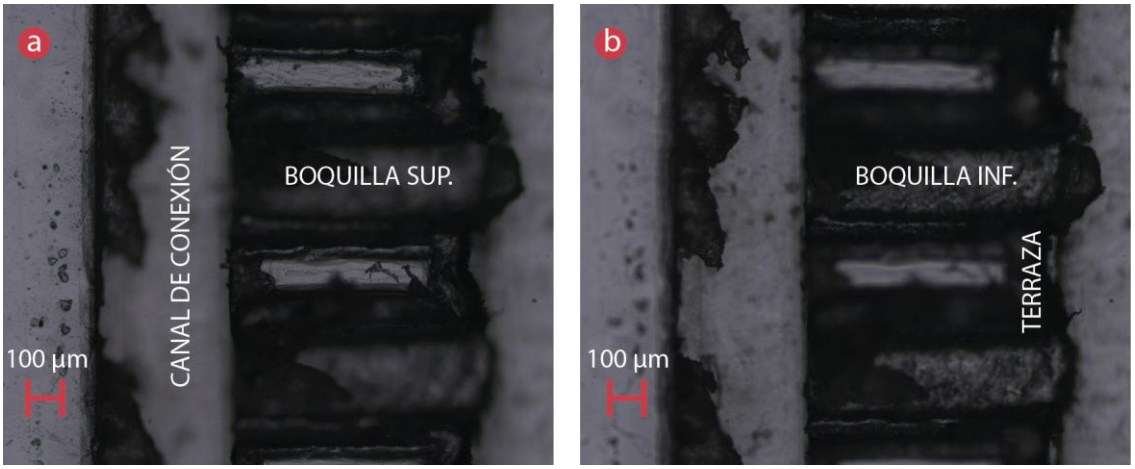


Figura 44. a) Enfoque superior y b) enfoque inferior del arreglo de boquillas, para la primera iteración de manufactura.

Tabla 11. Datos de la primera iteración de manufactura.

Sección del modelo	Medida del ancho del canal [mm]	Medida esperada [mm]	Porcentaje de error [%]
Canal de conexión	0.43	0.397	7.6
Paso inferior de cortador V	0.21	0.1	108.7
Paso superior de cortador V	0.507	0.211	140.4
Terraza	0.10	0.1	2.5
Separación de boquilla	0.146		

La diferencia entre las medidas reales y teóricas son considerables. Por ende, estos resultados pueden emplearse para generar un nuevo modelo de predicción

del comportamiento del cortador en V de 20°, sabiendo que la punta tiene un diámetro de 209 micras.

En la segunda iteración de manufactura, como se mencionó en la sección 4.7, se utilizó una profundidad de 38 micras con el fin de reducir el ancho del canal. El enfoque en el arreglo de boquillas de este modelo se muestra en la **Figura 45** y la **Tabla 12** muestra la comparación de las dimensiones teóricas.

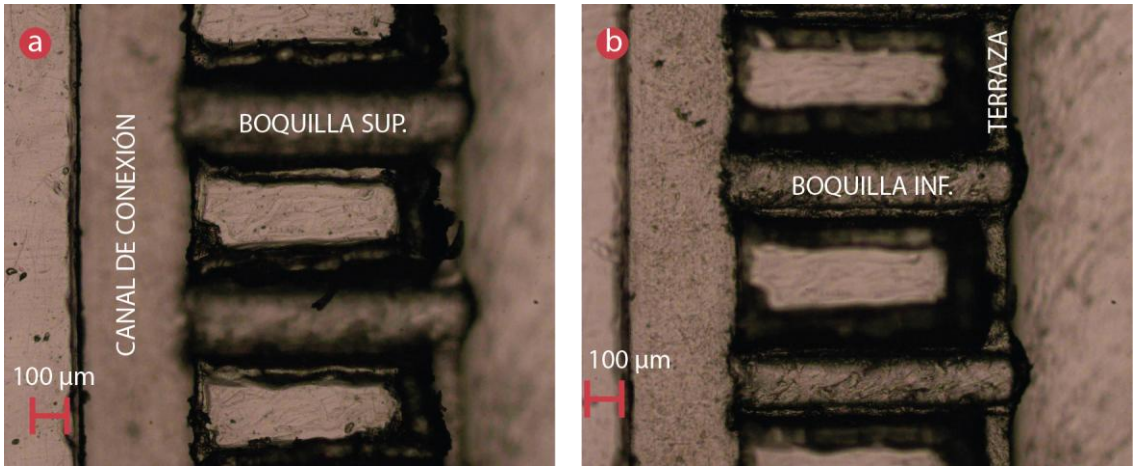


Figura 45. a) Enfoque superior y b) enfoque inferior del arreglo de boquillas, para la segunda iteración de manufactura.

Tabla 12. Datos de la segunda iteración de manufactura.

Sección del modelo	Medida del ancho del canal [mm]	Medida esperada [mm]	Porcentaje de error [%]
Canal de conexión	0.366	0.397	7.9
Paso inferior de cortador V	0.209	0.1	108.7
Paso superior de cortador V	0.356	0.171	108.3
Terraza	0.087	0.1	13.2
Separación de boquilla	0.3		

En la tercera iteración de manufactura aumentó la distancia entre las boquillas y la profundidad del pozo, además de agregar un chaflan en la parte final de las boquillas, manteniendo una profundidad de penetración de 38 micras. El modelo completo está presente en la sección 4.7 en la **Figura 35,** mientras que el enfoque del acabado de la sección del arreglo de boquillas se puede ver en la **Figura 46**.

La **Tabla 13** muestra la comparación de las medidas teóricas y reales de esta iteración de manufactura.

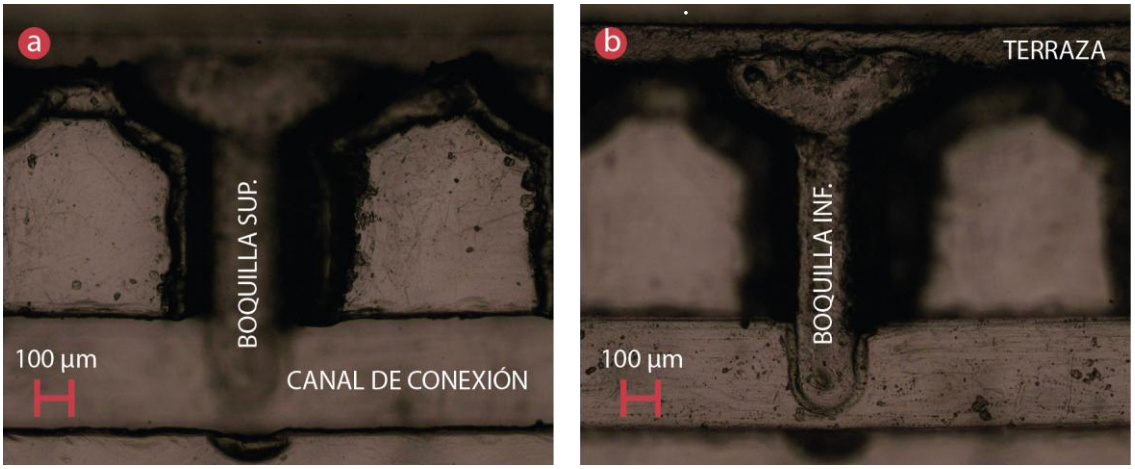


Figura 46. a) Enfoque de la parte superior y b) enfoque inferior del arreglo de boquillas, para la tercera iteración de manufactura.

Tabla 13. Datos de la tercera iteración de manufactura.

Sección del modelo	Medida del ancho del canal [mm]	Medida esperada [mm]	Porcentaje de error [%]
Canal de conexión	0.367	0.397	7.6
Paso inferior de cortador V	0.193	0.1	93
Paso superior de cortador V	0.46	0.171	169
Terraza	0.138	0.15	8
Separación de boquilla	0.77		

En la cuarta iteración de manufactura se generó una sección transversal rectangular en las boquillas, se aumentó la separación entre ellas y se modificó la longitud de la terraza. Además, se ocupó un cortador de 1/32 in para el canal de conexión, en sustitución del cortador de 1/64 in que se utilizó en las anteriores iteraciones y que ahora se ocupó para las boquillas. El modelo completo y una complementación de la información se puede observar en la sección 4.7 en la **Figura 36.** Por otro lado, el enfoque en partes relevantes del modelo se muestra en la **Figura 47,** mientras que la **Tabla 14** hace una comparación de las dimensiones reales y las teóricas.

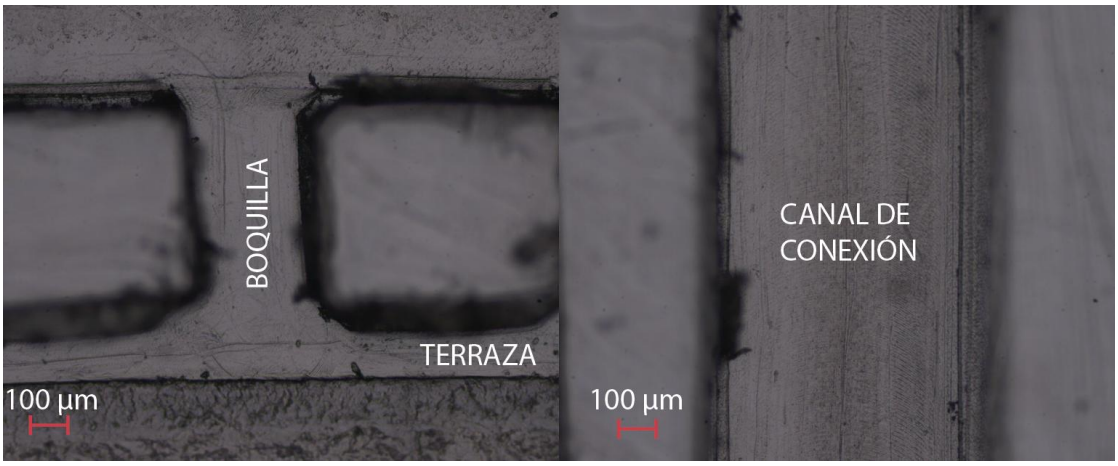


Figura 47. a) muestra la terraza y una de las boquillas del sistema y b) muestra el canal de conexión de la cuarta iteración.

Tabla 14. Datos de manufactura de la cuarta iteración.

Sección del modelo	Medida del ancho del canal [mm]	Medida esperada [mm]	Porcentaje de error [%]
Canal de conexión	0.876	0.794	10.3
Boquilla	0.374	0.397	5.8
Terraza	0.146	0.15	2.7
Separación de boquilla	0.916		

En esta cuarta iteración de manufactura, la comparación entre valores reales y teóricos posee errores porcentuales bajos en comparación con las anteriores iteraciones.

5.3 Generación de microgotas

La frecuencia de giro inicial de 360 RPM permitió distribuir el fluido de manera uniforme en las cámaras y reducir la presencia de burbujas. La distribución de la fase continua en el pozo fue similar a la observada en la simulación, como se muestra en la **Figura 48**.

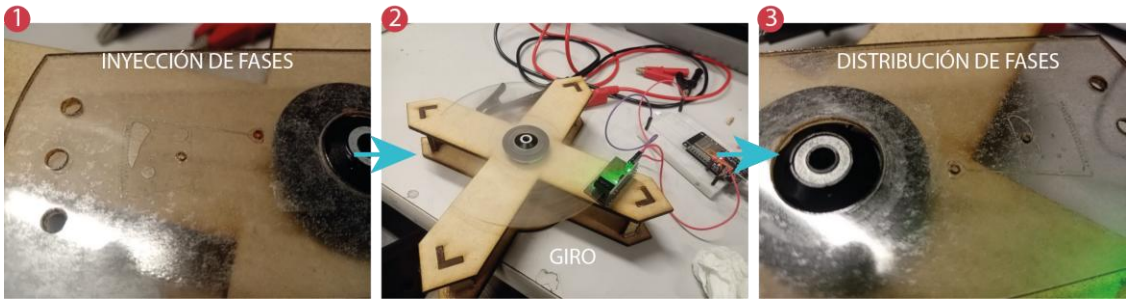


Figura 48: Proceso inicial de distribución de fases con velocidad de rotación de 360 RPM.

En la primera iteración experimental, el aceite vegetal de girasol fue remplazado por aceite vegetal de supermercado (Nutrioli) debido a que el tiempo para terminar el escrito ya estaba por culminar y se requería un resultado tangible. Sin embargo, posteriormente se logró conseguir aceite de palma, que también fue ocupado en las referencias consultadas, pero los resultados fueron similares.

En la primera iteración experimental, el disco se hizo girar a 700 RPM realizando pausas en el proceso para ver el avance del fluido. Al detener el proceso de giro, el flujo no había abarcado completamente el canal curvo que conecta con el arreglo de boquillas y permanecía concentrado en las primeras boquillas. Después de cada pausa se observó un reflujo y el vaciado parcial de la región recorrida. Tras aumentar el tiempo de espera hasta aproximadamente 10 min sin observar la formación de gotas, se incrementó la cantidad de fase dispersa y posteriormente la velocidad hasta 1000 RPM durante 20 s. Al detener el disco, la fase dispersa alcanzó la cámara de salida como un flujo continuo y no como microgotas; únicamente las primeras dos boquillas trasportaron fluido, quedando una cantidad considerable de fluido concentrado en la parte inferior izquierda de la cámara de salida, como se muestra en la **Figura 49**.



Figura 49. Fase dispersa en la primera iteración donde solo dos boquillas trasportaron fluido. El enfoque muestra las otras boquillas vacías.

En la segunda iteración, al igual que la primea parte, el flujo volvió a concentrarse en la región inicial del arreglo de boquillas. Sin embargo, se visualizó la expansión de la fase dispersa de la boquilla, sin que se produjera su desprendimiento (**Figura 50**). El proceso de expansión comenzó aproximadamente a 1000 RPM.

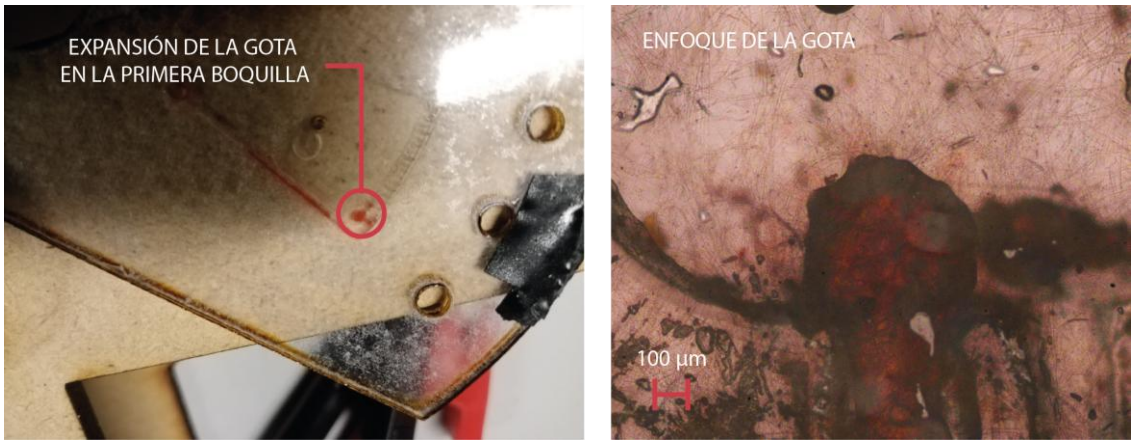


Figura 50. Fase dispersa en la segunda iteración de manufactura, donde se muestra la expansión de la fase dispersa.

En la tercera iteración se aumentó el volumen de entrada de la fase dispersa a 10 microlitros y se disminuyó la cantidad de la fase continua en la cámara de salida a aproximadamente 17 microlitros.

Se realizó el mismo procedimiento de acondicionamiento de las fases descrito anteriormente, para favorecer una distribución uniforme del aceite en la cámara de salida.

Se inició con 700 RPM y se repitieron las pausas descritas anteriormente. Al no observarse cambios significativos, se incrementó la velocidad a 1000 RPM. En estas condiciones el flujo alcanzó la región del canal de conexión que se une al arreglo de boquillas; sin embargo, solo las primeras dos boquillas se llenaron de manera apreciable y mostraron el inicio de la expansión de la fase dispersa sobre la fase continua. Durante la observación microscópica también se identificaron regiones en donde no se notaba una interfase definida entre el aceite y el agua (**Figura 51**).

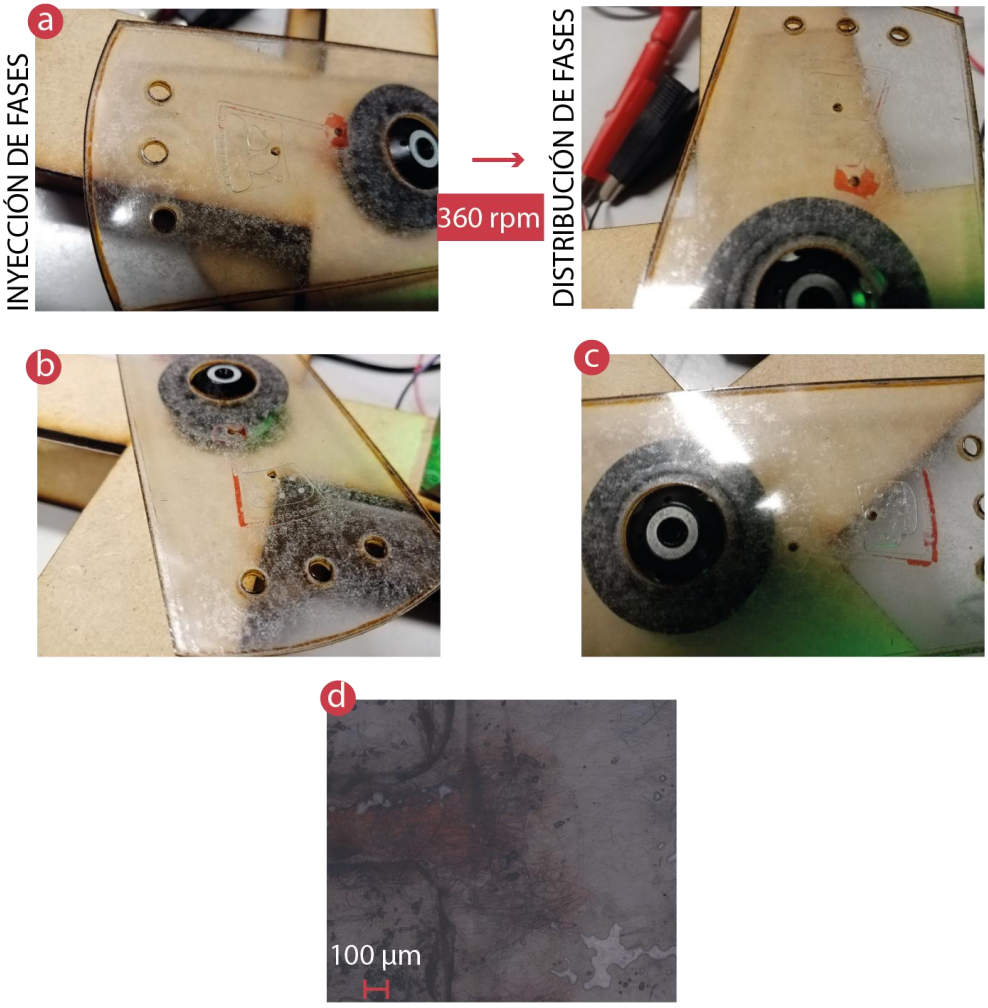


Figura 51. Tercera iteración con el cuarto modelo de manufactura; a) Muestra el proceso de acondicionamiento a 360 rpm aproximadamente; b) Presenta la distribución de la fase dispersa con 700 rpm; c) Presenta la distribución de la fase dispersa con 1000 rpm; d) Imagen de interfaz entre agua y aceite.

Para la siguiente iteración se ocupó el 4° modelo de manufactura y se cambió la fase continua a aceite de palma, como en el trabajo de Kubicki et al. [27] que

posee medidas similares a nuestro modelo. Además, se incrementó la profundidad del pozo de 140 a 600 micras para evaluar si este cambio favorecía el desprendimiento de la fase dispersa.



Figura 52. 4° Modelo de manufactura con aceite de palma como fase continua y agua desionizada con colorante Azul como fase dispersa. Donde se nota la formación de cúmulos de fase dispersa, con estancamiento al final del arreglo de boquillas.

En esta iteración se observó con mayor claridad la interfaz entre el agua y el aceite. Se alternaron velocidades de 360 y 1000 RPM, excluyendo la velocidad de 700 RPM. Al igual que en las anteriores iteraciones, la fase dispersa se expandió al final de las primeras boquillas con dirección al pozo, formando un cúmulo de agua desionizada con colorante azul. En esta iteración la manipulación del dispositivo provocó el desprendimiento del cúmulo de la fase dispersa que permanecía adherida a la parte final de la boquilla, provocando la generación de cúmulos más pequeños, como se muestra en la **Figura 52**.

Para la última iteración se ocupó el 3° modelo de manufactura con el aceite de palma como fase continua, como se muestra en la **Figura 53**.

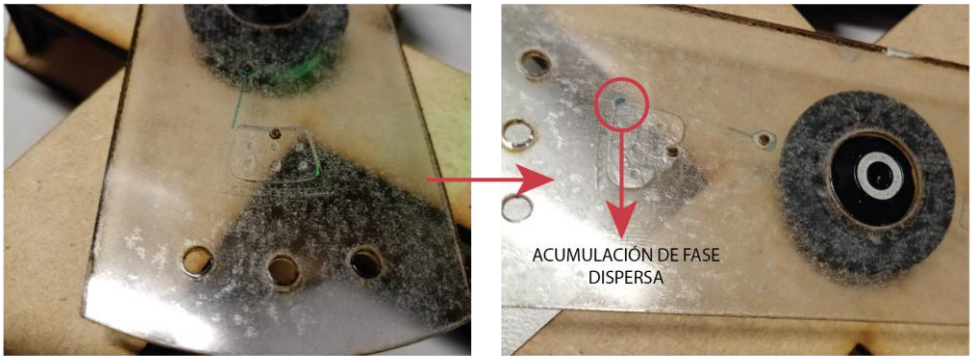


Figura 53. Fase dispersa en 3° modelo de manufactura con una velocidad angular de 1000 rpm.

Se disminuyó la cantidad de la fase continua en la cámara de salida para evaluar si la flotabilidad del agua en el aceite podía influir en el comportamiento

observado; sin embargo, el resultado se mantuvo. También se consideró que el volumen limitado que permitía la cámara de entrada de este modelo podía limitar la cantidad de fase dispersa disponible para alimentar las boquillas.

La velocidad seleccionada inicialmente como límite inferior no fue suficiente para iniciar de manera consistente el proceso de expansión de la fase dispersa hacia el pozo. Fue necesario aumentar la velocidad hasta aproximadamente 1000 RPM para observar este fenómeno.

La geometría pudo contribuir a que el flujo se concentrara en las primeras boquillas. Por otro lado, el modelo recto, aunque presentó una distribución de la fase dispersa menos uniforme en las boquillas, puede que las velocidades en “y” muestren una descripción más precisa de lo que pasa con la fase dispersa, debido a que no dependería aparentemente del sistema de referencia y las proyecciones por la forma de la geometría y puede considerarse una alternativa para futuras iteraciones.

Otra opción que podría mejorar el resultado es modificar la humectabilidad de la superficie mediante un tratamiento superficial, para hacerla más hidrofóbica.

5.4 Desempeño de la plataforma de rotación

El control de las RPM mediante la fuente de alimentación permitió operar el sistema, aunque no resulta conveniente para una versión final. Al tratarse de un prototipo, el banco de pruebas puede modificarse para mejorar la interfaz del usuario y de información. Además, se puede consultar un modelo imprimible para tener un sistema mejorado en el artículo publicado por Rondot et al. [33] . Finalmente, el desempeño del código para medir las RPM´s se puede mejorar, debido a que presentó variaciones en la lectura; por ejemplo, para una condición nominal de 360 RPM se observaron oscilaciones ente los valores de 300 y 360 RPM, cosa que posiblemente se pueda mitigar con el mejoramiento del programa de medición.

5.5 Discusión sobre eficiencia y reproducibilidad

En las pruebas realizadas no se obtuvo una generación de microgotas. Solo se presentó posiblemente el proceso de inflado de la fase dispersa, seguido de la expansión desmedida al final de la boquilla, sin lograr el desprendimiento del flujo. Las iteraciones modificaron la geometría, la fase continua y la profundidad del pozo, pero ninguna generó un resultado diferente.

Por otra parte, el transporte de la fase dispersa mediante la rotación del CD si fue reproducible en las diferentes iteraciones. Demostrando que este dispositivo puede bombear fluido desde la cámara de entrada hasta la zona de boquillas, cosa que se podría utilizar como mecanismo de actuación, proporcionando un avance para posteriores trabajos y continuar con la optimización de la geometría de emulsificación.

6 Discusión

6.1 Comparación con tecnologías existentes

Uno de los trabajos más cercanos al presente proyecto, en cuanto a la generación de microgotas mediante un dispositivo fabricado por manufactura sustractiva, es el de Schuler et al. [22]. Como se muestra en la **Tabla 3**, estos autores lograron fabricar una boquilla con un ancho de 90 µm, una dimensión que no fue posible alcanzar en este trabajo debido a las limitaciones del equipo de manufactura utilizado. A pesar de esta diferencia, ambos dispositivos presentan similitudes en su diseño y en el proceso de unión de sus componentes. Esto se debe, en parte, a que el trabajo de Schuler et al. constituyó una de las principales referencias para el desarrollo del presente dispositivo. Estas similitudes se pueden en la profundidad del canal y de las boquillas, en la profundidad del pozo y en las dimensiones de la cámara de salida y entrada.

Por otro lado, la manufactura sustractiva no es el único método empleado para fabricar dispositivos destinados a la generación de microgotas. La manufactura aditiva también se ha utilizado con este propósito, como en el trabajo de Kubicki et al. [27]. En dicho estudio, este método permitió fabricar el dispositivo sin tener que producir individualmente las láminas del chip para unirlas posteriormente mediante una lámina adhesiva. Las dimensiones reportadas por estos autores son mayores que las descritas por Schuler et al. [22] y más próximas a las dimensiones del ancho de boquilla alcanzadas en el presente trabajo, como puede observarse en la **Tabla 3 y en las Tablas 11 a 13**. En particular, tanto el ancho como la longitud de las boquillas fabricadas en este proyecto se encuentran dentro del intervalo de dimensiones reportado por Kubicki et al.

Otra diferencia entre ambas investigaciones es la configuración de las boquillas. Mientras que Schuler et al. [22] emplearon múltiples boquillas, en el dispositivo descrito por Kubicki et al. [27] solo se utilizó una. En el presente trabajo se optó por incorporar varias boquillas con el propósito de aumentar la probabilidad de

que al menos una de ellas permitiera generar microgotas. Sin embargo, esta ventaja empleada en nuestro dispositivo no logró demostrar satisfactoriamente la generación de microgotas.

La combinación de características de estos dos antecedentes sirvió como base para desarrollar el diseño propuesto. Esta estrategia también influyó en la selección de los fluidos inmiscibles. Schuler et al. [22] utilizaron *Novec 7500* como fase oleosa (fase continua). Sin embargo, debido a que se trata de un producto especializado y de costo elevado, se consideraron otras alternativas con el propósito de evaluar opciones más accesibles. De esta manera, se tomó como referencia el aceite de palma empleado en el trabajo de Kubicki et al. [27] y el aceite de girasol utilizado por Haeberle et al. [25]. La selección de estos fluidos permitió considerar alternativas de menor costo y mayor disponibilidad.

Por tanto, el diseño desarrollado no corresponde a la reproducción exacta de un único antecedente, sino a una propuesta que integra características de diferentes trabajos. Permitiendo explorar una configuración propia. Sin embargo, también introdujo diferencias respecto de los dispositivos de referencia que podrían haber influido en los resultados obtenidos.

Finalmente, existen otras alternativas para generar microgotas que no se limitan a la emulsificación por escalón. Por ejemplo, Haeberle et al. [25] propusieron un dispositivo microfluídico centrífugo que emplea la emulsificación por focalización de flujo. Esta configuración constituye una alternativa que podría explorarse en futuros trabajos si la geometría actual no permite obtener resultados satisfactorios.

6.2 Ventajas y limitaciones del prototipo

El dispositivo sirve como un primer intento para probar la manufactura sustractiva y ver los acabados en los microcanales, así como probar la configuración de las boquillas y medidas que se podían obtener con el material y el equipo a disposición. Por otro lado, se desarrolló un proceso de ensamblaje y manufactura que puede ser replicado de manera fácil, basta con colocar el adhesivo doble cara en el dispositivo antes del corte láser para posteriormente pasar a la CNC donde hay un espacio de acoplamiento, asegurar, maquinar, retirar, quitar la película que recubre el adhesivo, alinear y finalmente sellar, para encontrarse listo para usar. Otra ventaja en nuestro chip es el reducido espesor del dispositivo, que disminuye el volumen del material y facilita su integración con el sistema de rotación.

Por otro lado, el banco de pruebas del dispositivo todavía no está en una versión final, por ende, se pueden realizar modificaciones rápidas para posteriormente implementarlas en un modelo definitivo. Una ventaja de esta etapa de desarrollo es la posibilidad de consultar una fuente que proporcione un modelo base para realizar modificaciones y adaptaciones [33].

Una de las principales limitaciones del banco de pruebas actual es que requiere una fuente de alimentación externa para controlar las revoluciones por minuto (RPM) del sistema, lo que limita su portabilidad. En futuros trabajos, esta limitación podría abordarse mediante la incorporación de una batería que permita alimentar el sistema sin depender de una fuente de alimentación externa.

Otra limitación, es la de observar la formación de las gotas en tiempo real, ya que se tuvo que esperar a que termine el proceso de rotación o hacer intervenciones, para posteriormente ver los resultados a través de un microscopio, cosa que también limita su portabilidad a diferentes entornos. La implementación de un método de observación podría darnos una pista de la generación de cúmulos en vez de microgotas.

6.3 Consideraciones para escalabilidad

En primera instancia, se podría ampliar el diseño para abarcar toda la superficie útil del disco con formato de CD, en lugar de utilizar únicamente la región central. Esto permitiría distribuir las geometrías generadoras de microgotas en un arreglo circular y, probablemente, aumentar el número de unidades de generación integradas en un mismo dispositivo.

Dentro de los dispositivos que se ocupan para la fabricación del CD se encuentra la cortadora láser, para realizar una producción en masa dentro de estos dispositivos, se podría ocupar láminas de policarbonato de 30x40 cm recubiertas ya con la cinta adhesiva doble cara. En la CNC se realizarían orificios de acoplamiento para distribuir las piezas dentro de la superficie de trabajo y así hacer que un mismo cortador pase por todas las superficies evitando perder tiempo en el cambio de herramienta, al igual dentro del software Fusion 360, se pueden repetir operaciones en arreglos rectangulares, por ende, basta con definir los parámetros de una sola pieza para aplicarlas a múltiples dispositivos. Para ensamblar las piezas bastaría con utilizar los orificios de acoplamiento y posterior a ello buscar la forma de tener una prensa de mayor superficie para aumentar el volumen de los dispositivos en el proceso final de sellado.

Si se considera la escalabilidad del proceso de corte por láser, es necesario tomar precauciones, ya que el policarbonato presenta limitaciones para su procesamiento mediante láser de CO_2, que es el método empleado por la cortadora láser del laboratorio Bio-MEMS. Entre ellas se encuentran la posible decoloración y carbonización de los bordes, así como el riesgo de ignición durante el corte [34] .

Para el banco de pruebas, se buscaría llegar a un modelo mucho más sólido, que evite el uso de dispositivos externos para su funcionamiento y de ser posible, poder integrar un método de observación, para poder visualizar la evolución de la fase dispersa en tiempo real.

7 Conclusiones

7.1 Conclusiones generales

Se diseñó y fabricó un prototipo de dispositivo microfluídico en formato CD, con un espesor de 2 mm en policarbonato, capaz de utilizar el campo centrífugo generado por la rotación del chip, para desplazar la fase dispersa por medio de microcanales hasta llegar a las boquillas, donde se llevaría a cabo la emulsificación, como se visualiza en la **Figura 54**.

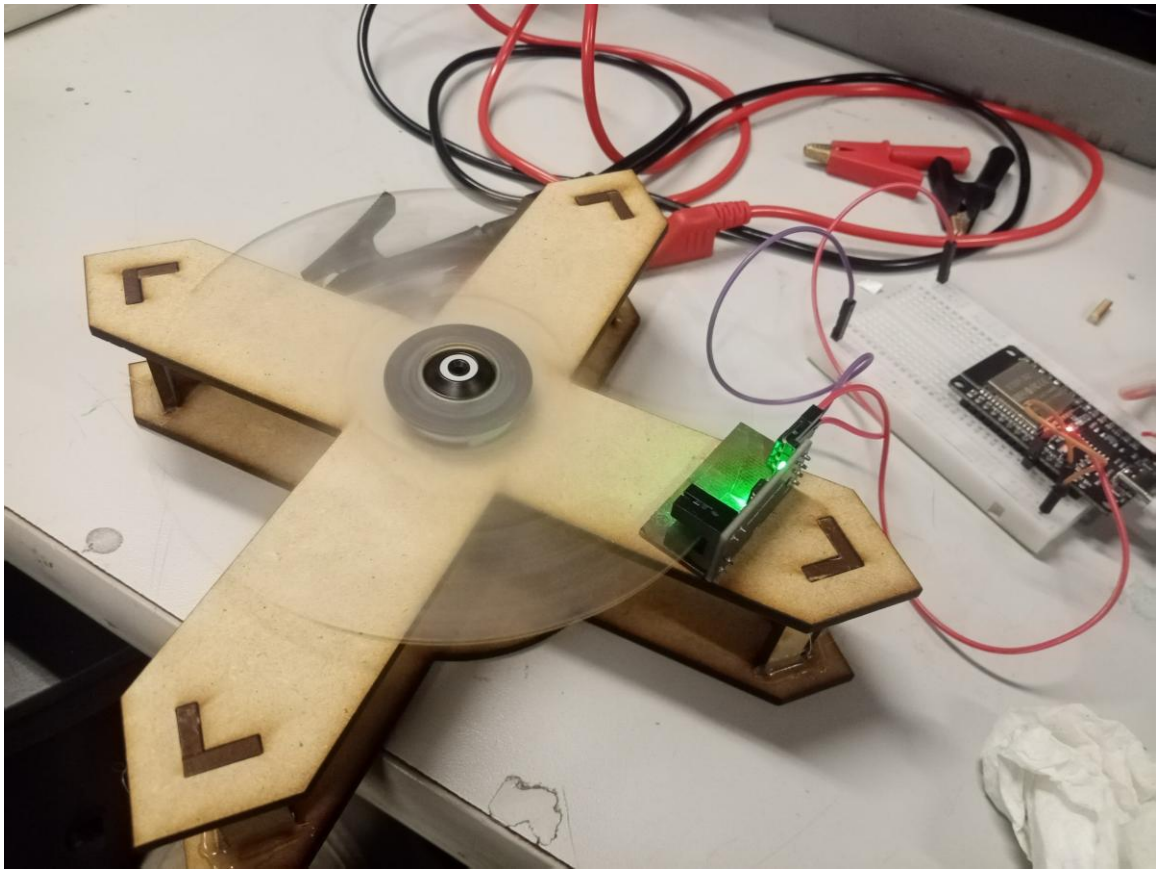


Figura 54. Dispositivo microfluídico en formato CD en funcionamiento.

El dispositivo adoptó dimensiones reportadas en otros estudios previos, en especial para el diámetro del disco y las dimensiones de acoplamiento, con el fin

de seguir un estándar y favorecer su integración con plataformas centrífugas existentes.

Durante las pruebas experimentales, se logró distinguir visualmente los dos fluidos inmiscibles gracias al colorante agregado a la fase dispersa y a que el policarbonato es un material translúcido, Además, este material conservó la rigidez estructural y permitió unir las dos superficies del dispositivo mediante cinta adhesiva de doble cara, sin que se identificaran complicaciones relevantes durante el ensamblaje. Estas observaciones respaldan su viabilidad como material para la fabricación del prototipo. Sin embargo, su procesamiento mediante corte por láser de CO_2 requiere precauciones, ya que puede generar superficies carbonizadas y bordes con una coloración amarillenta, lo que puede afectar el acabado del dispositivo.

Se construyó una plataforma funcional para controlar la velocidad de rotación del CD mediante una fuente de alimentación, un sensor de RPM y una tarjeta ESP32. Esta plataforma permitió realizar pruebas de transporte de fluidos y constituye una base para futuras mejoras.

Se implementó un proceso de observación en el microscopio para inspeccionar nuestro chip, una vez que nuestro dispositivo terminara de girar siguiendo el procedimiento descrito en el documento que fue tomado de la investigación realizada o en intervenciones de este proceso. Permitiendo una visión de las boquillas en un determinado instante.

El chip se acopló al banco de pruebas sin la necesidad de hacer modificaciones adicionales, gracias a la estandarización previa de las dimensiones de montaje, obteniendo iteraciones funcionales del deslazamiento del flujo por los microcanales.

A pesar de no lograrse la generación de microgotas, sí se logró validar el movimiento del fluido en los microcanales debido al campo rotacional del CD. Estableciendo una base para continuar con la optimización de la geometría de emulsificación por escalón.

Por su parte, las simulaciones CFD realizadas en ANSYS *Fluent* permitieron analizar la distribución de la fase dispersa y explorar el comportamiento del flujo en el modelo recto y curvo. Los resultados contribuyeron a seleccionar el modelo curvo para una segunda iteración y examinar las velocidades presentes específicamente en la región de las boquillas. No obstante, el análisis de las velocidades no fue concluyente.

La velocidad total obtenida en el modelo curvo fue consistente con el cálculo de la velocidad tangencial, ($v= \omega * r$), en los puntos consultados. Sin embargo, esta correspondencia no permitió establecer de manera concluyente la relación entre la velocidad tangencial del sistema y la velocidad interna del fluido. La velocidad en la componente (x) tienen la mayor parte de la velocidad tangencial y la componente en (y) tiene valores pequeños que podrían compararse con el modelo de la velocidad característica, en cambio, es más probable que sea la proyección de la velocidad tangencial sobre este eje.

Finalmente, los resultados del mecanizado con una herramienta de corte en V de 20° mostraron diferencias respecto del modelo de acabado superficial consultado. Este modelo se había desarrollado a partir de procesos de manufactura de placas de circuito impreso (PCB) y del análisis de las superficies después de su manufactura. En el presente trabajo, el mecanizado del policarbonato permitió observar las características del acabado en las superficies superior e inferior del corte y examinar la geometría trapezoidal obtenida. Estas diferencias evidencian la necesidad de considerar el material y las condiciones de mecanizado al utilizar modelos de acabado superficial desarrollados para otros procesos.

7.2 Aportes destacables

Se desarrolló un procedimiento de fabricación que implementa corte láser y mecanizado CNC para buscar ahorrar tiempo y facilitar el ensamblaje del chip. Para ello, se generaron los modelos y archivos de fabricación correspondientes a ambos procesos, que pueden cargarse y ejecutarse en sus respectivos entornos. Al igual, se encontró un lugar donde se puede realizar el sellado del CD sin requerir un equipo sofisticado, fácil de manejar y rápido.

Se desarrolló un diseño conceptual orientado a reducir el consumo de material mediante el aprovechamiento de la región central del CD. También se consideraron las dimensiones de acoplamiento del disco, en particular las del orificio central, para facilitar su montaje en alguna plataforma centrífuga que maneje la medida estándar de un CD comercial.

Se elaboró una tabla comparativa con las dimensiones reportadas en diferentes trabajos previos, que orientaron el diseño de todo el sistema de microcanales. Al igual, se evaluaron distintas configuraciones del sistema de boquillas, lo que permitió identificar la sección transversal, la orientación, la longitud de la terraza, y la profundidad del pozo como parámetros relevantes para el diseño del dispositivo.

EL modelo se desarrolló empleando láminas de policarbonato de 1 mm de espesor, con las que se obtuvo un espesor total de 2 mm. Esta configuración permitió evitar operaciones adicionales de desbaste y reducir el número de procesos de manufactura necesarios.

Se generaron archivos de mecanizado CNC con los parámetros de corte definidos para cada herramienta utilizada. Estos archivos pueden reutilizarse como punto de partida para futuras iteraciones, lo que facilita la repetición del proceso de fabricación.

Se implementó una metodología de simulación CFD en dos dimensiones mediante ANSYS Fluent, con el propósito de reducir la complejidad del análisis y realizar una evaluación preliminar del movimiento del fluido. La metodología permitió estudiar el comportamiento del sistema bifásico agua-aceite en la región de interés y examinar las velocidades en las proximidades de las boquillas. Aunque el análisis no permitió validar de manera concluyente el modelo de velocidad teórica.

7.3 Recomendaciones para trabajos futuros

Se recomienda implementar un método de visualización acoplado a la plataforma rotatoria que permita observar el comportamiento de los fluidos sin interrumpir el giro del dispositivo. Esto facilitaría el seguimiento del transporte de la fase dispersa y permitiría identificar con mayor precisión problemas que afecten la generación de microgotas.

Se recomienda estudiar la distancia entre las boquillas para determinar si su separación influye en el funcionamiento del dispositivo. Asimismo, podría evaluarse una configuración con una sola boquilla para reducir la complejidad geométrica y facilitar la identificación de los parámetros que afectan la generación de microgotas. Esta alternativa podría ser pertinente debido a que, durante las pruebas realizadas, el transporte de fluido se observó principalmente en las primeras boquillas.

Se propone evaluar la Implementación de un tratamiento superficial en los microcanales para hacerlos más hidrofóbicos y observar el comportamiento en el transporte de los fluidos y en la formación de microgotas.

Se recomienda incorporar una batería como fuente de alimentación del motor y del sistema de control, con el fin de reducir la dependencia de una fuente de alimentación externa y mejorar la portabilidad del banco de pruebas.

8 Anexos

8.1 Dimensiones para el cálculo de velocidades en el apartado 4.2

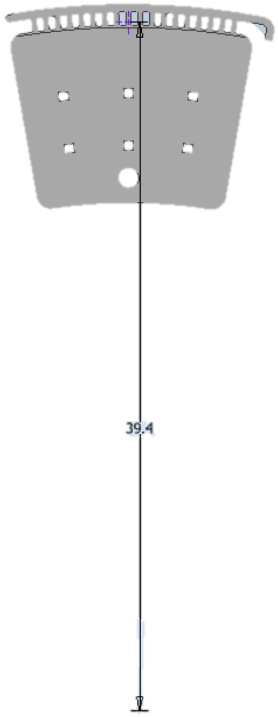


Figura 56. Medida del eje de rotación del CD al punto cercano a la salida de las boquillas. Con una dimensión de 39.4 mm

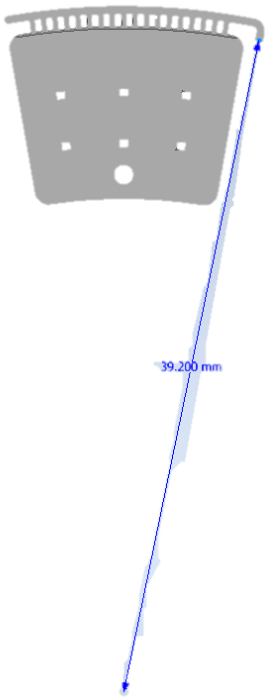


Figura 55. Medida del eje de rotación del CD al punto dende se definió la entrada del flujo para la simulación en ANSYS. Con una dimensión de 39.2 mm

8.2 Figuras de métricas de calidad de malla para primera iteración de modelo curvo.

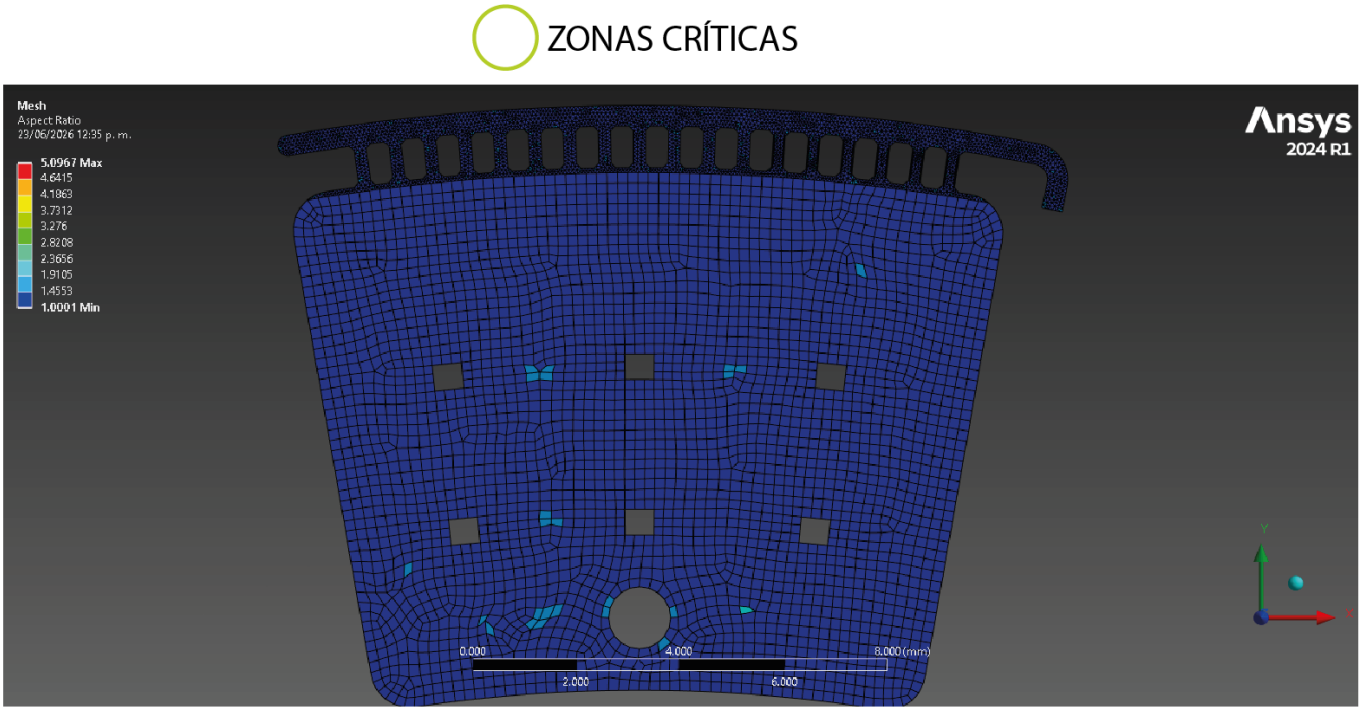
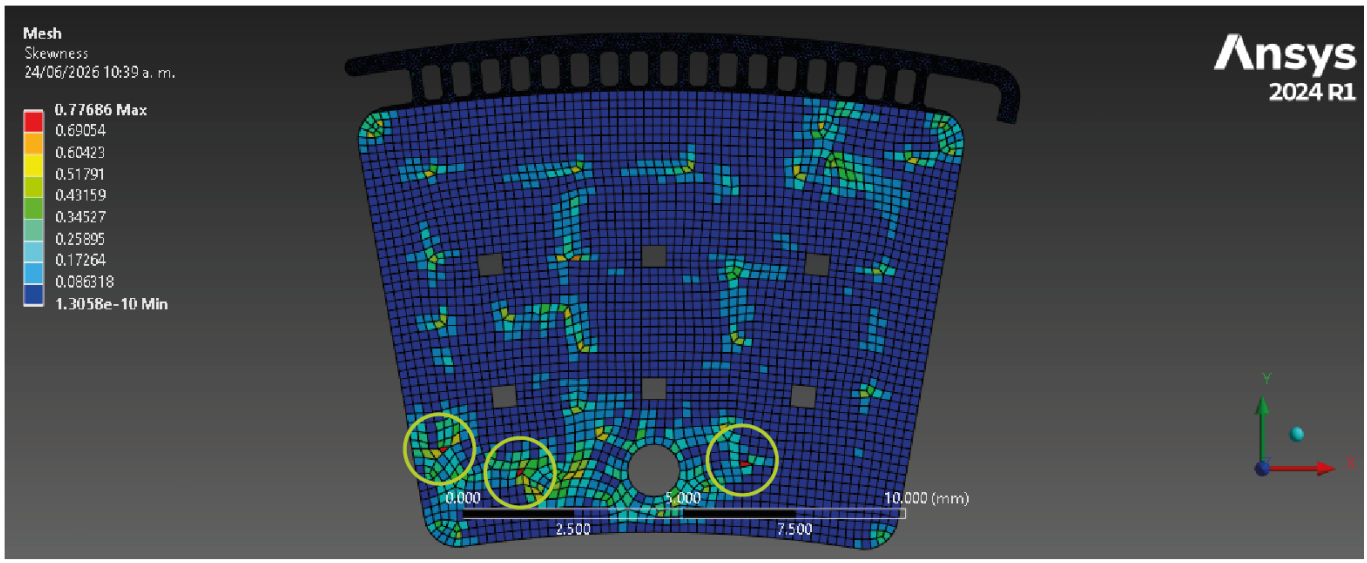
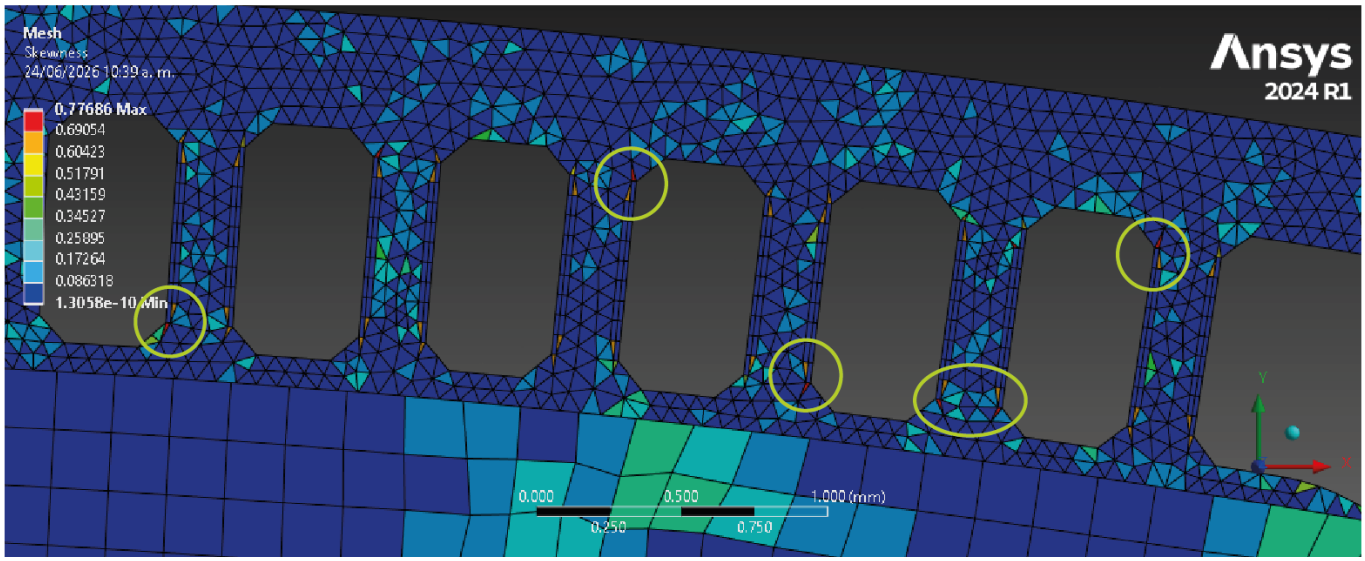


Figura 57. Muestra métrica de calidad *Aspect Ratio* de manera general y en zonas ampliadas para identificar zonas críticas.

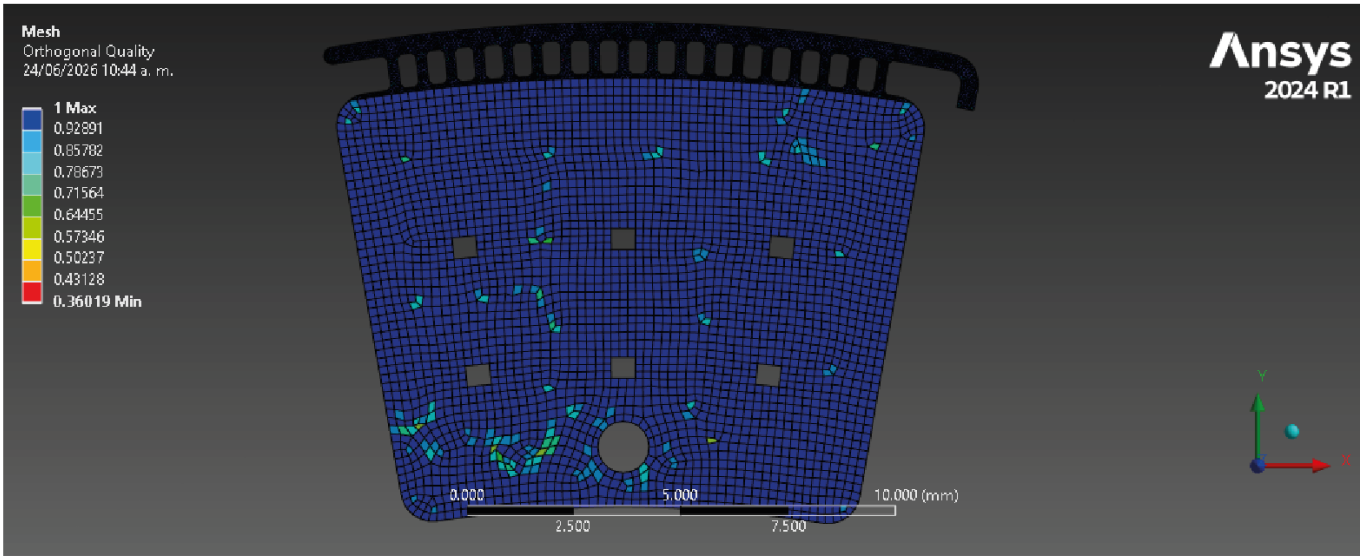


MALLADO COMPLETO

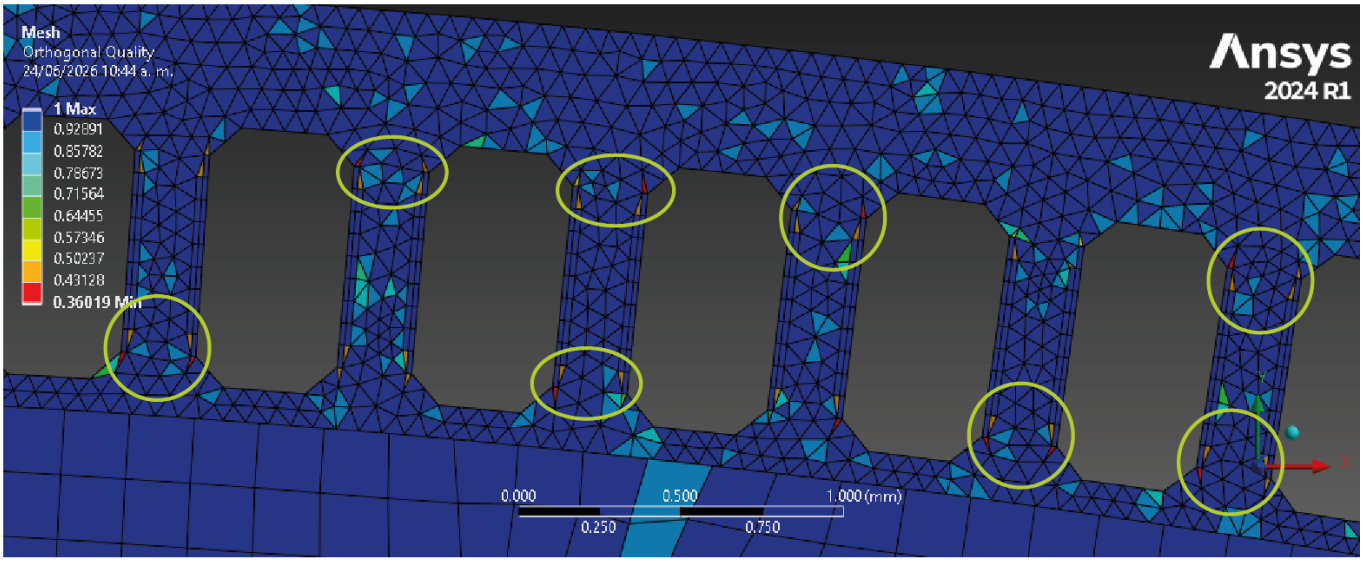


MALLADO PUNTUAL

Figura 58. Muestra métrica de calidad *Skewness* de manera general y en zonas ampliadas para identificar zonas críticas.



MALLADO COMPLETO



MALLADO PUNTUAL

Figura 59. Muestra métrica de calidad *Orthogonal Quality* de manera general y en zonas ampliadas para identificar zonas críticas.

8.3 Figuras de métricas de calidad de malla para el modelo recto.

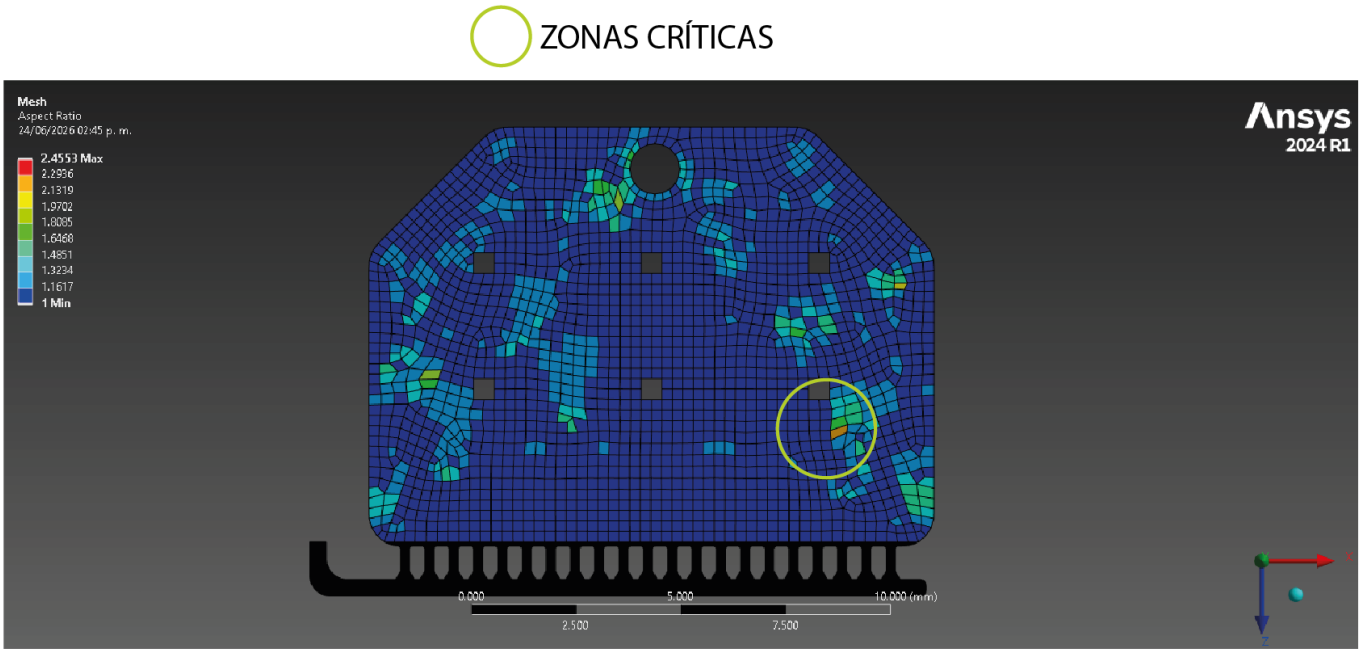
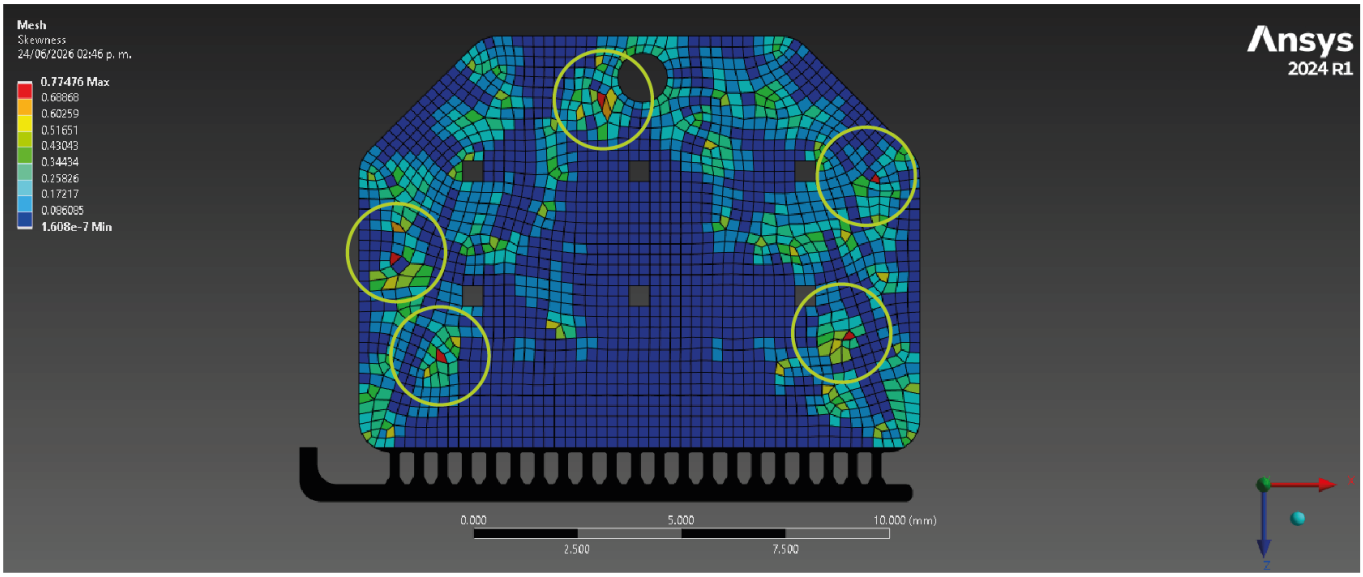
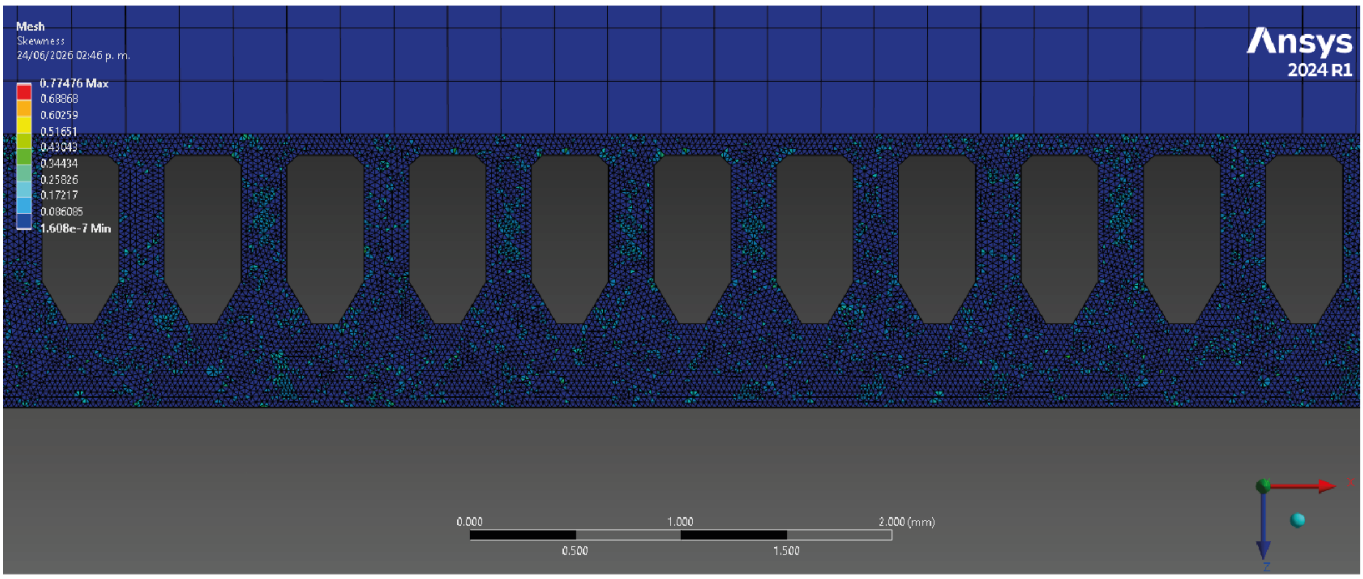


Figura 60. Muestra métrica de calidad *Aspect Ratio* de manera general para identificar zonas críticas.

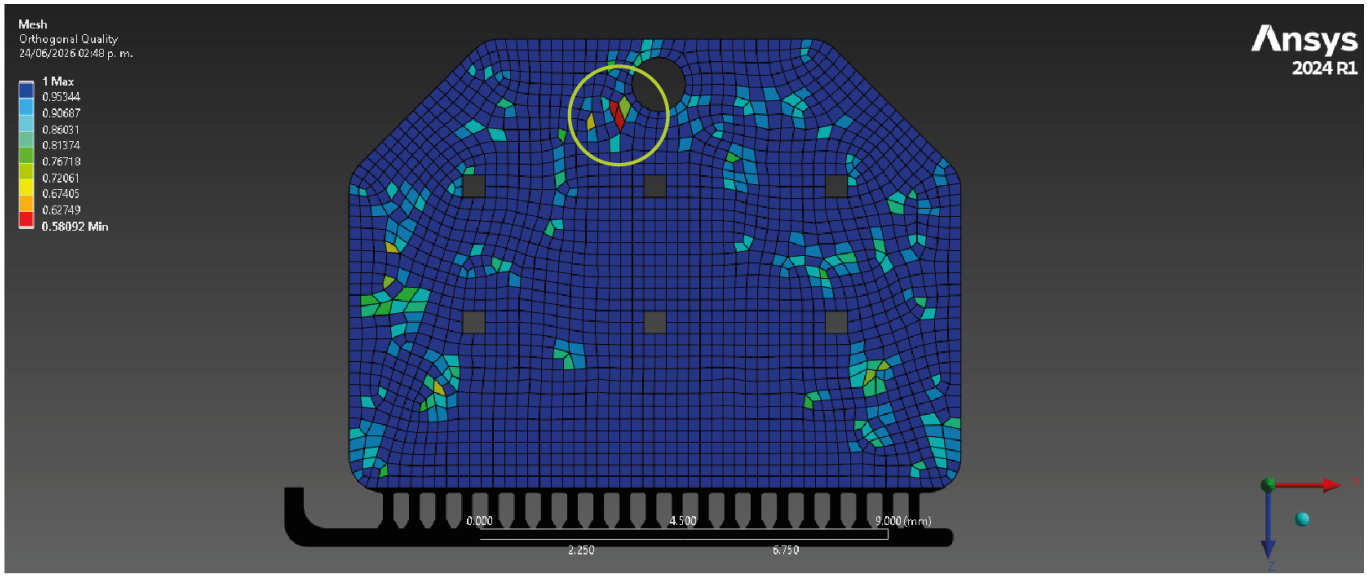


MALLADO COMPLETO

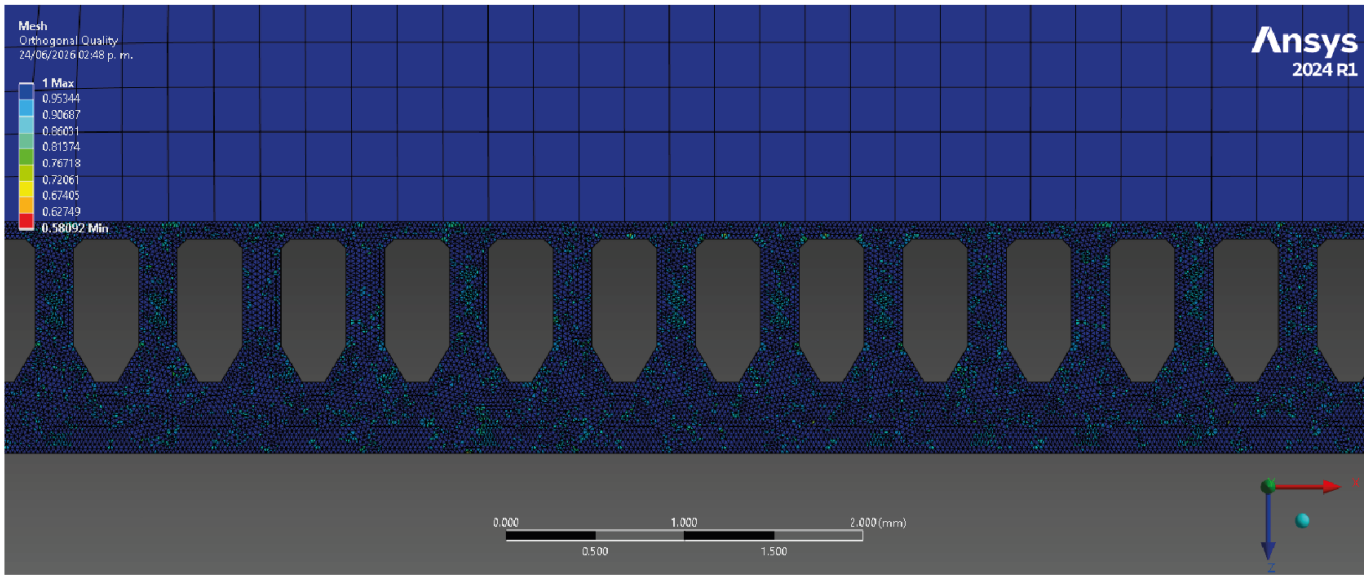


MALLADO PUNTUAL

Figura 61. Muestra métrica de calidad *Skewness* de manera general para identificar zonas críticas y en zonas ampliadas



MALLADO COMPLETO



MALLADO PUNTUAL

Figura 62. Muestra métrica de calidad *Orthogonal Quality* de manera general para identificar zonas críticas y en zonas ampliadas

8.4 Figuras de métricas de calidad de malla para segunda iteración de modelo curvo.

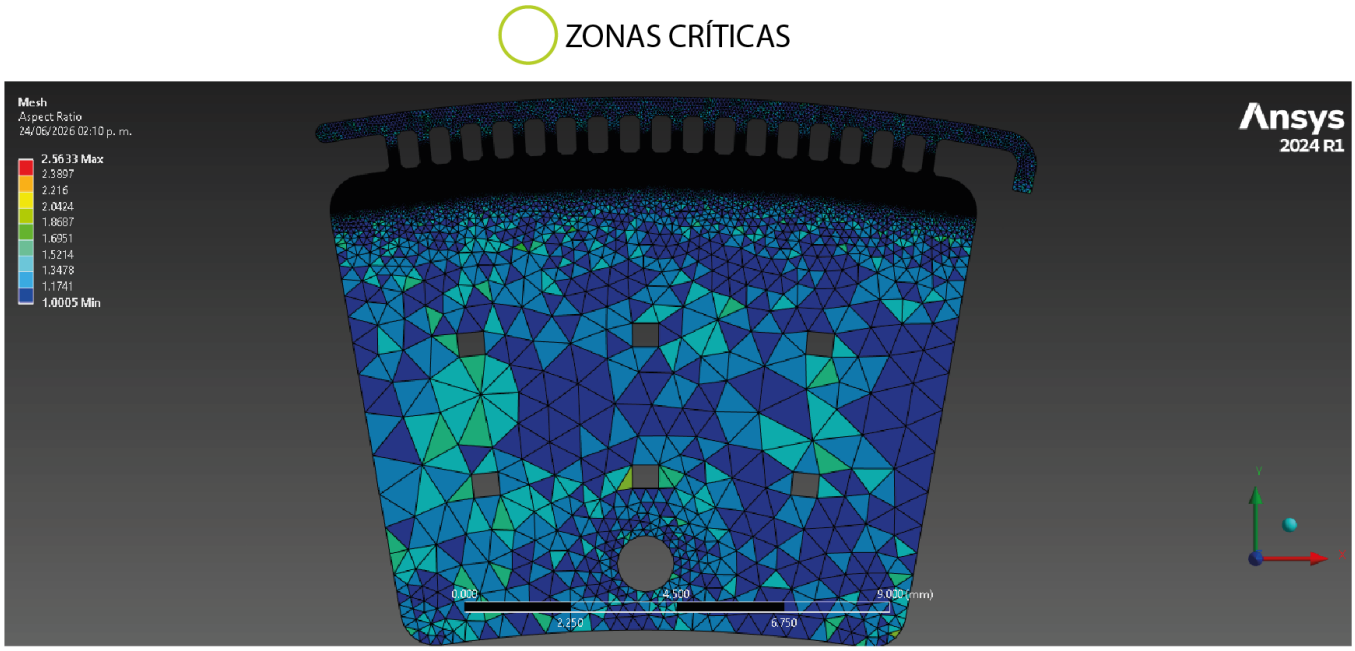
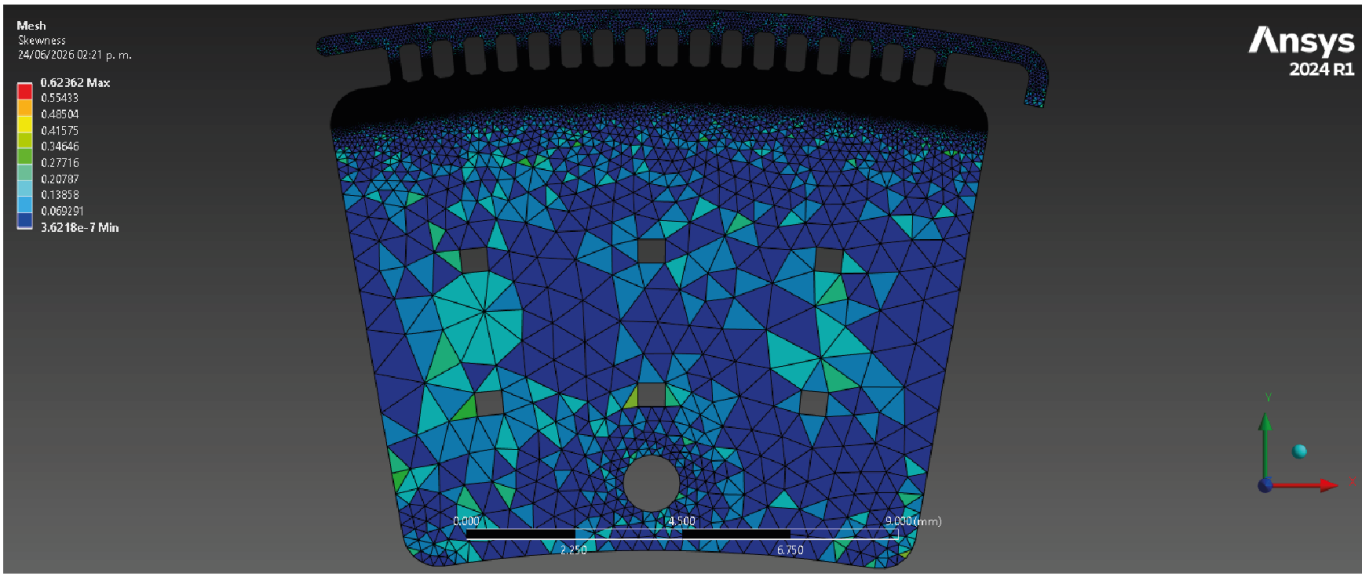
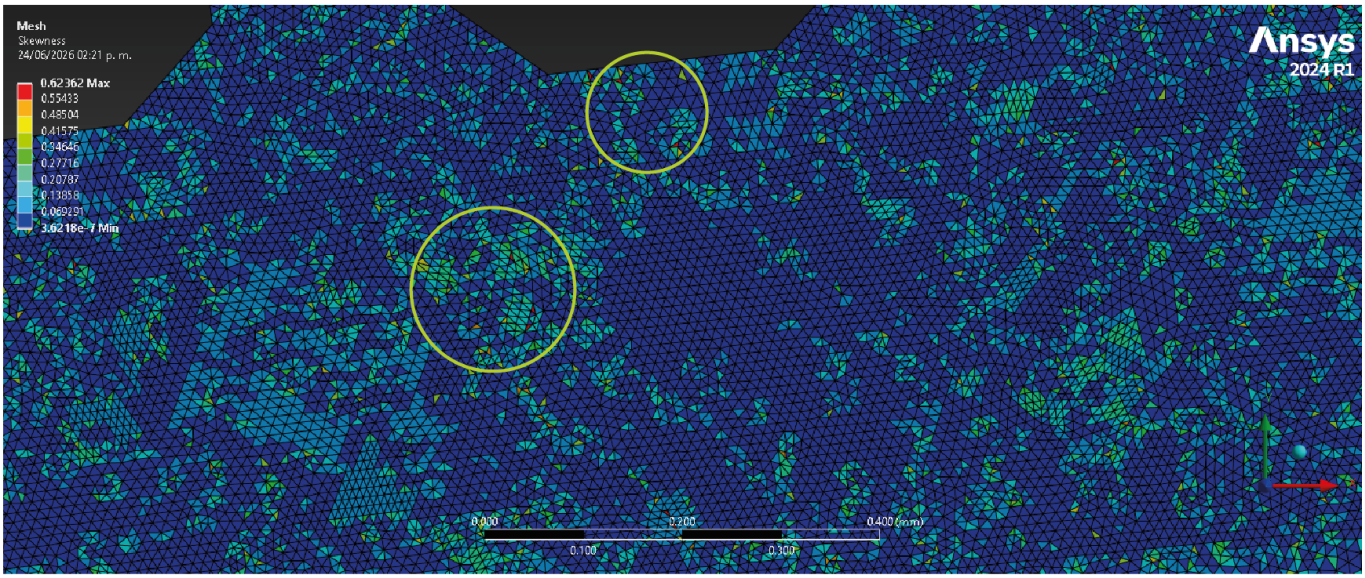


Figura 63. Muestra métrica de calidad *Aspect Ratio* de manera general y en zonas ampliadas para identificar zonas críticas

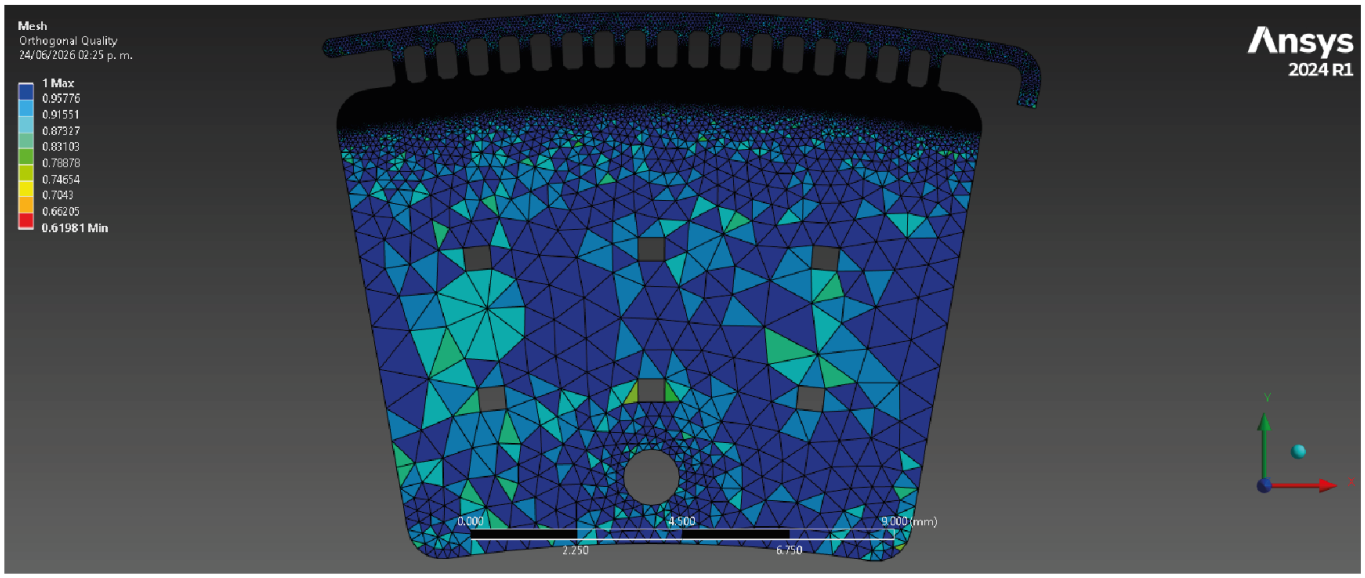


MALLADO COMPLETO

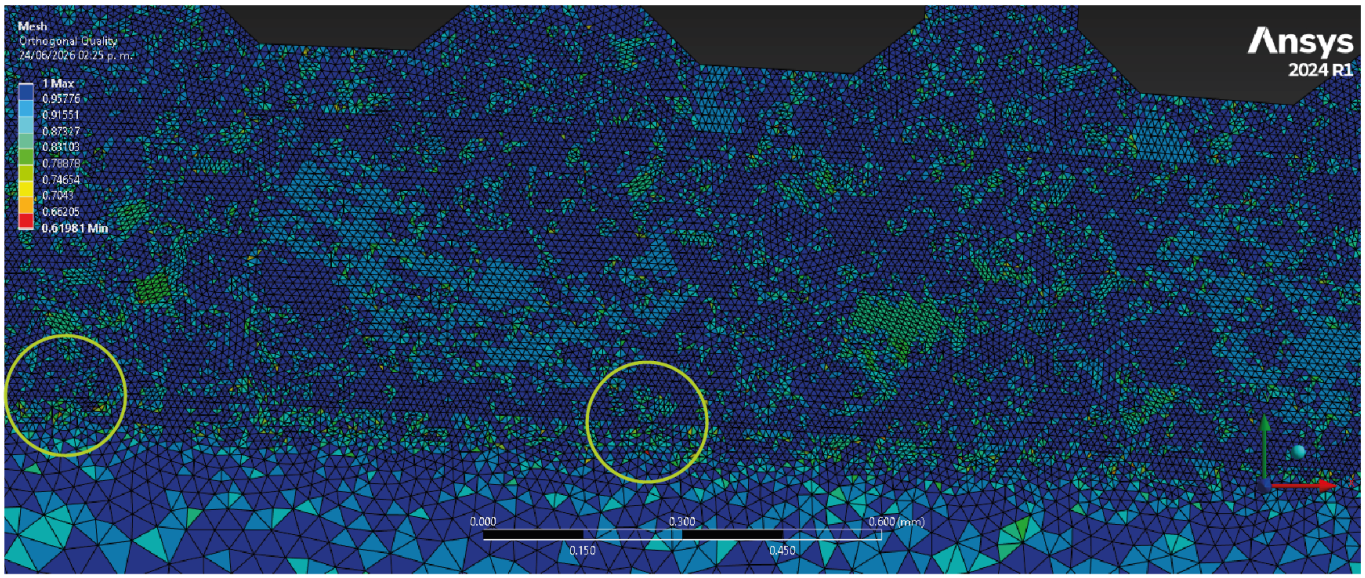


MALLADO PUNTUAL

Figura 64. Muestra métrica de calidad *Skewness* de manera general y en zonas ampliadas para identificar zonas críticas.



MALLADO COMPLETO



MALLADO PUNTUAL

Figura 65. Muestra métrica de calidad *Orthogonal Quality* de manera general y en zonas ampliadas para identificar zonas críticas.

8.5 Agregado para obtener material de tesis

En el siguiente enlace de github se encontrarán los modelos empleados en este trabajo, al igual que los programas de corte en CNC y el programa de medición de RMP con el sensor infrarrojo.

https://github.com/LuisFer02/Anexos-de-Tesis-.git

9 Agradecimientos

9.1 Agradecimientos personales

Agradezco al doctor Oscar Pilloni Choreño por el tiempo, los consejos, el material y el espacio de trabajo que brindó para la realización de este trabajo. Fue un pilar importante durante todo el desarrollo de esta tesis, además de ser un excelente académico y docente comprometido con la investigación y con el impulso del conocimiento en el área de Bio-MEMS en la UNAM, desde su pequeña trinchera.

Asimismo, agradezco a mi colega Cristopher por el apoyo en la parte de control, en la medición de las RPM del dispositivo, en la construcción del banco de pruebas y en el acondicionamiento de una computadora del laboratorio, elementos que fueron de gran utilidad para completar el trabajo experimental y de simulación. Considero que es un ingeniero ejemplar, capaz de resolver problemas de manera rápida y con una amplia gama de conocimientos. Sin duda le deseo un porvenir brillante.

Agradezco a mi asesor por la paciencia, la ayuda para obtener herramientas, equipo y material lo más pronto posible, así como la apertura para resolver cualquier duda y darme consejos para la elaboración del documento. Sin duda una persona dedicada y con gran conocimiento, siendo un líder nato en su área. Le agradezco mucho las oportunidades que me dio. Gracias a él tengo experiencia laboral en el área de manufactura, cosa que fue ampliamente aprovechada en este trabajo.

Una parte muy importante de este trabajo es mi familia, a quien deseo dedicarles este logro, ya que nunca escatimaron en nada para brindarme lo mejor a mi hermana y a mí. Admiro a mi padre por construir gran parte de lo que tenemos desde cero, por sus sacrificios y por enseñarme a trabajar y perseverar para sostener a una familia. A mi madre que estuvo atenta a mí y a mi hermana, siendo uno de los pilares de la familia, procurando que nunca nos falte lo necesario. Y le agradezco a los dos por heredarme y forma parte de la cultura Mixteca, a la que

me siento muy orgulloso de pertenecer y espero estar algún día a la altura de representarla y demostrar el orgullo que siento por mis raíces.

Agradezco a mi hermana por escucharme y apoyarme a lo largo de este camino, por levantarme siempre el ánimo y darme fuerzas para seguir adelante en los momentos difíciles. Le agradezco también por su apoyo en la elaboración de los diagramas en Photoshop, pues su contribución fue una parte importante de este trabajo. Le agradezco infinitamente por estar a mi lado y brindarme tanto apoyo. Gracias por acompañarme en este camino.

9.2 Agradecimientos Institucionales

Agradezco al Instituto de Ingeniería de la UNAM por permitirme utilizar las instalaciones, herramientas y espacios de trabajo de los edificios 12 y 18. En particular, agradezco al laboratorio Bio-MEMS, ubicado en el edificio 18, y al Área de Diseño Mecánico y Manufactura Avanzada (ADIMMA), ubicada en el edificio 12. Estos espacios fueron fundamentales para el desarrollo del presente proyecto, ya que permitieron llevar a cabo el diseño y la fabricación del dispositivo microfluídico en formato de disco, concebido para transportar fluidos a través de microcanales hasta las boquillas destinadas a la generación de microgotas.

Agradezco al Dr. Oscar Pilloni Choreño, investigador del laboratorio Bio-MEMS, por enseñarme a utilizar diversos equipos del laboratorio, así como por orientarme en los protocolos de seguridad y operación necesarios para trabajar en sus instalaciones.

Asimismo, agradezco al M. en I. David Abraham Santoyo García, encargado del área ADIMMA, por la capacitación proporcionada para el uso de las diferentes máquinas y equipos del área, así como por orientarme sobre los protocolos de seguridad necesarios para realizar las actividades de manufactura.

Referencias

[1] J. Azimi-Boulali, M. Madadelahi, M. J. Madou, and S. O. Martinez-Chapa, “Droplet and Particle Generation on Centrifugal Microfluidic Platforms: A Review,” *Micromachines (Basel).*, vol. 11, no. 6, p. 603, Jun. 2020, doi: 10.3390/mi11060603.

[2] J. B. Nielsen, R. L. Hanson, H. M. Almughamsi, C. Pang, T. R. Fish, and A. T. Woolley, “Microfluidics: Innovations in Materials and Their Fabrication and Functionalization,” *Anal. Chem.*, vol. 92, no. 1, pp. 150–168, Jan. 2020, doi: 10.1021/acs.analchem.9b04986.

[3] E. Ramírez, “Sistema para control de temperatura de microgotas en una plataforma microfluídica ,” Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, CDMX, 20202. Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: https://repositorio.unam.mx/contenidos?c=lY3NJY&q=Sistema_._para_._control_._de_._temperatura_._de_._microgotas_._en_._una_._plataforma_._microflu%C3%ADdica&t=search_0&as=0&d=false&a=3&v=1

[4] M. Ferreira, V. Carvalho, J. Ribeiro, R. A. Lima, S. Teixeira, and D. Pinho, “Advances in Microfluidic Systems and Numerical Modeling in Biomedical Applications: A Review,” *Micromachines (Basel).*, vol. 15, no. 7, pp. 873–903, Jun. 2024, doi: 10.3390/mi15070873.

[5] S. Smith *et al.*, “CD-Based Microfluidics for Primary Care in Extreme Point-of-Care Settings,” *Micromachines (Basel).*, vol. 7, no. 2, p. 22, Jan. 2016, doi: 10.3390/mi7020022.

[6] C. Wang, M. Liu, Z. Wang, S. Li, Y. Deng, and N. He, “Point-of-care diagnostics for infectious diseases: From methods to devices,” *Nano Today*, vol. 37, p. 101092, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.nantod.2021.101092.

[7] G. Luka *et al.*, “Microfluidics integrated biosensors: A leading technology towards lab-on-A-chip and sensing applications,” Dec. 01, 2015, *MDPI AG*. doi: 10.3390/s151229783.

[8] A.-G. Niculescu, C. Chircov, A. C. Bîrcă, and A. M. Grumezescu, “Fabrication and Applications of Microfluidic Devices: A Review,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 22, no. 4, p. 2011, Feb. 2021, doi: 10.3390/ijms22042011.

[9] Y. Ren and W. Leung, “Numerical Investigation of Cell Encapsulation for Multiplexing Diagnostic Assays Using Novel Centrifugal Microfluidic Emulsification and Separation Platform,” *Micromachines (Basel).*, vol. 7, no. 2, p. 17, Jan. 2016, doi: 10.3390/mi7020017.

[10] J.-S. CHEN and J.-H. JIANG, “Droplet Microfluidic Technology: Microdroplets Formation and Manipulation,” *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, vol. 40, no. 8, pp. 1293–1300, Aug. 2012, doi: 10.1016/S1872-2040(11)60567-7.

[11] A. Pit, M. Duits, and F. Mugele, “Droplet Manipulations in Two Phase Flow Microfluidics,” *Micromachines (Basel).*, vol. 6, no. 11, pp. 1768–1793, Nov. 2015, doi: 10.3390/mi6111455.

[12] I. Schwarz, “Lumped model simulation for the fast development of robust centrifugal-microfluidic lab-on-a-chip systems,” tesis doctoral, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2019. Accessed: Aug. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/332072598_Lumped_model_simulation_for_the_fast_development_of_robust_centrifugal-microfluidic_lab-on-a-chip_systems

[13] T. Brenner, T. Glatzel, R. Zengerle, and J. Ducrée, “Frequency-dependent transversal flow control in centrifugal microfluidics,” *Lab Chip*, vol. 5, no. 2, pp. 146–150, Feb. 2005, doi: 10.1039/B406699E.

[14] J. Ducrée, S. Haeberle, T. Brenner, T. Glatzel, and R. Zengerle, “Patterning of flow and mixing in rotating radial microchannels,” *Microfluid. Nanofluidics*, vol. 2, no. 2, pp. 97–105, Mar. 2006, doi: 10.1007/s10404-005-0049-4.

[15] M. Madou, J. Zoval, G. Jia, H. Kido, J. Kim, and N. Kim, “LAB ON A CD,” *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 601–628, Aug. 2006, doi: 10.1146/annurev.bioeng.8.061505.095758.

[16] J. Ducrée, T. Brenner, S. Haeberle, T. Glatzel, and R. Zengerle, “Multilamination of flows in planar networks of rotating microchannels,” *Microfluid. Nanofluidics*, vol. 2, no. 1, pp. 78–84, Jan. 2006, doi: 10.1007/s10404-005-0056-5.

[17] M. J. Madou and G. J. Kellogg, “The LabCD™: A Centrifuge-Based Microfluidic Platform for Diagnostics,” G. E. Cohn, Ed., SPIE, Feb. 1998, pp. 80–93. doi: 10.1117/12.307314.

[18] F. Mogollón-Mogollón and D. M. Hernández-Avilés, “Simulación numérica en ANSYS Fluent del flujo a través de una compuerta en un canal de laboratorio,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 23, no. 3, pp. 33–46, Jul. 2024, doi: 10.18273/revuin.v23n3-2024003.

[19] R. C. ; M. J. A. ; B. J. F. ; S. S. A. B. G. E. , Jr. ; G. J. W. Gilmore, “Simplifying CFD modeling of longwall gobs with a modular meshing approach,” *Min. Eng.*, vol. 67, no. 3, pp. 68–72, Mar. 2015, Accessed: Aug. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/285220622_Simplifying_CFD_modeling_of_longwall_gobs_with_a_modular_meshing_approach

[20] A. H. S. G. G. R. Otálora Carmona, “Análisis de un vertedero triangular de pared delgada con Ansys Fluent Triangular thin-plate weir analysis using Ansys Fluent,” *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, vol. 103, no. 103, pp. 37–46, Apr. 2016, Accessed: Aug. 08, 2025. [Online]. Available:

https://apiescuelaing.bibliolabtech.com/server/api/core/bitstreams/79b74d6c-cf41-49ae-83cc-8da03fe0f625/content

[21] L. X. Kong, K. Parate, K. Abi-Samra, and M. Madou, “Multifunctional wax valves for liquid handling and incubation on a microfluidic CD,” *Microfluid. Nanofluidics*, vol. 18, no. 5–6, pp. 1031–1037, May 2015, doi: 10.1007/s10404-014-1492-x.

[22] F. Schuler *et al.*, “Centrifugal step emulsification applied for absolute quantification of nucleic acids by digital droplet RPA,” *Lab Chip*, vol. 15, no. 13, pp. 2759–2766, Jul. 2015, doi: 10.1039/c5lc00291e.

[23] S. Sugiura, M. Nakajima, N. Kumazawa, S. Iwamoto, and M. Seki, “Characterization of Spontaneous Transformation-Based Droplet Formation during Microchannel Emulsification,” *J. Phys. Chem. B*, vol. 106, no. 36, pp. 9405–9409, Sep. 2002, doi: 10.1021/jp0259871.

[24] S. Sugiura, M. Nakajima, and M. Seki, “Prediction of Droplet Diameter for Microchannel Emulsification,” *Langmuir*, vol. 18, no. 10, pp. 3854–3859, May 2002, doi: 10.1021/la0255830.

[25] S. Haeberle, R. Zengerle, and J. Ducrée, “Centrifugal generation and manipulation of droplet emulsions,” *Microfluid. Nanofluidics*, vol. 3, no. 1, pp. 65–75, Dec. 2006, doi: 10.1007/s10404-006-0106-7.

[26] S. Sugiura, M. Nakajima, T. Oda, M. Satake, and M. Seki, “Effect of interfacial tension on the dynamic behavior of droplet formation during microchannel emulsification,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 269, no. 1, pp. 178–185, Jan. 2004, doi: 10.1016/j.jcis.2003.07.031.

[27] W. Kubicki *et al.*, “A 3D printed microfluidic device for centrifugal droplet generation,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 30, no. 11, pp. 357–368, Dec. 2024, doi: 10.1108/RPJ-05-2024-0215.

[28] E. P. Kalogianni, T. D. Karapantsios, and R. Miller, “Effect of repeated frying on the viscosity, density and dynamic interfacial tension of palm and olive oil,” *J. Food Eng.*, vol. 105, no. 1, pp. 169–179, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.02.021.

[29] H. N. Gowda *et al.*, “Development of a proof-of-concept microfluidic portable pathogen analysis system for water quality monitoring,” *Science of The Total Environment*, vol. 813, p. 152556, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152556.

[30] S. Alamri, A. I. Aguilar-Morales, and A. F. Lasagni, “Controlling the wettability of polycarbonate substrates by producing hierarchical structures using Direct Laser Interference Patterning,” *Eur. Polym. J.*, vol. 99, pp. 27–37, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2017.12.001.

[31] M. J. Pratt, “Product models and virtual prototypes in mechanical engineering,” Gaithersburg, MD, May 1995. doi: 10.6028/NIST.IR.5650.

[32] CNCCookbook, “G-Wizard CNC Speeds and Feeds Calculator for Milling Machines.” Accessed: Sep. 28, 2026. [Online]. Available: https://www.cnccookbook.com/g-wizard-feeds-speeds-calculator-mill/

[33] N. Rondot, S. Yan, D. Mager, and L. Kulinsky, “A low-cost printed circuit board-based centrifugal microfluidic platform for dielectrophoresis,” *Microsyst. Nanoeng.*, vol. 11, no. 1, p. 23, Jan. 2025, doi: 10.1038/s41378-024-00856-5.

[34] Universal Laser Systems, “Polycarbonate Processing Guide.” Accessed: Oct. 27, 2026. [Online]. Available: https://cdn.ulsinc.com/assets/pdf/materials_subordinate/583606c097d4dd53e131cdab/polycarbonate__processing_guide.pdf?utm_source.com