



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISEÑO DE UN MEZCLADOR ESTÁTICO QUE  
PERMITIRÁ PRODUCIR UNA MEZCLA DE  
COMBUSTIBLES EN EL AICM**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Licenciatura en Ingeniería Mecánica**

**P R E S E N T A**

Zecua Lechuga Pedro Dante

**DIRECTOR DE TESIS**

*DR. FRANCISCO JAVIER SOLORIO ORDAZ*



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016**

*Agradecimientos.*

*Al Dr. Enrique Soto Castruita por la oportunidad que me dio ya que sin el nada de esto hubiese sido posible. Al Dr. Nicolas Kemper Valverde por su apoyo y el financiamiento recibido para la realización de esta tesis. A todos mis sinodales por sus enseñanzas. A mi mamá que sin ella no estaría en CU y a mi papá por su apoyo incondicional. A mi amigo Gerardo por su apoyo. Al Grupo de Ingeniera de Proceso del CCADET por las facilidades de cómputo y espacios.*

---

**ÍNDICE GENERAL**


---

<b>Resumen</b> .....	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
1.1 Objetivo principal .....	7
1.2 Objetivos particulares .....	7
1.3 Planteamiento del problema.....	8
<b>CAPITULO 2: ANTECEDENTES</b> .....	<b>10</b>
2.1 Los Combustibles .....	11
2.1.1 Combustibles de origen fósil .....	12
2.1.2 Combustibles de origen biológico .....	14
2.2 Los mezcladores estáticos.....	16
2.2.1 Selección adecuada de un mezclador .....	19
2.2.2 Modelos comerciales de mezcladores estáticos .....	22
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA</b> .....	<b>26</b>
3.1 Propiedades de los fluidos .....	27
3.2 Esquema computacional .....	29
3.3 Proceso de diseño.....	32
3.4 Diseños propuestos .....	39
3.5 Diseños finales.....	41
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS</b> .....	<b>45</b>
4.1 Análisis de resultados .....	46
4.2 Análisis de mezclas.....	59
<b>CAPÍTULO 5: CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO</b> .....	<b>69</b>
5.1 Construcción del prototipo .....	71
5.2 Instalaciones de ASA .....	76
<b>Conclusiones</b> .....	<b>79</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>80</b>
<b>Índice de tablas gráficas y figuras</b> .....	<b>81</b>
<b>Glosario de términos</b> .....	<b>85</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>86</b>



## RESUMEN

El objetivo de éste trabajo consiste en diseñar un mezclador de combustibles. Este formará parte de un sistema que tiene como fin principal automatizar, a través de una totalmente nueva interfaz, un sistema de mezclado de combustibles que reducirá, a partir de la mezcla de combustibles orgánicos con fósiles, las emisiones contaminantes, no sólo de las aeronaves que transitan sobre el valle de México sino, a futuro, de las que lo hacen en todo el país.

Este trabajo se ha dividido en diversas secciones, una de ellas se refiere al diseño de un mezclador estático, para lograr una mezcla homogénea de dos combustibles con propiedades físicas diferentes dentro del sistema antes mencionado. La parte que corresponde a mecánica de fluidos se refiere al análisis específico de cómo se comportarán los fluidos desde que se encuentran en la tubería, entran al mezclador y hasta la salida de éste monitoreando las variables de mayor interés, como son caída de presión, velocidad del flujo, trayectorias, porcentaje de mezclado, así como otras variables menos relevantes, como el esfuerzo cortante, la vorticidad, la viscosidad, etc. Los puntos que se han mencionado anteriormente son materia prima de este trabajo cuyo objetivo general implica dar solución al incipiente problema que Aeropuertos y Servicios Auxiliares, en la división de combustibles, presenta en lo relativo al suministro y venta de éste insumo cada vez más solicitado por las aerolíneas comerciales.





*ASA Combustibles. Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.*

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

---

A la luz de los recientes acontecimientos mundiales, la reducción de gases de efecto invernadero se ha vuelto un problema de carácter mundial. La convención de Bruselas en el 2005 ha estipulado que para el 2050 se reduzca hasta en un 50% la emisión de este tipo de contaminantes en la industria aeronáutica, la cual representa el 2% del total de emisiones a nivel mundial.

La mezcla de combustibles fósiles con combustibles orgánicos se vuelve ahora una de las opciones más accesibles gracias a su viabilidad y al importante incremento en la producción que los cultivos transgénicos han tenido a nivel mundial.

Sin embargo, se ha hablado mucho acerca de cómo este tipo de cultivos competirían de manera directa con los cultivos que se usan actualmente para cubrir las necesidades alimentarias de la población en general, sin olvidar que aún presenta una componente económica que lo ha frenado desde, prácticamente, su nacimiento.

Según un estudio de combustibles alternativos realizado en Valencia, España en 2010, los biocombustibles podrían suministrar entre 35 y el 100 % de la demanda global de combustible para aviación en 2050, teniendo en cuenta su alto potencial en ahorros de Gases de Efecto Invernadero (GEI), siempre y cuando los riesgos relacionados con el cambio de uso del suelo sean manejados eficazmente. Y es éste punto donde la producción de este biocombustible se vuelve tan importante. El creciente uso de las tierras de cultivo para fines de producción de biocombustibles ya está compitiendo con las tierras que se usan para alimentar el ganado o incluso para el consumo humano, sin embargo no será preocupación principal de este trabajo.

Según cifras de la IATA, la asociación que agrupa el 90% de las aerolíneas del mundo, el incremento del tráfico aéreo se multiplicará por ocho en los próximos años, pasando de transportar en el 2011 2.8 millones de pasajeros a transportar en el año 2050 a 16 millones, por lo cual se ha comprometido a reducir las emisiones de efecto invernadero para esa fecha hasta en un 50% de las que se emitían en el 2005. Este ahorro, que se relaciona directamente con la investigación de nuevas tecnologías de propulsión así como de nuevos materiales también está ligado de manera inherente al desarrollo de nuevos combustibles.

En el mediano plazo, se tiene contemplado migrar al uso de energías renovables, a pesar de que su uso es considerablemente aún más costoso que las energías tradicionales, debido principalmente a cuestiones políticas y económicas que frenan el desarrollo de proyectos en esta materia. En este trabajo lo que se busca es establecer los fundamentos para detonar el uso de combustibles orgánicos y las tecnologías de mezclado, logrando romper esa barrera psicológica que nos impide desarrollar el potencial de ésta industria.

### 1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

- Diseñar y construir el prototipo de un mezclador estático para producir una mezcla homogénea de queroseno con bio-queroseno en diferentes concentraciones para el suministro de combustibles a aeronaves comerciales.

### 1.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Caracterizar el comportamiento de la mezcla de los combustibles, queroseno y bio-queroseno, para conocer las propiedades de estos fluidos después de mezclarse.
- Elaborar diferentes diseños comparando sus cualidades técnico-comerciales.
- Generar simulaciones por computadora que permitan observar el comportamiento de los fluidos dentro del mezclador y el comportamiento mecánico de los elementos del mismo.
- Construir el prototipo del mezclador estático que satisfaga las condiciones requeridas, dentro las instalaciones del CCADET.
- Instalar el mezclador estático, junto con el sistema completo de mezclado de combustibles, en las instalaciones de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA).

### 1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

El uso de energías renovables ha sido muy estimulado estos últimos años, debido a la incipiente e inevitable premisa que nos augura un agotamiento de los combustibles fósiles en un mediano plazo, por lo cual todos los países desarrollados, principalmente E.E.U.U. y la UE se han dado a la tarea de encontrar nuevas formas de energías verdes y dar, en aproximadamente 20 años, el cambio total a ese tipo de energías.

En este contexto, México está desarrollando también estas nuevas tecnologías, aunque no de una forma tan agresiva como lo hacen los países desarrollados.

En los últimos años, la industria aeronáutica ha crecido considerablemente a nivel mundial, como consecuencia tanto de la globalización, como del aumento de la población con capacidad económica para viajar. Sin embargo de manera positiva también ha arrastrado a otras industrias al crecimiento, estas por mencionar algunas, son: desarrollo de materiales, nanotecnología y en general la industria aeroespacial. Siguiendo esta línea de eventos es importante mencionar que, en general, todas las líneas aéreas han buscado reducir sus costos derivados de las diversas crisis económicas que se le han presentado, a ésta en especial, y de los constantes aumentos en los precios de los hidrocarburos que se han mostrado implacables en la última década. Sin embargo en los últimos meses esta tendencia se ha invertido debido al nuevo plan energético de los E.E.U.U. y a factores inherentes al modelo económico capitalista (*Gráfica 1. Comportamiento de los precios del queroseno*).

El tema de los combustibles es uno de los elementos que más volatilidad han presentado sobre todo en los últimos meses, éste a su vez está condicionado por normas internacionales, así como por fenómenos sociopolíticos.

Sin embargo, el costo más importante ha sido el que se ha estado generando entorno al medio ambiente, según la mayoría de los científicos, deteriorando irreversiblemente el mismo y generando otro tipo de problemas a la salud principalmente en las ciudades, asociado de manera significativa al ya muy conocido efecto invernadero, el cual se encuentra íntimamente ligado a la vida de cualquier persona. Empero esta no es la principal razón por la cual el incremento en el uso de energías verdes y biocombustibles haya aumentado, más bien es resultado de una serie de políticas internacionales en especial de las regulaciones de CO<sub>2</sub> en Europa y de los así llamados bonos de carbono, los cuales son otorgados a las empresas privadas que reduzcan sus emisiones de CO<sub>2</sub>. La equivalencia más reciente es de 1 ton de CO<sub>2</sub> = 1 bono de carbono = 7 dólares americanos. Dicho lo cual, por cada tonelada de CO<sub>2</sub> que la empresa deje de emitir, se le entregará un bono de carbono, llegando a 40 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> dejadas de emitir por Iberia, por ejemplo, traducido en 280 000 000 usd. sólo para esta aerolínea, sin embargo en 2008 los bonos alcanzaron hasta 23 euros incrementando ésta cifra a 1200 000 000 usd.

En este contexto, nuestro país y específicamente ASA Servicios Aeropuertoarios se han dado a la tarea de mantenerse en el panorama internacional y han propuesto un sistema integral que reduzca el consumo de combustibles fósiles y al mismo tiempo utilizar biocombustibles o combustibles a base de materia orgánica, reduciendo las emisiones contaminantes.

Este sistema consiste en el diseño e implementación de un proceso por el cual se mezcle queroseno y bioqueroseno, el primero, combustible requerido en la aviación mejor conocido como turbosina o kps, en

diferentes porcentajes según las necesidades del cliente. En especial el bioqueroseno se ha desarrollado como una verdadera opción al uso de derivados de petróleo y cumpliendo con todos los requerimientos de seguridad, disminuye las emisiones contaminantes así como los costos de mantenimiento, representando así la opción más viable en el corto plazo de la cual la industria aérea se puede beneficiar.

En este trabajo se desarrollará un sistema que permita mezclar dos corrientes en línea, una de queroseno y otra de bioqueroseno a través de un sistema diseñado por el equipo de trabajo, para posteriormente llenar un auto-tanque el cual suministrará dicho combustible a las aeronaves, esta mezcla disminuirá las emisiones hasta en un 50% del total usado actualmente según las necesidades del cliente.

El mezclado de fluidos, sólidos-fluidos, así como de fluidos miscibles y no miscibles, newtonianos y no newtonianos, se ha presentado en la industria desde hace más de 100 años y su mejoramiento ha dependido del avance de la tecnología en particular de los materiales, pero también del mezclado. Un efectivo mezclado representa actualmente un considerable ahorro de energía y por lo tanto de recursos, de ahí su importancia.

Los principales problemas que el mezclado puede presentar son: los tiempos, la velocidad y para el caso en análisis, la distancia en la cual se ha de llevar a cabo el proceso.

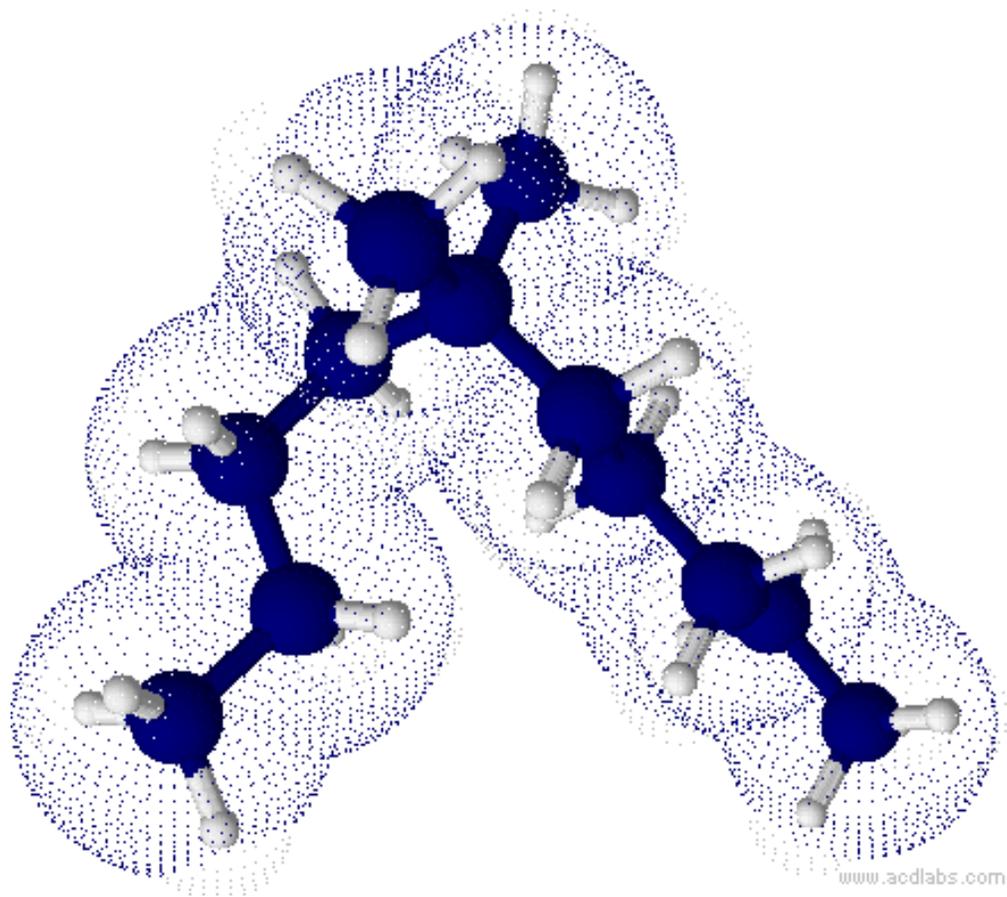
Los mezcladores en línea se han presentado como una alternativa muy útil para fluidos que se transportan en una tubería en donde no se desea tener un cambio de diámetro en la misma y en donde el mantenimiento se desea reducir de manera que opere de forma continua.

Los principales problemas que un mezclador en línea puede presentar son : la disminución de la presión en las corrientes y como consecuencia un aumento en la energía que se requiere para su transporte, hállese específicamente de las bombas, y tal vez su costo inicial, que en comparación con las ventajas que ofrece se pueden subestimar. Una vez obtenidos los datos, de conformidad con la homogeneidad del mezclado, se procede a elegir el que mejor satisfaga dichas necesidades y su posterior implementación será consecuencia de ello.



Gráfica 1. Comportamiento de los precios del queroseno en el mundo hasta junio de 2015 (usd./galón). Datos obtenidos de Index Mundi International.





*Química la ciencia central, Mendeliev, 1879 .Molécula de queroseno (C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>).*

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES

---

## 2.1 COMBUSTIBLES

En la actualidad, las preocupaciones acerca de los altos precios de los combustibles y los daños ambientales que la aviación genera, están impulsando alternativas en un afán por disminuir los efectos adversos que estos producen y por otro lado abonar bases científicas a la discusión del cambio climático. La principal preocupación es si este sector tiene una salida al incipiente problema que genera la dependencia a los combustibles fósiles, dadas las circunstancias inherentes a la economía global.

En la figura 2.1 se observa cómo se obtienen los diferentes productos derivados del petróleo, a través de éste se pueden extraer más de 1500 productos que se dividen en: combustibles, como lo son todo tipo de gasolinas como su nombre lo indica y en petroquímicos: como los polietilenos o los bencenos. Comenzando a través de un proceso de destilación es como se van obteniendo, en primer lugar, el combustóleo que se puede considerar en el fondo del barril, después todos los chapopotes y el bitumen, y así en orden ascendente se obtiene los aceites más pesados y más densos, después el diésel y posteriormente el jet-fuel o turbosina como se le conoce comercialmente, que es el más importante para este trabajo. Posteriormente se observa que se obtienen todas las gasolinas para los automóviles ya sean sin plomo, sin azufre, etc. según el proceso que sigan, y al final se obtiene el gas licuado de petróleo (gas LP) que según ésta figura es el combustible que tiene el proceso de refinación más alto lo cual explica sus propiedades y su uso tan extenso en la vida cotidiana.

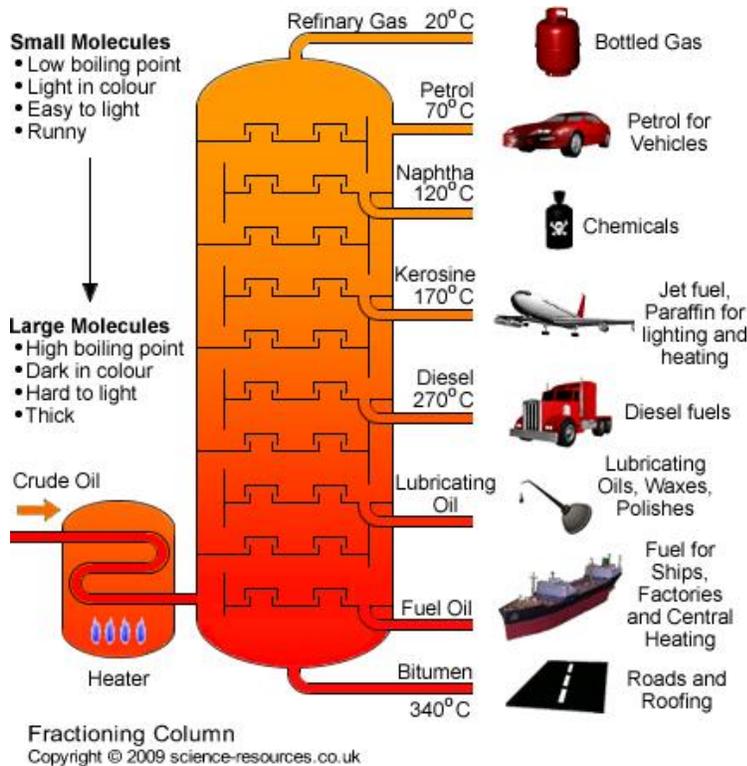


Figura 2.1. Ejemplo de la obtención de los productos derivados del petróleo.

El combustible usado en las aeronaves se obtiene a partir de la destilación atmosférica del crudo, en concreto, a la fracción de la destilación comprendida entre 145 y 240°C. Ref. imagen obtenida de Science-Resources.co.uk, revisado el día 280516.

A continuación se expondrá una breve descripción de los combustibles que se usaron en el presente trabajo.

### 2.1.1 Combustibles de origen fósil

El queroseno, también conocido como turbosina, es el combustible fósil que se ocupa actualmente en gran parte de la industria aeronáutica, siendo una excepción el sector militar; es de color transparente a amarillo o negro, está compuesto en un 86% por carbono y en un 16% de hidrógeno, posee según las condiciones atmosféricas un punto de congelación de  $-18^{\circ}\text{C}$  y una densidad promedio de  $0.8\text{ g/cm}^3$  su punto de ebullición varía según el porcentaje de impurezas que éste contenga pero se encuentra normalmente entre  $150^{\circ}\text{C}$  y  $235\text{-}315^{\circ}\text{C}$ .

En cuanto al comportamiento en frío, el punto de cristalización fijado es de  $-47^{\circ}\text{C}$ , muy difícil de conseguir porque el queroseno contiene pequeñas cantidades de agua disuelta que se deposita en finas gotas que comienzan a helarse a una temperatura próxima a los  $0^{\circ}\text{C}$ . Para evitarlo se añaden aditivos anticongelantes que absorben el agua y bajan el punto de cristalización.

Su composición corresponde a la fracción hidrocarbonada  $\text{C}_{10}\text{-C}_{13}$ , tienen un contenido en aromáticos inferior al 25% en volumen para minimizar la formación de humos y depósitos carbonosos durante su combustión y un contenido en azufre inferior al 0.3% en peso. Reacción química del queroseno:



Por mucho tiempo el predecesor más antiguo de este derivado del petróleo, fue usado en la vida de las personas para alumbrar sus hogares usando lámparas de queroseno. Pero su uso ha disminuido a lo largo de los últimos 50 años debido al aumento en el uso de la energía eléctrica, las energías renovables e incluso de los combustibles orgánicos.

En la actualidad entre un 1% - 1.2% del petróleo crudo se utiliza para la producción de queroseno, esto combinado con la disminución de la demanda de petróleo por parte de los E.E.U.U y al aumento de los proveedores en los últimos años de la materia prima, generará bajos precios en los combustibles finales, a pesar de ello en términos generales se espera un repunte en la demanda de queroseno a nivel mundial. En particular México ocupó 4 500 millones de litros de queroseno durante 2015 y se espera que esta cifra aumente a 5 500 a mediados de 2020<sup>2</sup>.

El queroseno es también conocido por su nombre comercial como: combustible Jet o Jet A-1 según sus diferentes denominaciones, ya que su principal uso es precisamente suministrarse a los dispositivos de propulsión jet. Dada su alta estabilidad térmica en los procesos de almacenamiento se ha vuelto esencial para ésta industria ya que se usa en el sistema de refrigeración así como en los sistemas hidráulicos.

El queroseno puro a veces se usa como combustible con punto de ignición alto y es el componente principal de las mezclas de nafta-queroseno y queroseno-gasolina.

<sup>2</sup>SCT El caso para los biocoombustibles de aviación en Mexico 2010. Revisado el 15 de Mayo de 2016 a las 15:222 hrs  
[http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC/00%20Aeronautica/Combustibles%20Sustentables/04.Bioturbosina\\_Caso%20MEX%2010\\_2010.pdf](http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC/00%20Aeronautica/Combustibles%20Sustentables/04.Bioturbosina_Caso%20MEX%2010_2010.pdf)

Actualmente se fabrican principalmente dos tipos de combustible jet:

- El combustible Jet A, con un punto de congelación de  $-40^{\circ}\text{C}$  y que solo se puede encontrar en Norteamérica.
- El combustible Jet A-1, que posee un punto de congelación de  $-47^{\circ}\text{C}$ , y que se encuentra en todo el resto del mundo, la característica del punto de congelación lo vuelve particularmente idóneo en trayectos muy largos, en lugares australes o con mucho frío y por supuesto, en invierno.

Algunos países tienen sus propias especificaciones para el combustible jet, pero son prácticamente idénticas a las emitidas por ASTM.

Los sistemas de propulsión de las aeronaves están recorridos por un flujo gaseoso que se denomina continuo, por lo que a diferencia de los motores de combustión interna, las características químicas relativas al autoencendido carecen de interés.

Las propiedades determinantes de un carburante para reactores están relacionadas con la composición de la mezcla aire-carburante, la radiación de llama y la formación de residuos carbonosos.

Para que la combustión se desarrolle satisfactoriamente, el queroseno debe mezclarse de manera ideal con el aire, por lo que propiedades como la volatilidad, la tensión superficial y la viscosidad tienen gran importancia para conseguir una correcta pulverización y penetración del chorro.

Por otra parte, los combustibles de los reactores circulan a través de zonas calientes del avión pudiendo alcanzar temperaturas elevadas, por lo que es importante controlar la estabilidad térmica, especialmente en vuelos supersónicos en los que el calentamiento cinético provoca una elevación de la temperatura de los depósitos.

### 2.2.2 Combustibles de origen biológico

Los combustibles de origen orgánico, como su nombre lo indica, provienen de plantas, frutas, vegetales, etc., y de acuerdo a la materia prima que es utilizada para su obtención y de los procedimientos por los que se obtiene, se pueden distinguir entre biocombustibles de primera, segunda o tercera generación.

Los biocombustibles de **primera generación** son obtenidos a partir de cultivos alimenticios o forrajeros tradicionales. El etanol se obtiene a partir de cultivos cuyo contenido principal es el azúcar, como caña de azúcar, maíz, remolacha azucarera, sorgo y yuca. Y el biodiesel se obtiene a partir de cultivos cuyo contenido principal es el aceite, como la colza, la palma aceitera, el babasú, el coco, el ricino o el aguacate.

Los biocombustibles de **segunda generación** son los denominados ligno-celulósicos, en los cuales no sólo se aprovecha la semilla sino toda la planta. Permiten aprovechar residuos forestales y también cultivos tradicionales. Este tipo de materiales también se pueden utilizar para sinterizar BTL. Además, permiten la explotación de otro tipo de cultivos que prosperan en terrenos áridos que no son aptos para cultivos de alimentación, como la jatropha o la camelina. Otra fuente para este tipo de biocombustibles son los desechos de la industria alimenticia y del sector servicios, como las grasas vegetales y los aceites de fritura usados. Incluso es posible el uso de residuos orgánicos urbanos.

Los biocombustibles de **tercera generación** son los biocombustibles tecnológicamente más avanzados. Su materia prima son algas unicelulares de las que obtiene biodiesel mediante sintetización.

Es importante mencionar que los combustibles que se obtienen a base de elementos orgánicos tienen un balance de energía igual a cero en lo que respecta a su uso, sin considerar los procesos para la obtención, ya que las plantas que son las más usadas para producir este tipo de biocombustibles poseen una cantidad determinada de precursores del CO<sub>2</sub>. Las plantas procesan y almacenan de diferentes formas el CO<sub>2</sub>, una vez que se realizan los procesos de obtención de los biocombustibles el carbono y el hidrogeno se convierten en combustible, una vez que el combustible que contiene los precursores se combina en una reacción exotérmica con el aire, el CO<sub>2</sub> producto de la combustión, vuelve a la atmósfera de donde la planta lo ha tomado previamente para su alimentación y supervivencia. Generando un ciclo que no produce desperdicios o que, en otras palabras, es completamente renovable, a diferencia de los combustibles fósiles que no están en la atmósfera sino que están atrapados en el interior de rocas debajo de la tierra y que la naturaleza ha atrapado a lo largo de muchos siglos dentro de ella, una vez que la actividad humana los descubre, perfora y toma esta materia que ya contiene carbono, hidrogeno, etc. pero que fue encapsulado hace miles de años, lo refina (ver figura 2.4) y lo usa, con este proceso está aportando nuevo CO<sub>2</sub> que ya se había apartado de manera natural de nuestra atmósfera y lo está devolviendo de nuevo a nuestra condición actual, "empeorando la situación " ecológica principalmente el aire que respiramos y, por supuesto, en los océanos.

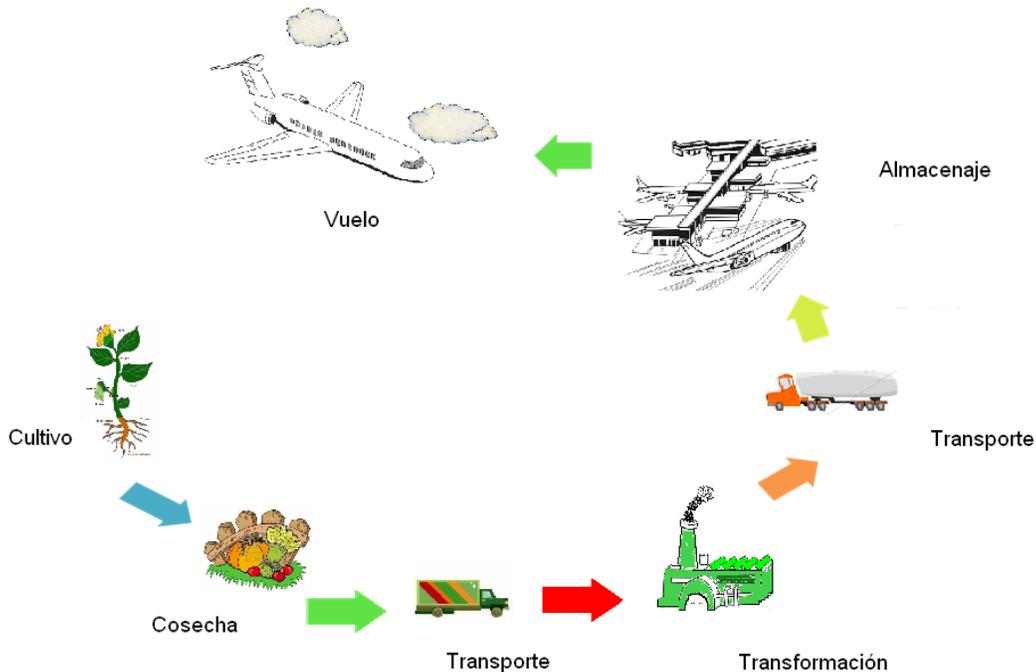


Figura 2.2. Ciclo de vida de los biocombustibles. Como se puede observar el cultivo toma el O<sub>2</sub> y el Carbono del ambiente, después se cosecha se refina y se transporta hasta los aeropuertos. Una vez en que se encuentra en la cámara de combustión del avión éstos elementos, se devuelven a la atmósfera a través del ciclo de Bryton. Estos ya devueltos a la atmósfera la planta los vuelva a tomar nuevamente y se cierre el ciclo.

## 2.2 LOS MEZCLADORES ESTÁTICOS

### BREVE HISTORIA

Los mezcladores estáticos o también llamados mezcladores inmóviles son aquellos que no necesitan de algún elemento mecánico externo para llevar a cabo el mezclado, únicamente se valen de las propiedades del flujo como son la presión y la velocidad para lograrlo. Han cobrado gran importancia en la industria, siendo que fue para satisfacer sus necesidades la razón de su existencia, y se ha extendido tanto su uso, que se ha llegado al grado de que se han estandarizado dentro de la misma.

Sin embargo el desarrollo tecnológico ha ido proponiendo a lo largo de estos últimos años nuevos diseños y nuevas aplicaciones, ya que se han adaptado a la industria en diversos procesos, incluso se ha considerado una excelente alternativa para los mezcladores convencionales que funcionan a través de un agitador, mostrando un rendimiento superior, incluso en algunas ocasiones, a un menor costo que el que presentan los mezcladores convencionales y esto es debido a que no poseen ningún tipo de partes móviles, empaques costosos o accesorios que provoquen un incremento en su costo de producción o mantenimiento. Los mezcladores estáticos también proveen de un mejor control de la velocidad de disolución de las corrientes de alimentación con un mínimo de tiempo de residencia<sup>1</sup>. A continuación se muestran en la tabla 1 algunas ventajas de los mezcladores estáticos sobre los mezcladores convencionales.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los mezcladores.

<b>Mezcladores estáticos</b>	<b>Mezcladores Convencionales</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requieren de poco espacio.</li> <li>• Bajo costo del equipo.</li> <li>• No se requiere algún poder adicional. Inercial.</li> <li>• No hay partes móviles</li> <li>• Pequeñas bridas para sellar.</li> <li>• Su periodo de mezclado es corto.</li> <li>• Se aproxima a flujo de pistón.</li> <li>• Buen mezclado en bajas velocidades.</li> <li>• Rápidos cambios de grado.</li> <li>• Auto-limpieza, mezcladores intercambiables o mezcladores desechables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Gran requerimiento de espacio.</li> <li>➤ Elevado costo del equipo.</li> <li>➤ Elevado consumo de energía.</li> <li>➤ Se debe accionar y sellar.</li> <li>➤ Bridas más pequeñas y más difíciles de sellar.</li> <li>➤ Tiempos largos de mezclado.</li> <li>➤ Distribución exponencial de tiempos de mezclado.</li> <li>➤ Las altas velocidades cortantes pueden dañar los muy frágiles materiales.</li> <li>➤ Los cambios del producto de mezclado pueden generar desgaste.</li> <li>➤ Recipientes grandes que limpiar</li> </ul>

<sup>1</sup> Lapso de tiempo durante el cual el fluido atraviesa el sistema de interés.

Los mezcladores estáticos no se empezaron a usar de manera generalizada en la industria sino hasta la década de los años 70s del siglo pasado, sin embargo la patente tiene mucho más tiempo de haberse registrado, por ejemplo en 1870 existe una patente que describe una especie de mezclador estático multicapa que se usó para mezclar aire con un combustible gaseoso.

Existe una patente francesa, la cual fue una de las primeras en ese país, que estaba diseñada a través de componentes helicoidales, para inducir el mezclado dentro de un tubo.

Gran parte de la industria petroquímica ha usado sus propios diseños internamente en los años anteriores a su disponibilidad comercial. Ahora existen alrededor de 2500 patentes en los Estados Unidos y el triple de artículos relacionados a esta tecnología, así como más de 30 modelos comerciales. Sin embargo, en nuestro país el material documental es muy escaso.

El proceso de diseño de un mezclador es básicamente el mismo, así como su instalación. Se compone de un elemento que se puede instalar en cualquier tubería, columnas o reactores, el propósito principal del elemento es redistribuir el fluido en su dirección transversal al flujo principal, tanto en direcciones radiales como tangenciales, el éxito de este dispositivo está en función de su diseño y del número de elementos que pueda tener.

Los varios tipos de mezcladores estáticos se comportan de maneras muy distintas y su clasificación ha sido propuesta con base en la geometría de sus elementos.

Los mezcladores estáticos comerciales se pueden dividir en cinco principales familias

- Abiertos de forma helicoidal
- Abiertos con hojas
- Platos corrugados
- Diseños multicapas
- Cerrados con hoyos y canales

Pero existen diversos autores que clasifican los mezcladores estáticos en diversas ramas, principalmente con base a sus características más significativas, otra de las más aceptadas es la siguiente clasificación de acuerdo a la función que realizan\*:

- Mezclado de fluidos miscibles.
- Mezclado multi-fásico.
- Mezclado axial y con transferencia de calor.

El primero es el grupo más común de toda la industria, ya sea uno o más líquidos miscibles, son mezclados, o también se puede dar el caso de que una reacción química se lleve a cabo para eliminar ciertos gradientes de concentración que surgirán si la reacción ocurre en una tubería vacía.

Los mezcladores estáticos son útiles, siempre y cuando el mezclado radial y tangencial y la fuerza de reacción de empuje a los alrededores sea la deseada. También reemplazan y complementan simultáneamente los sistemas de agitación. Sin embargo, su uso está limitado a la mezcla de fluidos que difieren substancialmente en sus viscosidades.

\* Orellana Gajardo Elís Gerardo. *Calculo computacional de la dinámica de fluidos de un mezclador a través del software "fluent"*. Facultad de Ingeniería. Universidad del Bio-Bio. Chile. 2006

Es relevante mencionar que también existen tres importantes aplicaciones en las cuales este grupo se adapta de manera especial y que no se puede dejar de mencionar:

- Mezcla de gases en flujo laminar o turbulento
- Sistemas inmiscibles
- Transferencia de calor:

✓ Mezcla de gases en flujo tanto laminar como turbulento.

Homogeneización en flujo laminar: Los elementos que más comúnmente se mezclan en este tipo de mezcladores son aditivos como plásticos y lubricantes internos, colorantes, así como plásticos y líquidos. Jurkowski y Olkhov<sup>2</sup> estudiaron cómo el mezclado de polímeros, que estaban muy cercanos a ser inmiscibles, pudieron ser mejorados usando mezcladores estáticos.

También pueden ser usados para procesar pegamentos y otra serie de elementos relacionados con esta industria, principalmente resinas epóxicas de dos fases. La industria de los alimentos es sin embargo una de las más interesadas en usar estos sistemas, pero casi no está documentado debido a que son adaptaciones que se generan dentro de las empresas, los productos que se mezclan son típicamente de muy alta viscosidad y de naturaleza no newtoniana por lo cual son procesados en su gran mayoría dentro de un régimen laminar, la industria láctea, de aceites, ácidos, de bebidas, salsas, fórmulas de comida comprimida, etc. Los mezcladores estáticos también son buenos para mezclar gases y combustibles líquidos pre-vaporizados anteriores a una reacción. De hecho ésta fue una de las primeras aplicaciones de este tipo de dispositivos. A pesar de las altas difusividades de los gases, una mezcla no generará inmediatamente homogeneidad y tal vez un mezclado adicional será necesario para obtener posteriormente una buena combustión.

Dentro de esta clasificación es importante mencionar que también son ampliamente usados para mezclado de corrientes pre- reactivas y para mejorar el rendimiento de las reacciones posteriores a ésta. Los mezcladores estáticos también han sido reportados por tener gran potencial para reducir las emisiones en la combustión.\*

“La potabilización del agua y el tratamiento de lodos están incluidos en esta parte. El color que el agua adquiere en condiciones estacionarias es causado por partículas suspendidas dentro de los fluidos, pero que se encuentra en concentraciones muy bajas. Los mezcladores estáticos se usan también para dispersar un agente floculante, éste agente se encarga de separar una sustancia de otra, como el alginato, el cuál es una sustancia obtenida de las algas para la clarificación del agua, como un primer proceso de clarificación”.

“Mezclado con reacción: Las aplicaciones de los mezcladores estáticos para reacciones de polimerización han sido propuestas durante mucho tiempo, pero relativamente muy pocas han salido a la luz para implementarse a una escala industrial”.

\*R.K. Thakur, Ch Vial, K.D.P.Nigam, E.B. Nauman, y G. Djelveh Static Mixers a review 2003. Review Paper Institute of Chemical Engineers. USA Pp 787-821

## ✓ Sistemas inmiscibles

Este grupo de mezcladores incluye entre otros, procesos para pasar de una fase a otra o para incrementar el coeficiente de transferencia de masa entre las fases. Las diversas aplicaciones incluyen sistemas líquido-líquido, gas-líquido y sólido-líquido.

En los sistemas de líquido-líquido los mezcladores estáticos son muy adecuados para los sistemas de extracción concurrentes. En esta rama compiten con los sistemas de agitación mecánica convencional, tal como rotando columnas de disco o tanques agitados en serie. Su mayor ventaja es su resistencia al crecimiento de la corriente, aun cuando las fases tienen densidad similar. El objetivo es formar caídas que son suficientemente pequeñas para proveer una alta área interfacial pero suficientemente largas para evitar la formación de una emulsión y los mezcladores estáticos son bastante adecuados para este propósito. Baker<sup>3</sup> reportó una aplicación industrial interesante, la cual fue la extracción de sulfuro de hidrógeno de fracciones de petróleo usando dietanolamina.\*

Los mezcladores estáticos también pueden usarse, en los ya conocidos en el medio, como contra corriente para extracción de líquido-líquido. “Jancic estudió su aplicación para diversos sistemas: queroseno- agua, butanol- ácido succídico-agua, tolueno-atono-agua y carbón tetraclorido propionico, ácido-agua. Ellos concluyeron que insertando mezcladores estáticos se reduce la coalescencia y se requiere menor tiempo de residencia que en los dispositivos convencionales incluso con altas velocidades de flujo”.

## ✓ Transferencia de calor

Las aplicaciones de los mezcladores estáticos en la mejora de la transferencia de calor pueden ser divididos principalmente en tres: homogeneización térmica, transferencia de calor en intercambiadores de calor y la última combina transferencia de calor con reacciones químicas.

La homogeneización térmica es el único mecanismo de difusión que se usa en dirección radial dentro de un tubo sin mezclador en flujo con régimen laminar. Una gran variedad de elementos inmóviles han sido usados para promover flujo radial y éstos para reducir gradientes de temperatura radial en procesos de fluidos. Este sistema provee a la mecánica un amplio abanico de oportunidades aún sin resolver.

**2.2.1 Selección adecuada de un mezclador\****Parámetros clave para la selección de un mezclador estático*

Ahora en esta sección se definirán los principales elementos que se deben considerar para la correcta elección de un mezclador estático, estos parámetros dependen exclusivamente de las aplicaciones específicas a las cuales se someterá dicho dispositivo, sin embargo la mayoría de los autores consideran un parámetro que es común en la correcta selección de éste, el implemento de este tipo de dispositivos siempre traerá una gran caída de presión que una tubería que este abierta ya sea del mismo diámetro o no, es decir una tubería que no tenga este dispositivo.

\* F. Theron, N. Le Sauze, *Comparison between three static mixers for emulsification in turbulent flow*, 2011 Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse 2011.

<sup>3</sup>R.K. Thakur, Ch Vial, K.D.P.Nigam, E.B. Nauman, y G. Djelveh Static Mixers a review 2003. Review Paper Institute of Chemical Engineers. USA Pp 787-821

El patrón de selección más importante y por el cual se puede empezar es la **caída de presión** que generará.

Para flujos iso-viscométricos las correlaciones están disponibles para modelos comerciales, pero las mediciones hechas en planta tal vez serán necesarias cuando se trate con sistemas de reología compleja o desconocida, sistemas reactivos o multifásicos. La medición de esta propiedad es relativamente sencilla de obtener. La ecuación básica para fluidos homogéneos isotérmicos incompresibles y newtonianos en un tubo circular es:

$$\Delta P = \frac{2f\rho u^2}{D} L_e = \frac{2f\rho u^2}{D} N L_e \dots\dots\dots(\text{Ec. 1})^4$$

Donde:

*N*- Número de elementos que se mezclarán

*D*- Diámetro

*L<sub>e</sub>*- longitud del elemento

*ρ*-densidad

*f* – Función del número de Reynolds que se determina experimentalmente para un mezclador en particular

*u* - es la velocidad superficial

*ΔP*- Diferencia de presión

La ecuación número 1 se aplica para tuberías sin elementos mezcladores y con  $f = \frac{Re}{16}$  para flujo laminar y turbulento con  $f=0.079Re^{-0.25}$ . Para un número de Reynolds dado, el factor de fricción será mayor para una tubería con implementos que para una tubería sin ellos y la transición de flujo laminar a turbulento ocurrirá en un Reynolds mucho más bajo que el valor tradicional de 2100\*.

Caída de presión en flujo laminar

Como una regla de oro, los fluidos que poseen viscosidades más altas que 0.1 Pa estarán en flujo laminar bajo condiciones típicas de los procesos de la industria, aquellos que exhiban un pronunciado comportamiento no newtoniano o visco-elástico.

Para fluidos dentro de tuberías sin elementos mezcladores, el comportamiento de  $Re < 100$  es generalmente laminar. Para  $Re < 2100$  el flujo es usualmente laminar pero pequeñas alteraciones pueden llevar a iniciar un comportamiento oscilatorio. Para  $Re > 2100$  el flujo es inestable si se supone turbulencia y será no conservativo para  $500 < Re < 2100$  cuando el mezclado o la transferencia de calor estén involucradas.

En la literatura se encontró que el método más simple para predecir una caída de presión es usar el factor  $Z^*$  en la ecuación previa. Algunos proveedores de mezcladores estáticos proporcionan datos de esta forma y los valores de  $Z$  están disponibles en la literatura para varios diseños comerciales.

Los diferentes tipos de correlación se emplean generalmente para representar caídas de presión generados por mezcladores estáticos. Una primera aproximación consiste en comparar las caídas de presión generadas por mezcladores estáticos ( $\Delta P_{CM}$ ) e identificando caídas de presión con flujo similar a través de una tubería

\*R.K. Thakur, Ch Vial, K.D.P.Nigam, E.B. Nauman, y G. Djelveh Static Mixers a review 2003. Review Paper Institute of Chemical Engineers. USA Pp 787-821

sin mezclador estático con el mismo diámetro identificado mediante  $\Delta P_{SM}$  a través del factor Z definido por la correlación siguiente:

$$Z = \frac{\Delta P_{CM}}{\Delta P_{SM}}$$

$\Delta P_{CM}$ - Cambio de la presión en la tubería con mezclador

$\Delta P_{SM}$ - Cambio de la presión en la tubería sin mezclador

A modo de ejemplo se presenta a continuación la tabla 3, donde se puede observar un resumen de algunos factores Z, el tipo y el fabricante. Aquí también se incluye el cálculo del mezclador que se ha diseñado en el CCADET de manera comparativa.

Tabla 2. Factores de fricción para diferentes tipos de mezcladores incluyendo el diseño en este trabajo.

Autor	Características del Mezclador	Correlación	Z	Rango del Reynolds
Pahl and Muschelknautz (1979)	D = 50 mm Le/D = 1,5 ne = 5; 7; 9	Z = 10-100	10-100	Re ≤ 50
Pahl and Muschelknautz (1980, 1982)		Z = 10-60 Ne = 12 φd = 2,	10-60	Re ≤ 50 1000 Re >
Alloca (1982)	D = 50 mm Le/D = 1 ne = 5, 7, 11 ε = 0.91	Ne Re = 1237 (Sulzer: Ne Re = 1200)		
Heywood et al.(1984)	D = 25 mm Le/D = 1.8 ne = 4	Z = 18.1		Re = 10^4 Re 1.8 < Re < 20
Bohnet et al. (1990)	D = 50 mm	$\zeta=2.Ne = \frac{1740.8}{Re} + 7.68$	230	20 < Re < 850... 2150 Re<4000
Shah and Kale (1991, 1992)	D = 26; 54 mm Le/D = 1.5 ne=24 ε=0.87	$\frac{350}{Re} + \frac{5.13}{Re^{0.58}}$		Rei < 10 (≈Re < 10)
Li et al. (1996,1997)	D = 16 mm Le/D = 1.25 ne=6,8,12 ε=0.84	f/2 = 184/Re + 0.4 f/2 = 6/Re0.25 f/2=Re/Re0.8	23 152	Re<15 15<Re<1000
Streiff et al. (1999)		Ne=1200/Re +5	z=38	Laminar: Reh <20 Turbulent: Reh >2300 Re<20
Yang and Park (2004)	D = 40 mm Le/D = 1 ne=4,8,12 ε=0.84	f/2= 8.55/Re1.61		Re<20
Rama Rao et al.(2007)	D = 15.75 mm Le/D = 1 ne=6,8,10 ε=0.892; 0.833	D=15.75 mm Ne=1290/Re + 10.9 D=41.78mm Ne= 823/Re + 7.85		Laminar: Z=40 Laminar: Z=26
Phal and Muschelknautz (1979)	D = 50 mm Le/D = 1 ne=2	Z= 65-100	65-100	Re≤50
CCADET	D=10 mm Le/D	$Z = \frac{3397}{3726} - 9.12$		14066<Re<93327

F. Theron, N. Le Sauze, *Comparison between three static mixers for emulsification in turbulent flow*, 2011 Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse 2011.

### 2.2.2 Modelos comerciales de mezcladores estáticos

Actualmente, en el mercado existe un extenso número de modelos de mezcladores estáticos que se adaptan prácticamente a cualquier necesidad. Como ya se ha mencionado antes, la industria empezó a usar estos dispositivos hace casi ya un siglo, pero con el fin de complementar este trabajo, se ha agregado este apartado que le da una idea al lector de lo que puede encontrar referente a estos dispositivos y disponible de manera casi inmediata.

Sus usos son muy diversos, ya sea para fluidos miscibles o muy viscosos, la configuración cambia radicalmente, todo esto en virtud evidentemente de las necesidades del cliente y es elemental para obtener los mejores resultados. En general se pueden clasificar de acuerdo a sus propiedades físicas, o su uso pero como este trabajo se refiere en mayor parte al diseño, entonces se clasificarán de acuerdo a éste.

Los mezcladores Kenics y los mezcladores estáticos Lpd (baja caída de presión) están clasificados como mezcladores  $2^N$  porque ellos dividen el flujo entrante en **dos** diferentes flujos como se ilustra en la tabla 3. El mezclador "ISG" tiene usualmente **cuatro** canales y por lo tanto está clasificado como un mezclador  $4^N$  según sea la variante, es importante mencionar que la más alta eficiencia teórica se da debido al aumento de la caída de presión y no a la cantidad de canales que posee.

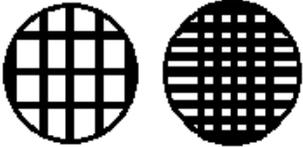
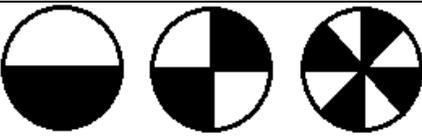
Los diseños multicapas tal como el SMX y el SMV tienen aún más canales para el flujo. Godfrey (\* Static mixers in the proces industries, Harnby Edwards 2000) tabuló la relación entre el número de canales y el número de elementos para algunos mezcladores estáticos de uso comercial. Edwards consideró 3 diferentes tipos de flujo: corte sencillo, extensión uniaxial y extensión planar.

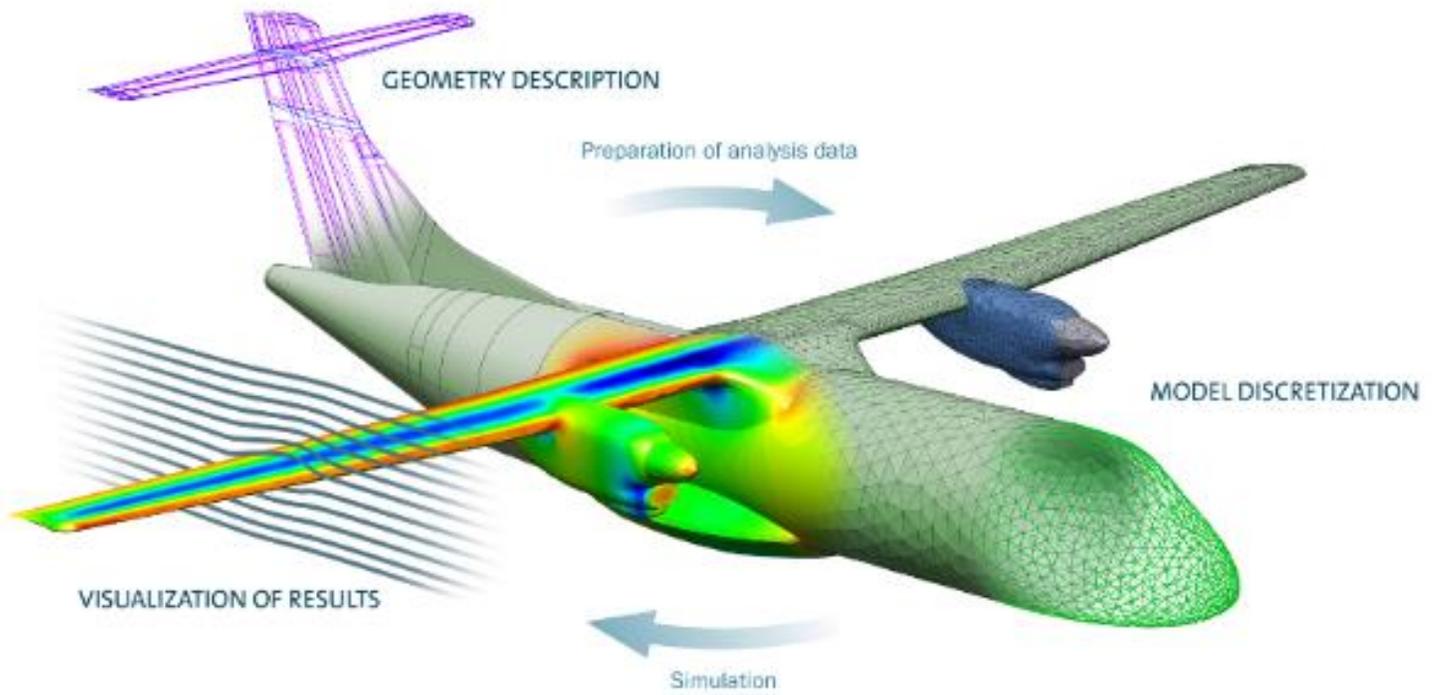
Edwards (en su artículo static mixers) observó que los flujos desarrollados son ligeramente más efectivos para obtener un mezclado distributivo en bajas tensiones de flujos de corte simple, y se vuelve mucho más efectivo cuando la tensión es larga, debido a una desfavorable orientación de los canales que ocurren durante un corte del flujo simple. Sin embargo, Edwards concluyó que el corte simple del flujo es más efectivo en niveles de esfuerzo intermedio especialmente con fluidos no newtonianos. En flujo laminar profundo, es decir en flujo de arrastre, los patrones de flujo alrededor de algún elemento del mezclador estático son completamente determinantes. A números de Reynolds del orden de cientos, las inestabilidades del flujo conducen a una caída de las oscilaciones de las corrientes.

En lo que se refiere a flujos complejos, existen varias formas de caracterizarlos. Algunas medidas prácticas incluyen el grado de finalización de una reacción química rápida, los tiempos de residencia y los coeficientes de transferencia de calor. Estas medidas prácticas expresadas como correlaciones de datos experimentales son, por mucho lo más valioso del proceso de ingeniería. Sin embargo, las técnicas de caracterización matemática se volverán más útiles en CFD (Computer Flow Design) y llega a ser mejor desarrollado. Los métodos de mapeo han probado ser útiles. La distribución de los tiempos de residencia pueden ser determinados por medio de los resultados del CFD, aunque se advierte al lector de que los cálculos deben ser ponderados por el cambio en el flujo másico o volumétrico del área. Además, algunos códigos CFD exhiben detalles numéricos que pueden ser importantes en los cálculos detallados, particularmente aquellos que tienen que ver con reacciones químicas.

\*R.K. Thakur, Ch Vial, K.D.P.Nigam, E.B. Nauman, y G. Djelveh Static Mixers a review 2003. Review Paper Institute of Chemical Engineers. USA Pp 787-821

Tabla 3. Diferentes fabricantes de mezcladores estáticos con una imagen de su modelo característico

Compañía fabricante	Modelo característico	País Fabricante	Mezclador	Vista seccionada de como realiza los cortes cada mezclador
Westfall	3050 Ultralow headloss otros modelos 2900, 2850, 28000	USA		
Sulzer	Tipo SMX, SMV, SMI	Winterthur Switzerland		
Koflow	Serie 275, Serie 276	Illinois Chicago	No disponible	
Kenics	KM, KMS, HEVMixers	Dayton Ohio		
Komax	Serie A, Serie M	Huntington beach California		
TPX	TPX static inline mixer	Gatwick United Kingdom		
Euromixer Primix ISG	Modelos varios no especificados	UK, Netherlands	No disponible	



*“Hacer las cosas lo más simple posible pero no más sencillo”*  
*Albert Einstein*

## CAPÍTULO 3

## METODOLOGÍA

---

Lo que esencialmente se expone en esta parte del trabajo consiste en sentar las bases para mezclar dos corrientes de fluidos, una de un combustible fósil (queroseno) y otra de un combustible de origen biológico (bio-queroseno), dentro de una tubería para obtener una mezcla homogénea de un combustible denominado comercialmente bio-turbosina, esto se lleva a cabo a través de un mezclador estático, el cual será un prototipo que se diseñará y construirá en los laboratorios del CCADET. Por medio de un estudio minucioso apoyado en la mecánica de fluidos, y el diseño a través de herramientas CAD, se proponen varios modelos, que se simularán con las condiciones de operación establecidas y se seleccionará el que tenga mejor desempeño en dichas simulaciones, pero también se analizará la viabilidad de su construcción.

### 3.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Las propiedades de los fluidos ya se han mencionado en un apartado anterior por lo cual en esta sección solo se mostrará la tabla 4 que nos indica dichas propiedades. Los datos del queroseno son teóricos obtenidos por ASA y los del bio-queroseno fueron obtenidos del proveedor de ASA en E.E.U.U.

Tabla 4. Propiedades del queroseno y el bio-queroseno.

Propiedad	Queroseno	Bio-queroseno
$\rho$	0.7-0.81g/ml = 740 kg/m <sup>3</sup>	770-830 kg/m <sup>3</sup>
Color	Amarillo a negro	Amarillo
Temperatura de ebullición	150-315°C	190-275°C
Temperatura de congelación	-47°C	-38°C
Contenido de agua	47.6mg/kg	278.9 mg/kg
Poder Calorífico Superior	47.4 MJ/kg	37.65 MJ/kg
Viscosidad	@ -20°C = 2.29mm <sup>2</sup> /s	@ 40°C = 2.27mm <sup>2</sup> /s

Con el fin de asegurar que las propiedades de los fluidos no representarán inconvenientes en el sistema de mezclado, se realizaron pruebas a los combustibles proporcionados por ASA.



*Figura 3.1: Muestras de los combustibles que proporcionó ASA.*

Los ensayos realizados sobre las muestras obtenidas se han llevado a cabo en el Laboratorio de Ingeniería de Procesos del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM. El criterio para decidir qué ensayos concretos se realizaban sobre cada muestra ha tenido en cuenta, tanto el instrumental del que se dispone en el citado laboratorio como de la cantidad de combustible proporcionado.



*Balanza Electrónica*



*Báscula*

*Figura 3.2. Instrumental.*

Las propiedades de los combustibles que han sido medidas son:

- Densidad a temperatura ambiente
- Densidad con incrementos de temperatura de 0° - 40° [C].

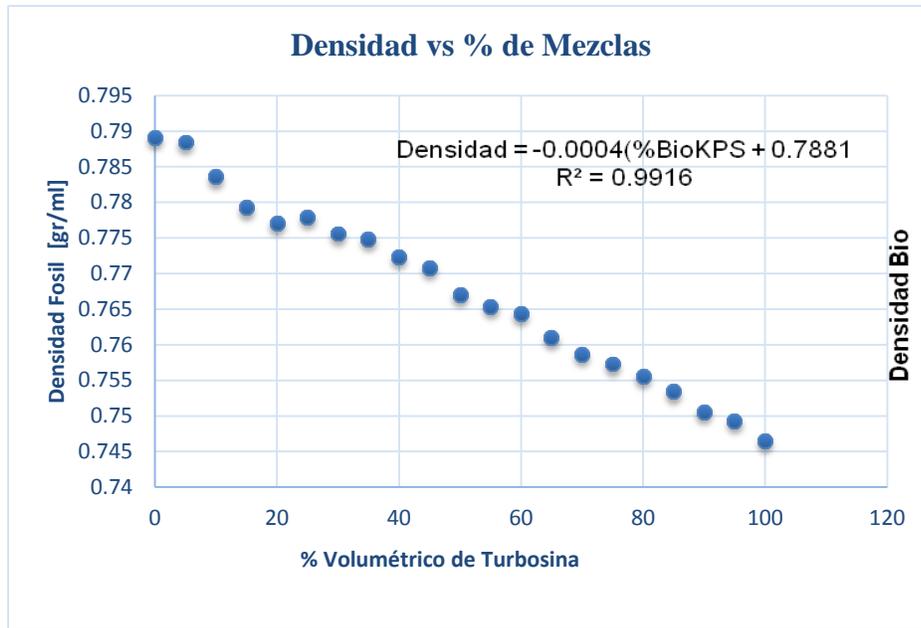
Densidad a temperatura ambiente

Dado que el análisis detallado es extenso, solo se muestra un resumen en la tabla 5, con los resultados de dichas pruebas que contemplan el comportamiento de la densidad para las mezclas en diferentes proporciones y los resultados obtenidos. El procedimiento fue simple, se ha medido el peso de combustible y se ha obtenido el volumen que este ocupa, y usando la definición de densidad se han obtenido las mediciones a temperatura ambiente y presión atmosférica en la Ciudad de México.

Tabla 5. Densidad de las diferentes mezclas.

<i>%Volumen Bio- queroseno</i>	<i>Densidad gr/ml</i>	<i>Des Std gr/ml</i>
100	0.7890	0.000228
95	0.7884	0.000384708
90	0.78356	0.001052616
85	0.780866667	0.001301281
80	0.778733333	0.00011547
75	0.77788	0.000843801
70	0.7767	0.000739369
65	0.7748	0.000787401
60	0.77224	0.000684105
55	0.7708	0.000489898
50	0.7676	0.000489898
45	0.76532	0.001063955
40	0.76432	0.000438178
35	0.7624	0.00034641
30	0.75864	0.000554977
25	0.7579	0.00034641
20	0.75548	0.000303315
15	0.7534	0.00034641
10	0.75115	0.000412311
5	0.74924	0.000219089
0	0.74644	0.000669328

Como se puede observar en la tabla 5 la densidad en cada una de las diferentes mezclas mostró un cambio casi nulo en términos prácticos, ya que se observan variaciones de .01 gr/ml. En la columna de la extrema derecha se tiene la desviación estándar, que indica lo mucho o poco que se separan los datos unos de otros. Durante el experimento que se realizó en el laboratorio se pudo comprobar, gracias a estos resultados, que la desviación estándar de la mezcla, en lo que se refiere al cambio de densidad, es irrelevante. Aunque parece ser una variación pequeña de densidad es suficiente para evitar el mezclado de los fluidos en una tubería de manera inercial, por lo que se refuerza la necesidad de utilizar el método de mezcla usando un elemento adicional.



Gráfica 2. Gráfica densidad vs % volumétrico.

En la gráfica 2 se puede observar el modelo de aproximación cuadrática que se ha obtenido de los datos contenidos en la Tabla 5. Se puede observar el comportamiento y concluir que este es prácticamente lineal.

De los datos obtenidos se concluye que la densidad de las muestras proporcionadas son:

- Turbosina JET A1

$$\rho = 0.78908 \text{ g/cm}^3$$

- Bioturbosina

$$\rho = 0.74644 \text{ g/cm}^3$$

El coeficiente de correlación nos arroja un valor de 0.9958 que es muy cercano a 1 indicándonos que la variación en esta propiedad fundamental no tendrá importancia en la definición de los procesos a los cuales será sometido.

Densidad con incrementos de temperatura de 0° - 40° [C].

La sustancia a ensayar fue una mezcla de 50% turbosina con 50% bio-turbosina. Estas pruebas fueron a temperaturas controladas de 0 hasta 40 [°C]. El equipo utilizado es una balanza electrónica con su respectivo instrumental para dicho fin, un medidor Oyster (EXTECH modelo 341350A) para la medición de temperatura y un agitador con calentador.



Figura 3.3. Instrumental (izquierda), colocación de las muestras (derecha).



Figura 3.4. Medidor Oyster para Temperaturas.

Para calcular la densidad de la mezcla de combustible se utiliza la definición:

$$\rho = m / V$$

Donde el peso seco utilizado (la pesa azul) sería en todas las pruebas:

$$P_s = 12.331 \text{ gr}$$

El correspondiente al peso líquido ( $P_1$ ) es el obtenido en cada uno de nuestras muestras.

Así la masa requerida estará dada por:

$$m = P_s \cdot P_1$$

El volumen de la probeta es de  $5 \text{ cm}^3$ .

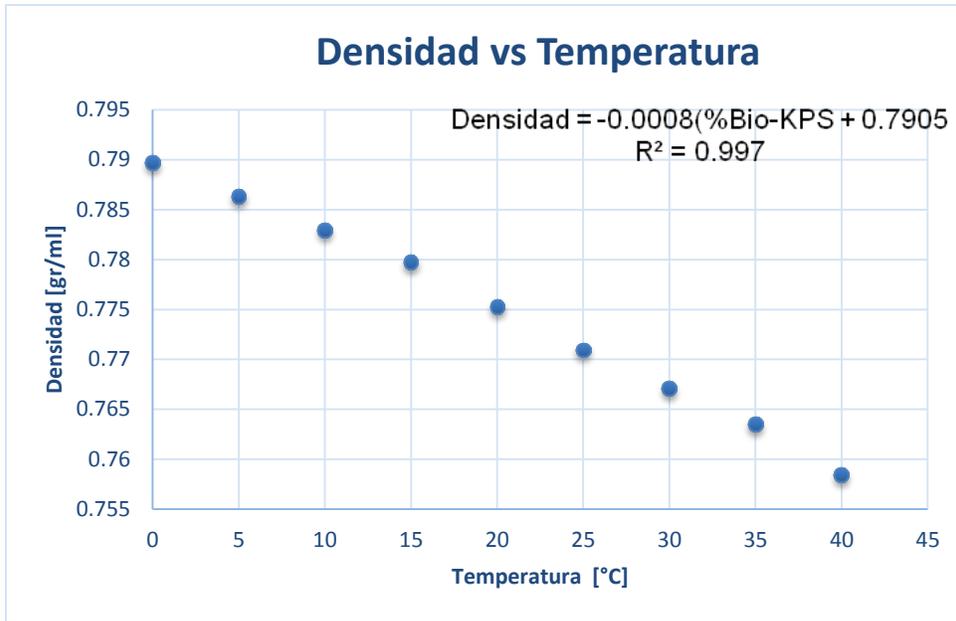
En la siguiente tabla se observan las diferentes pruebas con incrementos de temperaturas correspondientes, para la mezcla 50%-50% kps-biokps.

Tabla 6. Densidad de cada prueba y desviación estándar.

<b>Temperatura</b> [°C ]	<b>%</b> Turbosina-Bio-Turbosina	<b>Prueba 1</b> $\rho$ (g)/cm <sup>3</sup>	<b>Prueba 2</b> $\rho$ (g)/cm <sup>3</sup>	<b>Prueba 3</b> $\rho$ (g)/cm <sup>3</sup>	<b>DesvEst</b>
0	50-50	0.79	0.7906	0.7884	0.00113725
5	50-50	0.786	0.7862	0.7868	0.00041633
10	50-50	0.7826	0.783	0.7832	0.00030551
15	50-50	0.7794	0.7796	0.7802	0.00041633
20	50-50	0.7752	0.7752	0.7754	0.00011547
25	50-50	0.7712	0.7712	0.7704	0.00046188
30	50-50	0.7672	0.7672	0.7668	0.00023094
35	50-50	0.7634	0.7636	-	0.00014142
40	50-50	0.7584	-	-	0

Tabla 7. Densidades Finales

<b>Temperatura</b> [°C ]	<b><math>\rho</math> Promedio</b> $\rho$ (g)/cm <sup>3</sup>
0	0.789666667
5	0.786333333
10	0.782933333
15	0.779733333
20	0.775266667
25	0.770933333
30	0.767066667
35	0.7635
40	0.7584



Grafica 3.  
Comportamiento de la densidad vs temperatura.

La densidad que fue usada en las simulaciones computacionales no fue la obtenida en los experimentos antes mencionados, ya que la densidad varía con respecto al lote de combustible y se ha usado el extremo en ambos para asegurar los resultados, no así la viscosidad cinemática, el calor específico y la conductividad térmica, las cuales fueron consultadas en la literatura dado que no se tuvo acceso a esos datos por parte del personal que suministro los combustibles y tampoco se realizaron pruebas de laboratorio. A continuación los datos utilizados:

*KPS*

$$\rho = 720 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0.003 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$C_p = 2010 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$k = 0.15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$\rho$  – densidad

$\mu$  – viscosidad cinemática

$C_p$  – Calor específico

$k$  – conductividad térmica

Especificaciones de la tubería:

Tubería 4 in cedula 40

$$\Phi_{\text{interior}} = 108 \text{ mm}$$

*Bio-KPS*

$$\rho = 810 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0.004 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$C_p = 2430 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$k = 0.16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$\Phi_{\text{exterior}} = 114 \text{ mm}$$

Las condiciones iniciales de operación fueron las siguientes:

$$\dot{Q} = 300 \text{ G/min}$$

$$T = 25^\circ\text{C}$$

$$P = P_{\text{atm}} = 101.2 \text{ kPa}$$

### 3.2 ESQUEMA COMPUTACIONAL

---

La técnica de Análisis por Elemento Finito (AEF) es un método numérico que se basa en dividir la geometría que se quiere resolver, asociado a un espacio físico determinado, en pequeños elementos en los cuales se resuelven las ecuaciones diferenciales correspondientes a un campo en forma discreta, teniendo en cuenta las propiedades físicas de los materiales empleados, los elementos del entorno, las condiciones de frontera y las fuentes generadoras de campo, etc. La resolución de estas ecuaciones de forma discreta se realiza de forma iterativa hasta que se alcanza convergencia en la solución.

Las herramientas (*software*) que permiten realizar este proceso de forma eficiente y cómoda se denominan herramientas de análisis por elemento finito, o simplemente herramientas de elemento finito (HEF).

Existen HEF que permiten resolver varios problemas físicos como son: mecánica de fluidos, transmisión de calor, electromagnetismo, mecánica estructural, etc. y HEF que se aplican a un problema físico específico. Hay herramientas que permiten incluso acoplar dos problemas como es el caso del problema térmico y del problema electromagnético. Es decir la salida de un problema se emplea como entrada en el otro problema y viceversa, de forma iterativa. El proceso de generación de la solución mediante HEF se realiza mediante diversos pasos mencionados a continuación y explicados brevemente:

- Definición de la geometría objeto de estudio
  - Determinación del régimen a estudiar
  - Asignación de las propiedades físicas de los materiales
  - Asignación de las condiciones de entorno
  - Aplicación de las cargas
  - Mallado de la geometría
  - Resolución del problema
  - Análisis de la solución.
- 
- *Definición de la geometría objeto de estudio*

Consiste en la obtención de un dibujo en 2D o 3D, de las formas de los diferentes objetos en los que se pretenden resolver las ecuaciones de campo. Para efectuar este cometido las HEF suelen tener una herramienta CAD (Computer Aided Design).

- *Determinación del régimen a estudiar*

Para el caso del modelado térmico, las HEF permiten realizar un análisis en régimen permanente o en régimen transitorio. Es en esta fase en la que se especifica el tipo de régimen a estudiar.

El régimen permanente quiere decir que las condiciones del flujo no cambian con el tiempo, no existen cambios en la densidad, presión o temperatura, también se dice que está en equilibrio. El régimen transitorio describe lo opuesto ya que las condiciones del fluido serán diferentes de un instante a otro.

- *Asignación de las propiedades físicas de los materiales*

Es aquí donde las propiedades termo físicas tales como conductividad térmica, densidad y calor específico, se asignan a cada uno de los objetos que se han generado en la fase de definición de la geometría. Las HEF suelen tener una base de datos de propiedades de materiales, de forma que la asignación de propiedades térmicas se realice de forma más exacta.

- *Asignación de las condiciones iniciales*

Las condiciones iniciales más típicas que se aplican en la frontera del problema suelen ser de temperatura constante (isoterma), superficies adiabáticas (flujo de calor nulo) o condiciones de simetría. Asimismo, en el caso de la frontera entre sólidos y entre sólidos y el ambiente, suele aplicarse alguna condición de contorno del tipo de conducción, de convección y radiación respectivamente.

- *Aplicación de las cargas*

Se entiende por cargas, las fuentes activas de campo. En el caso particular de la mecánica de fluidos, la fuente de campo es la, o las entradas del fluido. A través de ésta se puede especificar la velocidad inicial, el porcentaje del fluido, el flujo, la velocidad final, y el tipo de flujo ya sea totalmente desarrollado o no.

- *Mallado de la geometría*

La geometría objeto de estudio se divide en diferentes elementos, cada elemento posee una ecuación asociada, las cuales se resuelven de forma iterativa. Las HEF suelen tener herramientas que mallan de forma automática y permiten que el usuario malle de forma más fina las zonas que más le convenga. Es por ello que el mallado de la geometría es una tarea clave en el proceso.

- *Resolución del problema*

En esta fase del proceso, es donde se aplica el método de análisis por elementos finitos para obtener la solución del problema físico de forma iterativa, en este caso la mezcla de dos combustibles. La solución se obtiene en cada uno de los elementos en que se descompone la geometría. Aunque siempre es posible sumar o integrar estos pequeños elementos en una región determinada, ya sea área o volumen.

- *Análisis de la solución*

Una vez que se ha obtenido la solución del problema, en este caso de fluidos, se procede a la última fase, durante esta fase es importante hacer notar los posibles errores de diseño y de mezclado que nos permitirán proponer alternativas de mejoramiento del mismo

La penúltima fase del proceso que se acaba de describir se conoce también con el nombre de *post-procesamiento*, y el resto de las fases se conocen con el nombre de *pre-procesamiento*.

El empleo de HEF en el modelado térmico de componentes magnéticos es muy importante, ya que mediante el uso de estas herramientas *software* es posible analizar distintos efectos sobre la distribución térmica tales como efectos geométricos, efectos de las propiedades termo físicas, efectos de las cargas y de las condiciones de frontera.

Asimismo permiten visualizar distintas magnitudes como velocidad, porcentaje de mezclado, presión, vorticidad, etc. Esta visualización permite la determinación de puntos de interés que permitirán estudiar el comportamiento de la mezcla y como se lleva a cabo.

Existen multitud de problemas físicos cuya formulación desde un punto de vista matemático responde a una ecuación diferencial en derivadas parciales. Tal es el caso de la transmisión del calor, del electromagnetismo, de la mecánica de fluidos o del análisis estructural. La solución de dichos problemas tiene un interés elevado en ingeniería, ya que dichas soluciones son el punto de partida para el diseño y modelado de los sistemas físicos que representan estas ecuaciones.

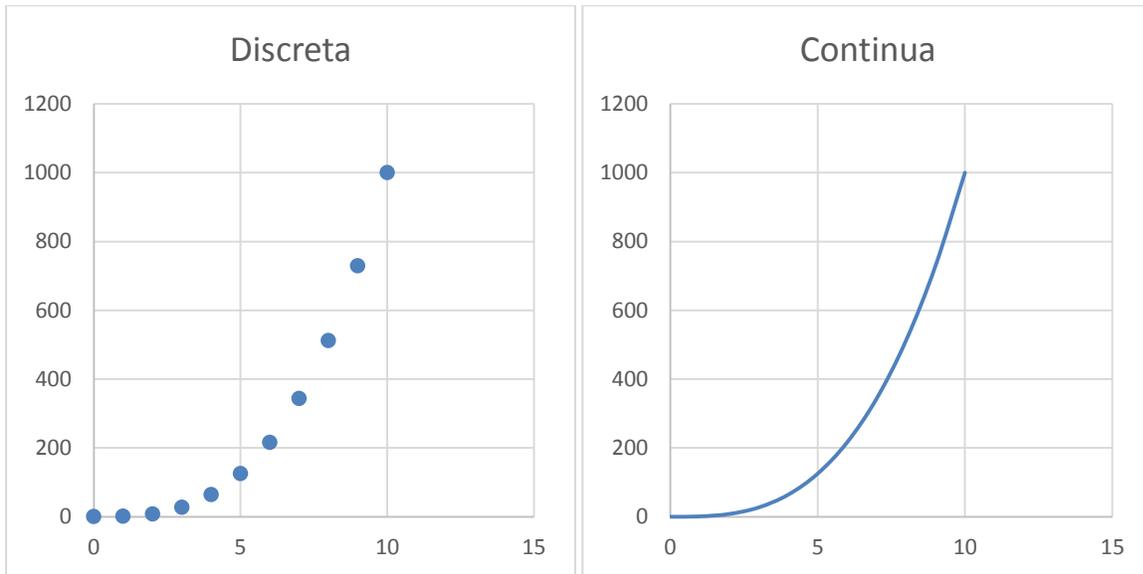
En este trabajo, se propone el empleo de esta técnica para la resolución de problemas específicamente para la mecánica de fluidos, esencialmente debido a que el campo de velocidades y de presiones, debe ser en 3 dimensiones, así como también se requiere del conocimiento del comportamiento de las partículas durante el tránsito.

Históricamente, para los códigos CFD tradicionales, el espacio de fluido está creado por la resta booleana del modelo sólido dentro del sistema CAD y su inverso.

Una vez que ha sido aprobado por la herramienta CFD para su posterior mallado, los generadores de malla en CFD tradicionales se basan generalmente en algoritmos adecuados al modelo. Las revisiones detalladas de los tipos básicos de geometrías de malla se presentan en varias publicaciones (por ejemplo WEATHERILL y Hassan, 1994, Filipiak, 1996 y Parry y Tatchell, 2008)<sup>7</sup>.

Con el fin de enriquecer este trabajo se mencionarán dos tipos de mallado, uno que utiliza polígonos triangulares para realizarlo y el otro, usado para este trabajo, que utiliza un mallado cartesiano de geometría cúbica.

La discretización es un concepto clave para explicar el mallado de una geometría. Para ello se pide al lector observar la figura 3.0. En esta figura se observa como a través de una serie de puntos se puede aproximar una curva, en este caso, una parábola.

*Figura 3.5A**Figura 3.5 B*

Se puede visualizar que en la figura 3.5A, los puntos se podrán acercar a un nivel tan fino que prácticamente formarán la curva que se observa en la figura 3.5 B, aunque formalmente serán puntos y no será una línea continua. A la aproximación de la figura 3.5A se le llama discretización. Las dos variables que serán discretizadas se mencionan a continuación:

1. La discretización del flujo continuo, es decir de las variables continuas como la densidad.
2. La discretización de las ecuaciones, es decir para cada uno de los nodos que se formen habrá una solución aproximada.

Es importante mencionar como las herramientas de CFD realizan el mallado de las geometrías para posteriormente realizar el cálculo. Como regla general, para geometrías complejas se utilizan mallas no estructuradas, formadas por la construcción de nodos distribuidos irregularmente (Fig. 3.6 A). Cuando las geometrías que serán malladas son menos complejas a menudo es posible utilizar mallas estructuradas (véase Fig.3.6 B), y asimismo estas dos técnicas se pueden combinar, con mallas estructuradas en algunas regiones. Tales mallas pueden ser llamadas parcialmente estructuradas.

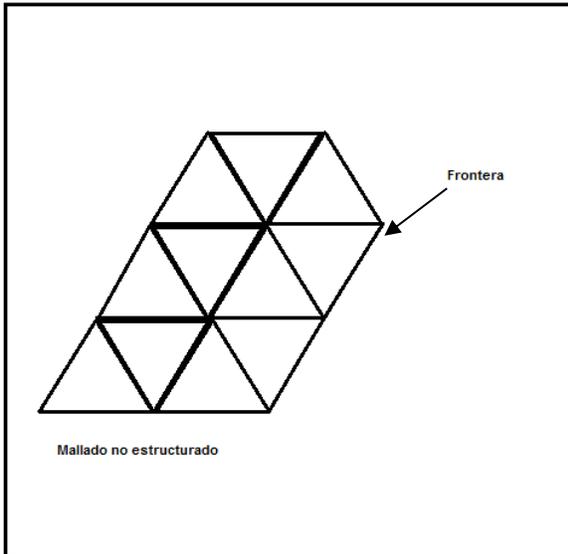


Figura 3.6A. Mallado no estructurado.

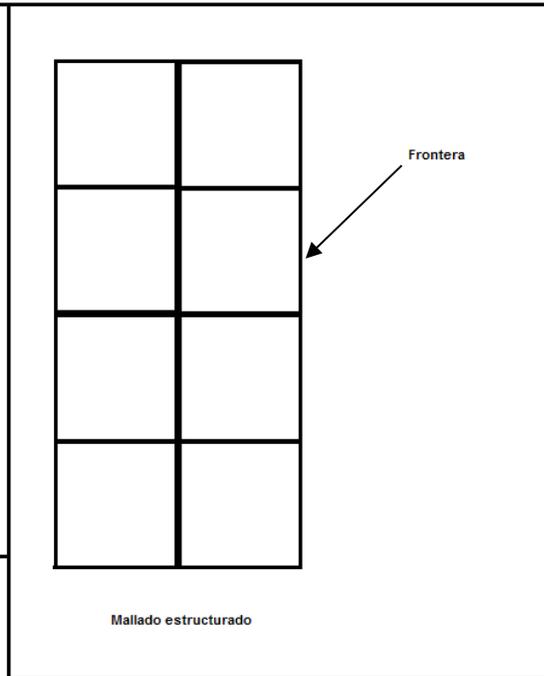


Figura 3.6B. Mallado estructurado.

Figura 3.6. Tipos de mallado. El utilizado en este trabajo es el de la Figura 3.6B

A pesar de que los sistemas CAD originalmente fueron desarrollados con el fin de realizar diseños, y no con el fin de realizar simulación numérica, se han especializado cada vez con mayores alcances. Las mallas que se producen, lo hacen a partir de la generación de nodos en la superficie. Una opción para realizar en la superficie un mallado es mediante la triangulación de Delaunay.

La triangulación de Delaunay es un método que se utiliza para partir la geometría de referencia en nodos separados por un promedio de la distancia entre ellos generando triángulos. Las características más importantes de este método se mencionan a continuación:

- Los triángulos que están formados por los nodos, están conectados entre sí y forman el mayor número de triángulos posibles sin que se crucen.
- Todos los triángulos están conectados entre sí. Disminuyendo la deformación de estos debido a que todos están juntos.

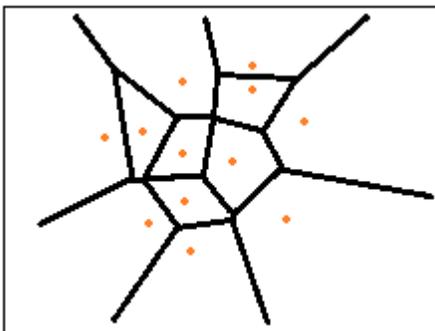
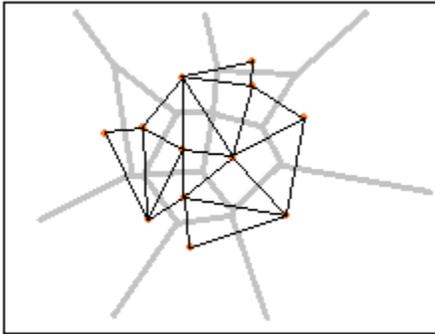


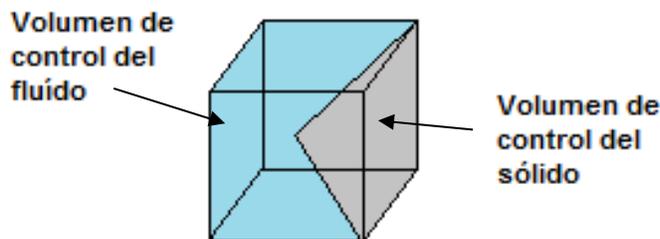
Figura 3.7. A través de este diagrama se puede explicar cómo se realiza la triangulación. Se obtiene el promedio de las distancias entre dos puntos y se traza una línea. Después se repite el proceso para cada uno y se obtienen los polígonos que se observan en la figura 3.7.



*Figura 3.8. Una vez que se han obtenido los polígonos, el programa procede a realizar lo que se llama triangulación de Delaunay. Esta consiste en crear pequeños triángulos todos pegados entre sí.*

Después de este proceso, basado en la triangulación de la superficie, se genera una malla. Para la mayoría de los casos es una malla con elementos tetraédricos. Se debe tener cuidado y tener en cuenta que el sobre-refinamiento de la superficie puede resultar en un excesivo número de pequeños triángulos y frecuentemente se puede presentar en áreas que no son significativas en cuanto a la simulación de flujo.

El enfoque alternativo, para este trabajo, se basó en utilizar una malla de cuerpo sumergido como se muestra en la figura 3.9. En esta aproximación la generación de la malla se inicia de forma independiente de la geometría en sí y los elementos son cubos rectangulares que pueden intersectar arbitrariamente el límite entre sólido y líquido. Esto hace que sea posible utilizar una malla cartesiana. Una malla de este tipo puede definirse como un conjunto de cubos (Figura 3.6B), que son adyacentes entre sí, orientado a lo largo de las coordenadas cartesianas.



*Figura 3.9. La figura muestra el caso en el que el cubo se encuentra en la frontera entre el fluido y el sólido.*

El ancho de elemento que se ha usado, estuvo en función del tipo de simulación, ya que inicialmente se realizaron mallados muy finos para encontrar una mejor aproximación, pero el nivel de detalle no eran determinante para continuar disminuyendo el tamaño del elemento por lo cual se usó el que de manera automática determina el programa, el cual fue de 0.078m.

## MODELO FISICO

Una vez que hemos realizado la discretización de la geometría continuaremos con la discretización de las ecuaciones. Esta se realiza con el mismo fin que el mallado. Es decir, las ecuaciones se van resolviendo para cada uno de los cubos que se han generado en el paso anterior. Esto normalmente se realiza con el método de las diferencias finitas. Este método emplea el desarrollo en series de Taylor para obtener la discretización de las ecuaciones del flujo.

MODELO DE FLUJO

A continuación se describe el problema físico que se resolverá. Este consiste en un flujo de dos combustibles que se mezclarán de forma continua a través de una tubería que contiene un mezclador estático. Figura 3.10

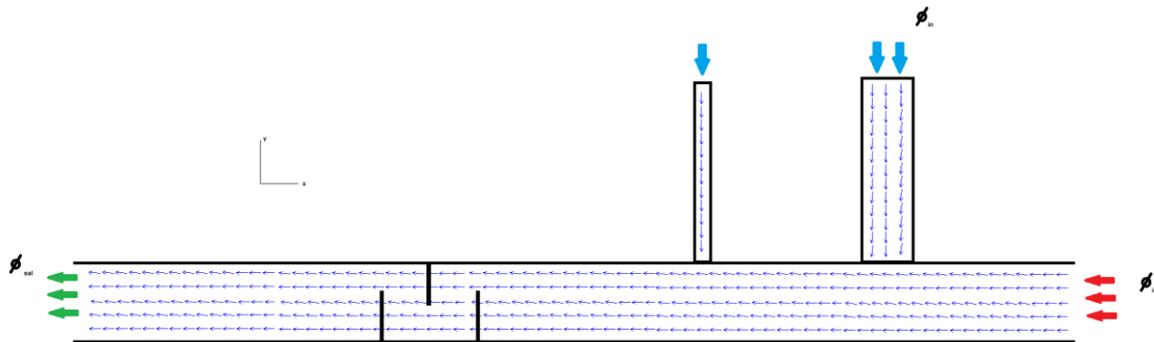


Figura 3.10. En esta figura se observa el modelo físico del flujo.

En este trabajo se estudia el comportamiento de dos fluidos, un combustible fósil y un combustible orgánico, y la mezcla que ambos producirán después de pasar por un mezclador estático, el cual genera turbulencia para que de forma inercial se produzca una mezcla homogénea a la salida del mismo, el sistema se encuentra al aire libre y por lo tanto estará expuesto a un pequeño intercambio de calor ya que al mismo tiempo está siendo enfriado por el aire circundante. Para el estudio cuantitativo de este problema se hará uso de las ecuaciones de conservación de la masa, conservación de la cantidad de movimiento y la ecuación de la conservación de la energía.

La Ley de la conservación de la masa es una de las leyes fundamentales en el análisis de flujos dentro de tuberías, también se le conoce como ecuación de continuidad. Para flujo permanente la masa de fluido que atraviesa cualquier sección de tubería por unidad de tiempo será constante. Esta ley en términos simples se define como:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

Donde  $\rho$  es la densidad,  $A_n$  es el área de la tubería y  $v_n$  es la velocidad del fluido. Cabe destacar que el subíndice 1 indica entrada y el subíndice 2 salida. Para fines de este trabajo se ha considerado flujo incompresible por lo que la ecuación toma la siguiente forma:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Esto debido a que la densidad no cambia con el tiempo por lo que permanece constante.

En términos llanos se puede enunciar la Ley de la conservación de la masa como sigue:

La masa en un sistema no cambia a lo largo de un proceso, es decir que permanece constante.

También se puede notar que a pesar de que la tubería tendrá un elemento mezclador, que bloqueará el flujo, para mezclarlo, la masa que entra en el sistema será igual a la que sale del mismo, es decir que en esa zona aumentará su velocidad.

La ecuación de la conservación de la energía es una representación de la primera ley de la termodinámica la cual establece que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma en otra forma de energía, relaciona la transferencia de calor, el trabajo y el cambio en la energía:

$$\text{Energía en la sección}_1 + \text{Energía añadida} - \text{Energía perdida} - \text{Energía extraída} = \text{Energía en la sección}_2$$

Para fluidos incompresibles y flujo permanente y cuando la variación de la energía interna es despreciable la ecuación se puede escribir como:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 + E_{añadida} + E_{perdida} + E_{extraída} = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Se puede observar en la ecuación anterior a la energía cinética y la energía potencial seguidos de la P que representa la presión,  $\rho$  la densidad, g la gravedad local, v la velocidad y h la altura, que en este caso será igual a cero ya que no habrá variación inicial respecto a la final. Esta ecuación se conoce como el Teorema de Bernoulli. Para el caso en estudio quedará:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

A la Ley de la conservación de la cantidad de movimiento también se le conoce como la representación de la segunda Ley de Newton, esta se refiere a que cuando la velocidad del flujo varía en un volumen de control, será por que actúan fuerzas sobre el que lo aceleran, es decir:

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

La resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el sistema será igual a la masa por la aceleración del sistema.

Si se provocara una pequeña variación en su cantidad de movimiento se tiene que:

$$\sum F dt = d(m\vec{v})$$

Y por ser régimen permanente:

$$\sum F = \dot{m}_2 \vec{v}_2 - \dot{m}_1 \vec{v}_1$$

Es importante destacar que la ecuación anterior es válida para régimen permanente como el que se considera en este trabajo.

### Modelo de Turbulencia

Inicialmente se definirá el concepto de turbulencia:

1. Un tipo de movimiento que es la solución particular de las ecuaciones de Navier –Stokes.
2. Un movimiento tridimensional y caótico de torbellinos de distintos tamaños superpuestos a un flujo principal.
3. Un eficiente mezclador de masa, momento cinético y energía.
4. Un disipador importante de energía.
5. El último gran problema sin resolver de la mecánica de fluidos.

La turbulencia se inicia por inestabilidades en el flujo causadas por los gradientes de velocidades. Estos torbellinos en movimiento, generan nuevas inestabilidades dando lugar a torbellinos más pequeños.

La herramienta HEF que se ha utilizado en el presente trabajo utiliza el modelo de turbulencia  $\kappa$ - $\epsilon$ . Para explicar lo que es un modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  primero se dará una idea de lo que es un modelo RANS. Para obtener las ecuaciones del modelo de turbulencia, se promedian las ecuaciones de movimiento con respecto al tiempo sobre un punto en específico el cual se sabe que no tiene variaciones importantes. Esta aproximación se llama “cerradura de un punto”, y nos arrojará como resultado un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales a las cuales se les llama ecuaciones de Navier Stokes promediadas con Reynolds por sus siglas en inglés (Reynolds –Average Navier Stokes, RANS).

Se puede decir que el modelo de turbulencia  $\kappa$ - $\epsilon$  es un modelo que parte de la experimentación y de la teoría, la  $\kappa$ - se refiere a las ecuaciones de transporte de la energía cinética turbulenta y la  $\epsilon$  a la disipación de esta energía cinética turbulenta. Este modelo deprecia los efectos viscosos lo que lo hace ideal para flujos totalmente desarrollados turbulentos.

### Efectos del modelo de turbulencia

El objetivo primordial de este trabajo es mezclar dos combustibles, uno orgánico y otro fósil, con el fin de obtener un biocombustible que tenga emisiones de  $\text{CO}_2$  más bajas que el combustible fósil original. Esto a través de un mezclador estático. La parte más importante que corresponde al mezclado es justamente la turbulencia que se genera dentro del sistema para obtener dicho fin.

Esto como ya se ha mencionado se ha analizado con un software de mecánica de fluidos que utiliza el modelo de turbulencia k-epsilon. Los resultados de este modelo se describen en cada uno de los apartados en donde se analiza por separado las mezclas.

### 3.3 PROCESO DE DISEÑO

#### Justificación del diseño

Antes de comenzar con los diseños del mezclador se mostrará por qué es necesario construirlo ya que sin esta justificación, el diseño no tendría sentido.

Dentro de las instalaciones de ASA los sistemas de suministro de combustibles se encuentran bajo un estricto control de calidad, todos los sistemas siguen una normatividad establecida. El espacio destinado para este prototipo es muy pequeño y es una de los retos que presenta. La mezcla de los combustibles debe lograrse en una longitud menor a 1 metro lineal de tubería y para comprobar si la mezcla se logra o no, se han realizado las simulaciones correspondientes a 4 concentraciones que se establecieron como necesarias a partir de las necesidades del cliente. La primera pieza que se analizó fue la conexión "T", que es donde se dará la convergencia de ambos fluidos y la cual se diseñó siguiendo las especificaciones proporcionadas: Tubería 4' ced. 40. En la tabla 8 se muestran las concentraciones analizadas para el desarrollo de este trabajo ( Q=flujo m<sup>3</sup>/s).

Tabla 8. Concentraciones que se consideraron para la realización de éste trabajo.

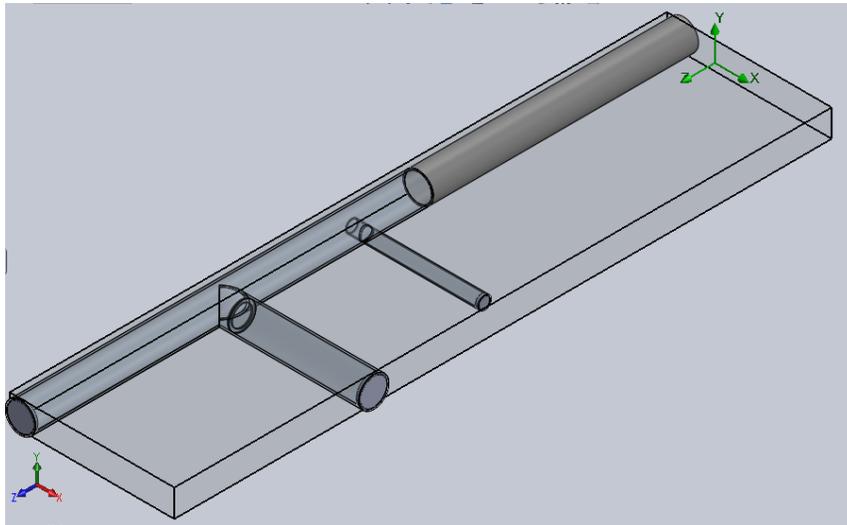
Q Total	Q KPS	Q BIO ALTO	Q BIO BAJO	% BIO-KPS	Q=VA V [m/s]
300	150 - 0.01	150 - 0.01		<b>50</b>	42.5531
300	225 - 0.014195	75 - 0.004732		<b>75</b>	42.5531
300	270- 0.017034		30 - 0.001893	<b>10</b>	42.5531
300	297 - 0.018738		3 - 0.000189	<b>1</b>	42.5531

Para demostrar la necesidad de un mezclador, la sección "T" debía analizarse por separado para justificar que era necesario incluir el elemento, ya que se pensaba inicialmente que solo la "T" podría cubrir el papel de mezclador. Se agrega el área interior de la tubería:

$$A=0.03664 \text{ m}^2$$

### Metodología

A continuación se muestran los pasos a seguir en el desarrollo de la simulación. En la figura 3.11 se observa la "T" dibujada en el software CAD.



*Figura 3.11. Elemento "T". Es importante justificar el diseño del mezclador comprobando si es posible que se mezclen los fluidos sin necesidad de un elemento adicional.*

- **Diseño:** Se dibujaron en el módulo de "partes" dos piezas. La primera fue la T con dos entradas de combustible. Se supone que la de mayor diámetro será usada para concentraciones que se catalogaron como "altas" con concentraciones que variarían, inicialmente, de 50%-50% kps -bio-kps hasta 75% -25% kps-bio-kps. La segunda tubería con un diámetro de 1 pulgada cédula 40 manejaría las concentraciones "bajas" correspondientes a 90%-10% kps-bio-kps hasta 99%-1% kps-bio-kps. La segunda pieza corresponde a una tubería con diámetro de 3 pulgadas cédula 40 con una longitud de 1 metro, con el fin de observar el comportamiento de la mezcla. Posteriormente se unieron en el módulo de "ensamblaje" obteniendo la Figura 3.11.

- **Mallado:** Ya que tenemos ésta pieza se procede a realizar el mallado. El mallado es una división de todo el elemento en partes pequeñas representativas, a través del cual la computadora analizará parte por parte cómo es el comportamiento del fluido a lo largo de todos su trayecto, a este proceso se le llama análisis por elemento finito y es donde el programa analiza a través de iteraciones la mayor probabilidad del comportamiento de las partículas del fluido así como también el posible estrés en las paredes y en las regiones más difíciles entre otros parámetros importantes. Figura 3.12 y 3.13.

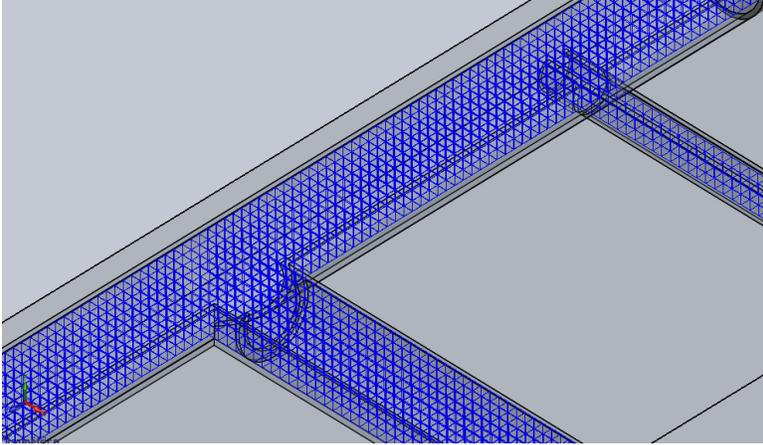


Figura 3.12. Malla interna. Esta malla es la que se usó para el análisis de los fluidos en el elemento "T".

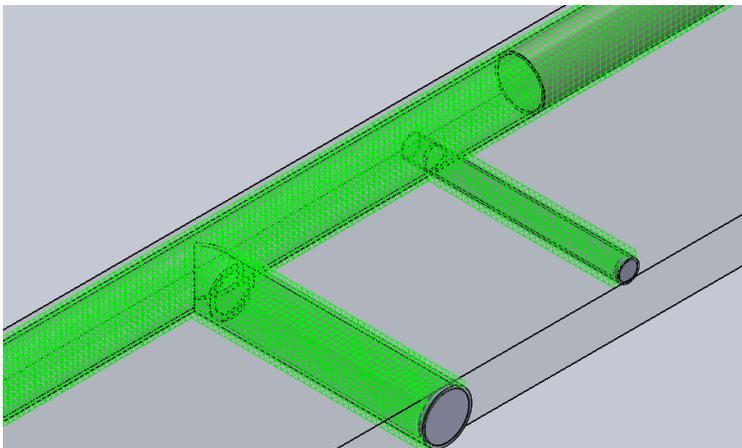
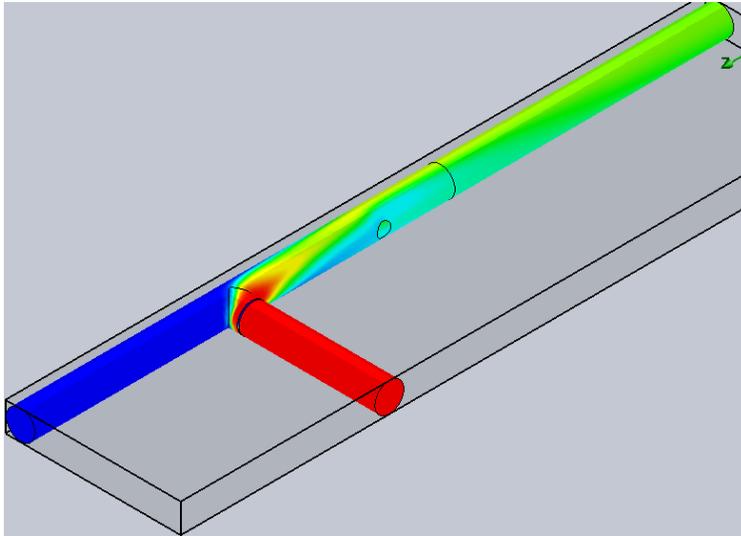


Figura 3.13. Malla externa del elemento. Como se puede observar el mallado es más fino en las zonas donde el programa prevé mayor estrés.

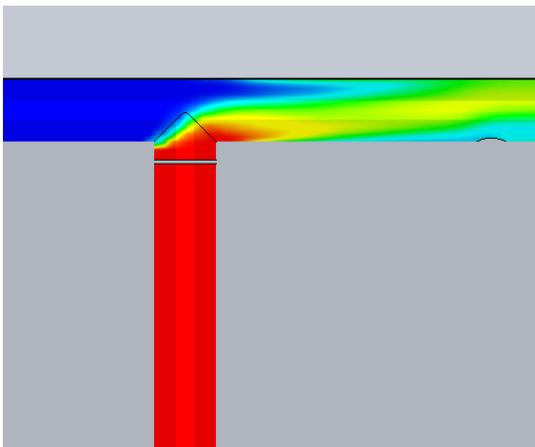
- Simulación: Una vez que se ha realizado el mallado se procede a insertar las condiciones iniciales, como son el flujo que será 300 galones/min, la presión (atmosférica) y la temperatura ( $T_{\text{ambiente}}=25^{\circ}\text{C}$ ) y después se procede a la selección de los fluidos, que en esta ocasión se tuvieron que personalizar debido a que no existían en la base de datos del programa. El siguiente paso es proporcionar al programa el comportamiento específico que se desea obtener, es decir, la refracción de las partículas ideal o real y los matices de colores que se desean, posteriormente de que se han introducido los datos de las condiciones de frontera, se procede a elegir las regiones para analizar, es decir los lugares que recorrerá el fluido.

Una vez que se inicia la simulación y se selecciona la resolución que se requiere, se procede a obtener las concentraciones en la superficie, el rojo es el color correspondiente al bio-queroseno y el azul al queroseno obteniendo la imagen correspondiente a la Figura 3.14.



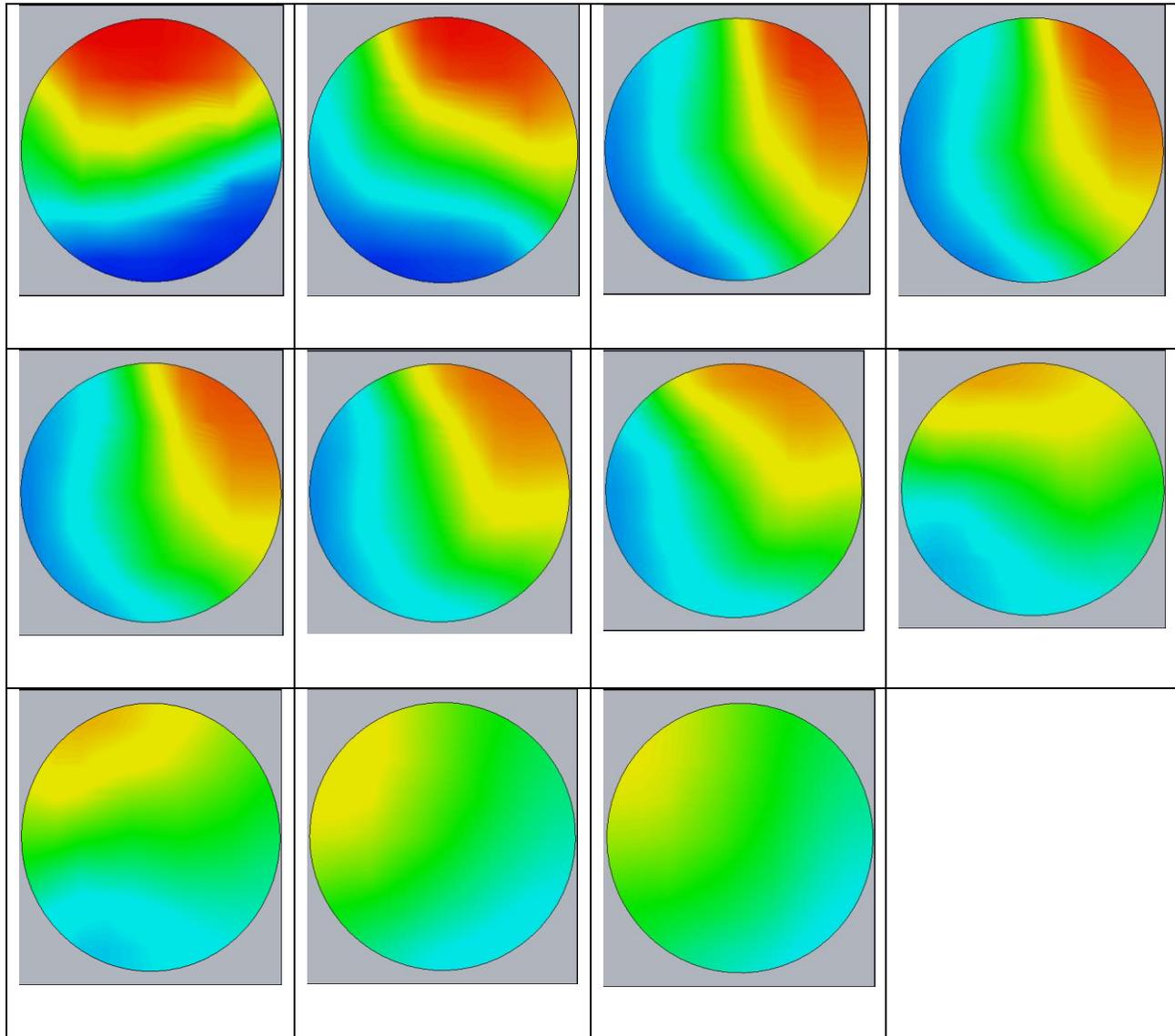
*Figura 3.14 Mapa de contorno. Mezcla del bio-kps (rojo) y kps (azul) en el elemento "T". La región verde representa una mezcla ideal. Esta tubería es de 2 m de distancia y nos confirma que es necesario un elemento mezclador para obtener los resultados deseados.*

Como se puede observar no se obtiene una mezcla uniforme ya que se observan regiones de color azul o cian e incluso amarillas lo cual nos indica una mezcla no homogénea.



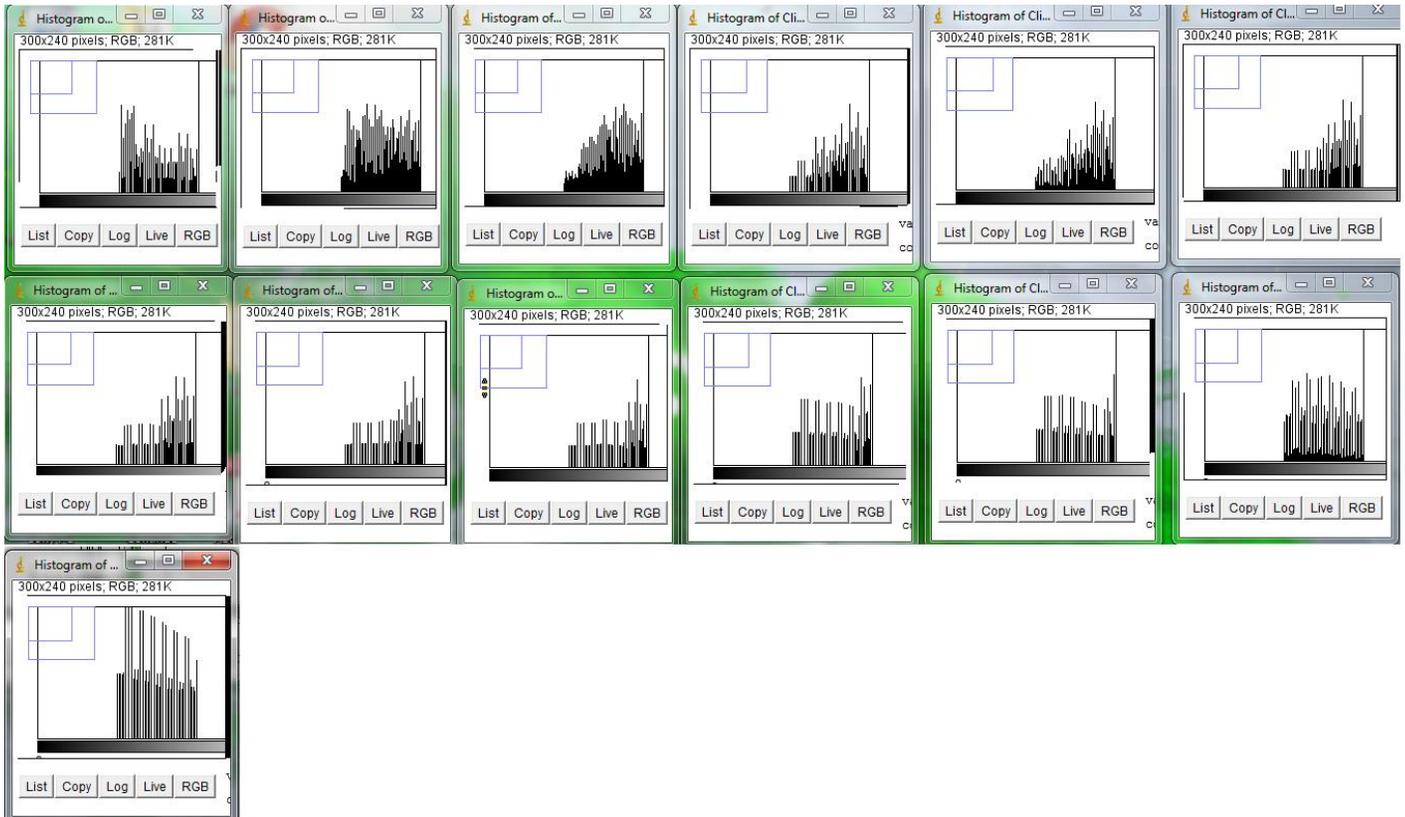
*Figura 3.15. Detalle de la salida de la "T". Zonas de colores entre el azul y el verde muestran la baja homogeneidad del fluido final.*

La forma en cómo se cuantificaron ésta y todas las simulaciones es a través del análisis de imágenes con el programa “imagej”. Este programa nos permite obtener datos como la desviación estándar y así tener una idea del comportamiento de la mezcla. Si la desviación estándar es alta nos indica que los pixeles en la imagen no son homogéneos y por lo tanto la mezcla tampoco lo es. Pero si por el contrario la desviación estándar es muy baja o se acerca a cero, nos indica que la homogeneidad es cercana al 100 %. Los cortes que realizaron para una mezcla 50% kps-50% bi-kps se muestran a continuación:



*Figura 3.16. Perfiles obtenidos de la sección “T”. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa al bio-kps (rojo) como se intenta mezclar con el kps (azul) sin lograrlo en la imagen final ya que hay regiones azules y amarillas intensas y bien definidas, esto después de 2 m de haber recorrido el sistema. Es importante mencionar que se debe mezclar en 1 m. Las distancias corresponden a la T y después cada 10 cm hasta la salida del sistema.*

Como se puede observar en los cortes transversales los fluidos se mantienen separados a lo largo de todo el sistema, los fluidos podrían desplazarse a lo largo del sistema y jamás se mezclarían. Esta es la justificación de este trabajo y comprenderá diversas etapas que se abordarán de manera detallada a lo largo de este estudio. Otra forma de comprobar lo anterior se deriva de obtener los histogramas de cada uno de estos cortes transversales como se muestra a continuación.



*Figura 3.17 El comportamiento de los histogramas para cada imagen obtenida de cada una de las secciones.*

El comparativo de los histogramas realizados a cada una de las imágenes que se obtuvieron de la simulación realizada al elemento “T” se muestra en la figura 3.17. Se observa como el histograma presenta actividad elevada desde el inicio y se estabiliza con forme avanza pero no alcanza a tener actividad nula lo cual nos indicaría homogeneidad completa como se esperaba.

Después de analizar estos resultados se puede determinar que es necesario un elemento adicional, el cual permita obtener una mezcla homogénea y lleva por nombre: mezclador estático. Existen en el mercado una gran variedad de estos productos y su configuración varía de acuerdo al uso específico para el cual será usado. Para el caso que compete a este trabajo los requerimientos de diseño son los siguientes:

1. Mezclar dos fluidos de densidades similares.
2. Al mezclar no reducir considerablemente la presión.
3. Al mezclar no reducir considerablemente la velocidad.
4. Ocupar un espacio menor de 1m.

Básicamente estos son los requerimientos iniciales para llevar a cabo la mezcla.

Ya que se realizó un análisis de cuáles son los mezcladores que se pueden utilizar se llegó a la conclusión de que dos elementos del mezclador comercial Kenics serían los adecuados para estas condiciones. Sin embargo existe una propuesta alternativa que podría ser de fabricación más sencilla pero que cubriría de igual forma las necesidades del cliente.

### Planteamiento del problema

El personal de Aeropuertos y Servicios Auxiliares, es el encargado del proyecto que la UNAM está llevando a cabo para el AICM. Ellos han planteado la necesidad de ofrecer otros productos, como los combustibles de origen biológico, esto debido a la demanda que ha generado el sector aeronáutico derivado de los incentivos que otorgan diversas organizaciones principalmente en EUA y UE pero también de las regulaciones en materia de cuidado ambiental que se están implementando en la UE y en los EUA.

Actualmente existe una “barrera psicológica” que impide el uso de los combustibles biológicos en un 100%, caducando el día que ofrezca la seguridad necesaria para su uso total, aunque también dependiendo de los costos extra que éste genera, hoy en día el AICM no ofrece ese tipo de combustibles y su misión es que este año esté funcionando un sistema que proporcione este tipo de productos a sus clientes.

Dicho lo cual éste sistema será instalado por la UNAM y el CCADET y estará encargado de automatizar todo el proceso de mezclado.

La parte del proceso que involucra el mezclado corresponde a este trabajo. Esencialmente el diseño y la construcción de un mezclador estático que logre mezclar dos corriente de combustibles ya definidos en un proceso continuo.

### Problemática

De manera concreta podemos describir los principales problemas de este trabajo que son:

- Obtener una mezcla homogénea de dos corrientes de combustibles.
- Mantener la caída de presión por debajo de los 5psi.
- Tener un diseño sencillo de construir dentro de un tubo de 3 in.

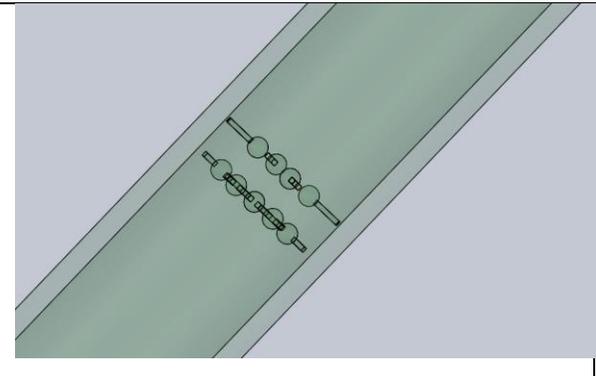
### 3.4 DISEÑOS PROPUESTOS

Para fines prácticos, esta sección se ha dividido en tres etapas. Durante estas etapas se han presentado diversas soluciones, una de ellas fue la propuesta por el Dr. E. Soto que arrojó diversos diseños que marcaron la primera etapa, como así le he llamado, del proceso de diseño. La segunda etapa es la que se refiere a los mezcladores que se simularon repetidamente con distintas concentraciones pero que no necesariamente se construyeron ya que al final solo se manufacturó un prototipo. La tercera etapa comprende las simulaciones que se llevaron a cabo para determinar cuál de los mezcladores se enviaría a manufacturar.

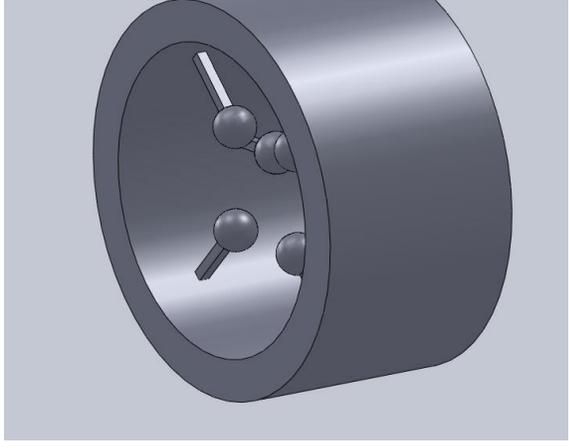
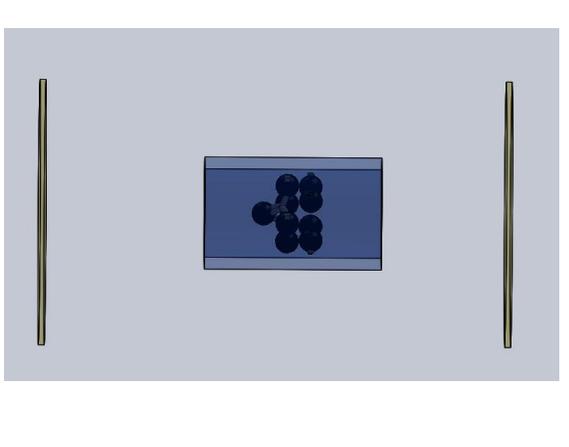
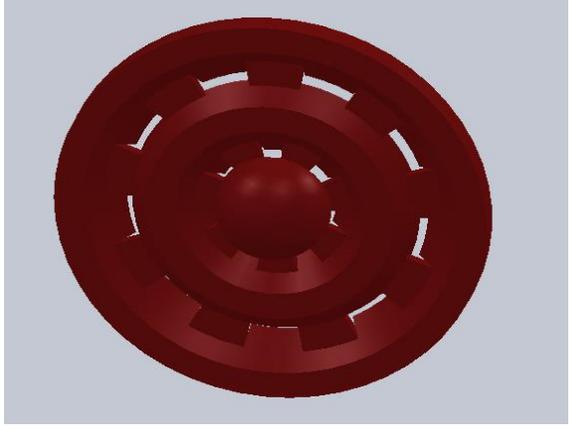
#### ETAPA I

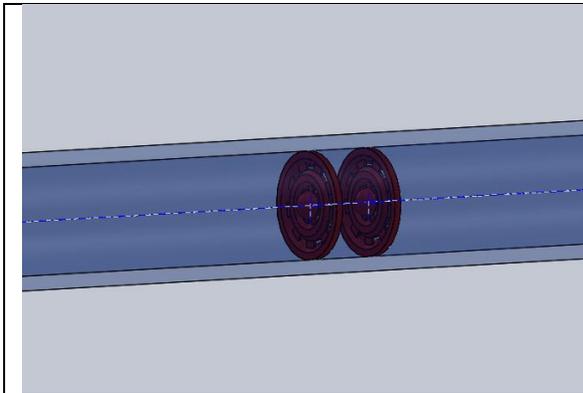
La etapa I es la etapa donde las primeras ideas estuvieron enfocadas en sistemas de esferas que se encontraban insertadas en la tubería, esferas independientes y pequeñas placas perforadas que lograban desviar los flujos en diferentes direcciones obteniendo cierta turbulencia del fluido. Se propusieron varios diseños, cada uno de ellos se muestra en la tabla 9. Cabe mencionar que todos los diseños que se generaron en la primera etapa fueron desechados debido a las complejas formas que representaban, generándonos problemas en el momento en que se deseaba construir y limitando de forma directa el proceso creativo.

Tabla 9. Diseños generados en la primera etapa.

	<p><i>Diseño A. Esferas colocadas de tal forma que promuevan la generación de vórtices que aseguran el mezclado. En este diseño se colocaron dos conjuntos de esferas para garantizar el mezclado lo cual en posteriores simulaciones se logró, sin embargo los procesos de construcción limitaron su viabilidad.</i></p>
---	---

## METODOLOGÍA

	<p><i>Diseño B. Diseño similar al diseño "A", solo que a diferencia de éste las esferas son independientes, colocadas de forma que produjeran un remolino que alteraría la dirección de las partículas y generaría la mezcla deseada, insertadas en las paredes de la tubería y asegurando la generación de vórtices. Era uno de los diseños más prometedores.</i></p>
	<p><i>Diseño C. Mezclador multicapas esféricas. Este mezclador consta de 3 capas de esferas. La primera rompería la inercia de los fluidos separados en la tubería, la segunda y la tercera servirían de generadores de vorticidad para lograr nuestro objetivo.</i></p>
	<p><i>Diseño D. Una especie de "coladera" asemeja esta forma, la dosificación que este elemento realiza es ideal para espacios pequeños en donde los mezcladores más grandes quedarían excluidos de manera automática, sin embargo las caídas de presión generadas son indeseables.</i></p>



*Diseño E. O de doble capa que nos entregó una mezcla homogénea en un corto espacio pero que empeoró las caídas de presión. Lo cual nos haría incorporar un elemento adicional a la salida de éste, es decir una bomba que restituyera la caída de presión.*

### 3.5 DISEÑOS FINALES

#### ETAPA II

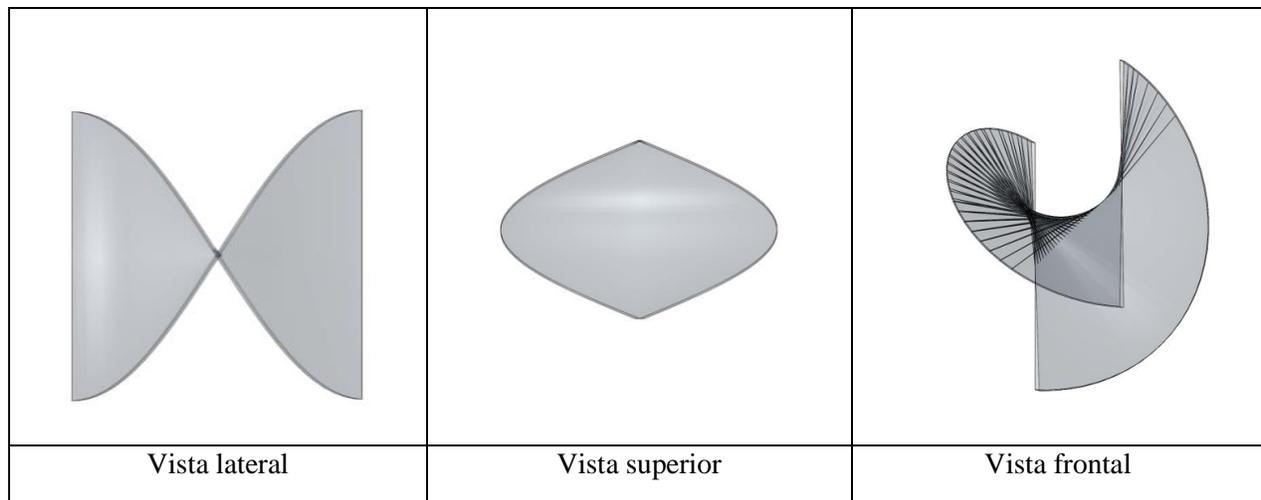
La etapa II comprende los tres elementos mezcladores finales y se caracterizan por la efectividad mostrada durante el mezclado, además de que en conjunto suman 100 simulaciones por computadora a diferencia de los de la etapa I que solo se simularon 1 vez cada uno. En primer lugar tenemos al mezclador tipo ADN o helicoidal el cual se describe a continuación.

Mezclador helicoidal (tipo kenics y komax).

Ambos difieren en características muy específicas de diseño, estos se analizarán de manera comparativa ya que su configuración cambia dependiendo de las necesidades del cliente.

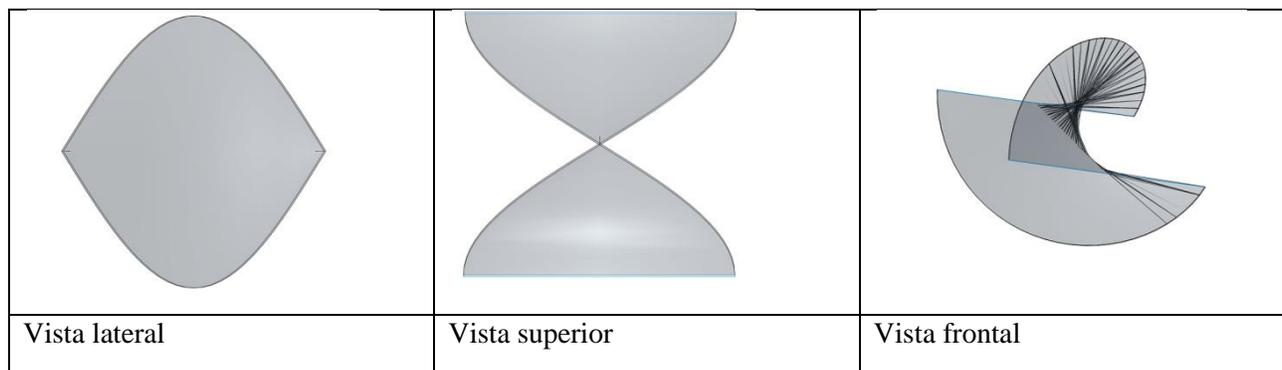
Para estos diseños, unos de los más comerciales actualmente, los elementos que se han seleccionado y que posteriormente se han diseñado son los siguientes:

Elemento 1: Es una lámina que se dobla en forma de hélice siguiendo una trayectoria circular y un ángulo dado logrando un perfil similar al que se muestra en la figura 3.18.

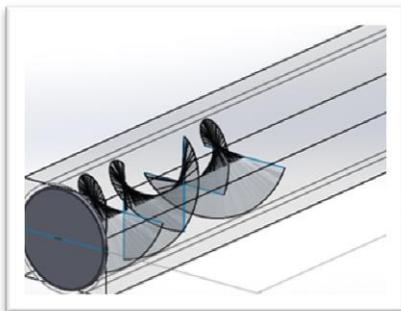


*Figura 3.18. Vistas del elemento mezclador 1.*

Elemento 2: La misma lámina, en la misma configuración de barrido pero esta vez es girada en sentido anti horario. Figura 3.19.



*Figura 3.19 Vistas del elemento mezclador 2.*



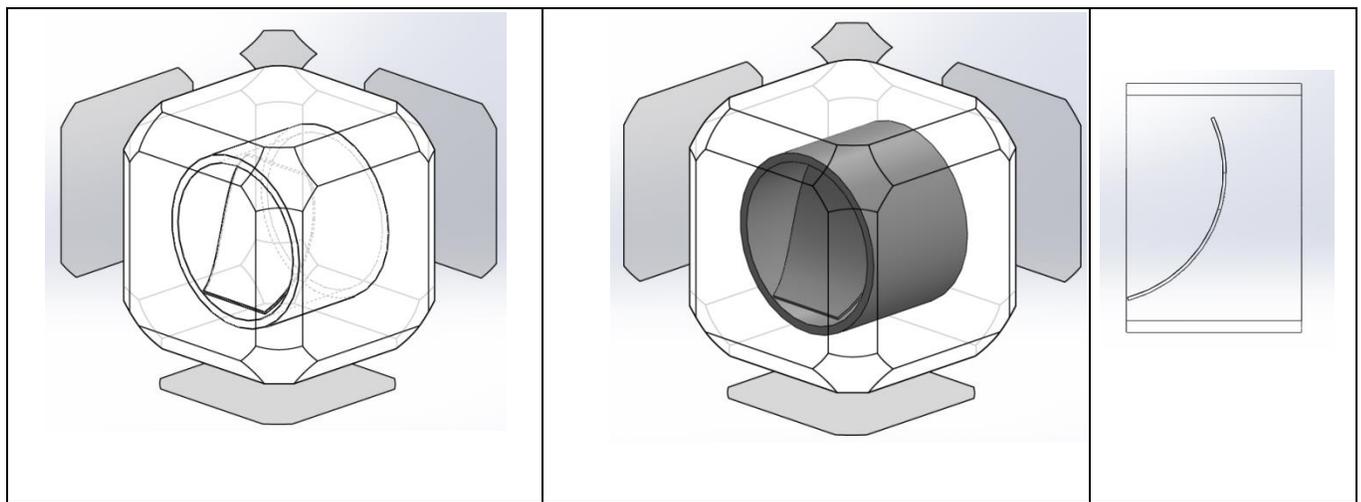
*Figura 3.20. Arreglo final de los elementos helicoidales.*

La diferencia entre ambos elementos es que uno está girado en sentido de las manecillas del reloj y el elemento 2 está girado en sentido contrario a las manecillas del reloj, la posición alternada de estos elementos proporcionará un giro del fluido en direcciones contrarias a lo largo de la trayectoria que éste cubrirá a lo largo de la tubería. La forma característica asemeja una hélice tridimensional o mejor conocido como ADN como se observa en la figura 3.20.

La colocación de estos elementos proporcionará un mezclado efectivo y en una corta distancia, pero disminuyendo la velocidad y la presión del fluido aunque no de una manera considerable como se demostrará más tarde.

#### Mezclador CCADET

El segundo diseño se muestra a continuación, y tuvo que ser rediseñado debido a las dificultades de construcción, así decidimos un modelo más sencillo de construir sin descuidar las demás variables.

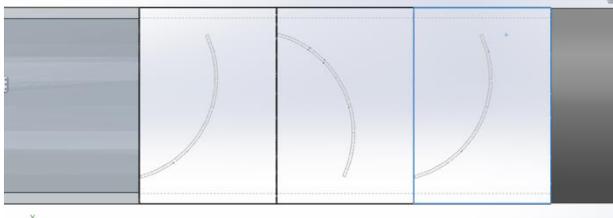


*Figura 3.21. Elemento individual del mezclador CCADET. Como vemos es una placa doblada con una geometría que permite al fluido transitar pero que a la vez sirve de obstáculo con el fin de promover el movimiento molecular.*

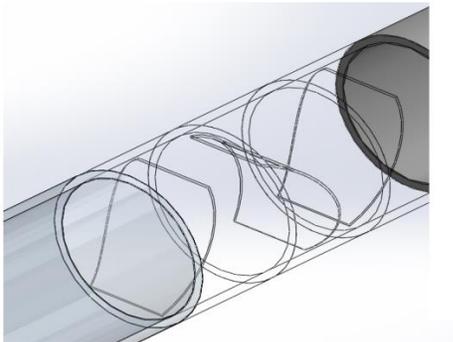
El elemento posee un diseño que se adaptó a la sección de la tubería y posee la propiedad de ser de manufactura sencilla pero cumpliendo con los requerimientos de mezclado que se exigían.

Como ejercicio inicial se colocó solo un elemento, se realizaron las simulaciones y se concluyó que era necesario por lo menos uno más. Se procedió a colocar 2 elementos. Se llevaron a cabo las simulaciones correspondientes y se determinó que era necesario agregar un tercer elemento. Una vez que se ensambló el mezclador con 3 elementos, se procedió a realizar las simulaciones correspondientes y los resultados mejoraron satisfactoriamente.

Los elementos se sueldan a la tubería alternando su posición con respecto al flujo para que el fluido cambie de dirección y se mezclen los reactivos durante el tránsito, sin disminuir demasiado la presión dentro de la tubería como se mencionó antes, formando el arreglo final que se muestra a continuación en la figura 3.22 y 3.23:



*Figura 3.22. Vista lateral del mezclador.*



*Figura 3.23. Se alternaron 180° con el fin de promover el movimiento del fluido y al alternar los elementos nos garantiza que el fluido cambiará de dirección dando como resultado que las múltiples capas sean homogéneas a la salida de éste.*

Después de que se llevó a cabo esta etapa, se procede a realizar las simulaciones para obtener resultados cuantitativos que nos proporcionen datos que justifiquen la elección de alguno de los diseños propuestos.



*Mezclador estático industrial.*

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS**

---

## 4.1 ANALISIS DE RESULTADOS

---

### Simulación de los mezcladores

La simulación computacional es una herramienta poderosa para hacer un análisis previo de cómo se comportarán los fluidos dentro de un sistema en específico. Esto nos permitirá ahorrar tiempo y recursos ya que no será necesario construir todos los dispositivos que se tengan en mente, sino que se dibujarán y simularán mediante una herramienta de software previamente seleccionada para así evaluar su comportamiento, y en base a los resultados se hará una selección más acertada para el desarrollo óptimo del proyecto, los datos obtenidos serán esenciales para determinar los tiempos, la tasa de mezclado así como las velocidades y presiones finales, densidad y temperatura. El programa en el que se han realizado todas las simulaciones tiene los siguientes dos módulos:

- Simulación rápida de fluidos: el cual a través de un prototipado rápido nos arroja resultados con los cuales se puede tener una aproximación general de cómo va a funcionar el diseño y las modificaciones que se pueden hacer de tal forma que no se usen todos los recursos computacionales en los bosquejos iniciales, proporcionando un ahorro considerable de tiempo.
- Simulación de fluidos: Este es el paquete completo de simulación de flujo. Dentro de este módulo se obtienen los datos más confiables y los mallados más finos, las condiciones iniciales específicas para el sistema en análisis, así como los resultados particulares y más detallados, como el perfil de velocidades, el comportamiento en la superficie de los fluidos en un amplia gama de colores, los análisis de partículas y las concentraciones de los diferentes fluidos a mezclar, así como el detalle de dos casos analizados después de que el fluido ha transitado a través del mezclador estático.

Una de las propiedades que más interesa en este trabajo, es la densidad. Dicha propiedad nos da una idea de la cantidad de energía cinemática que se necesitará para que los fluidos se mezclen eficiente y rápidamente, la cual se ha medido en el laboratorio con muestras directamente proporcionadas por ASA. Es relevante hacer notar que las propiedades adicionales como conductividad térmica y viscosidad cinemática están determinadas a la misma temperatura que la densidad pero como se ha mencionado corresponden a datos obtenidos de la literatura disponible.

Para fines de no extender este trabajo, se explicará de manera breve los resultados obtenidos de un mezclador y al final se presentarán los resultados de manera comparativa de los otros 4 mezcladores con el fin de observar el comportamiento gráficamente de cada uno de ellos y así elegir el que mejores resultados arroje.

Las condiciones iniciales de operación fueron las siguientes:

$$\dot{Q} = 300 \text{ G/min}$$

$$T = 25^\circ\text{C}$$

$$P = P_{\text{atm}} = 101.325 \text{ Pa}$$

Tabla 10. Concentraciones analizadas.

Q Total G/min	Q KPS G/min - m <sup>3</sup> /s	Q BIO ALTO G/min - m <sup>3</sup> /s	Q BIO BAJO G/min - m <sup>3</sup> /s	% BIO-KPS	Q=VA
300	150 - 0.01	150 - 0.01		50	42.5531
300	225 - 0.014195	75 - 0.004732		75	42.5531
300	270 - 0.017034		30 - 0.001893	10	42.5531
300	297 - 0.018738		3 - 0.000189	1	42.5531

### Simulación del elemento helicoidal (“Kenics”).

(Concentración: 50% bio-kps, 50% kps)

El ensamble de los elementos se llevó a cabo en el módulo correspondiente del CAD y la pieza final que se analizará es la que se muestra en la figura 4.1:

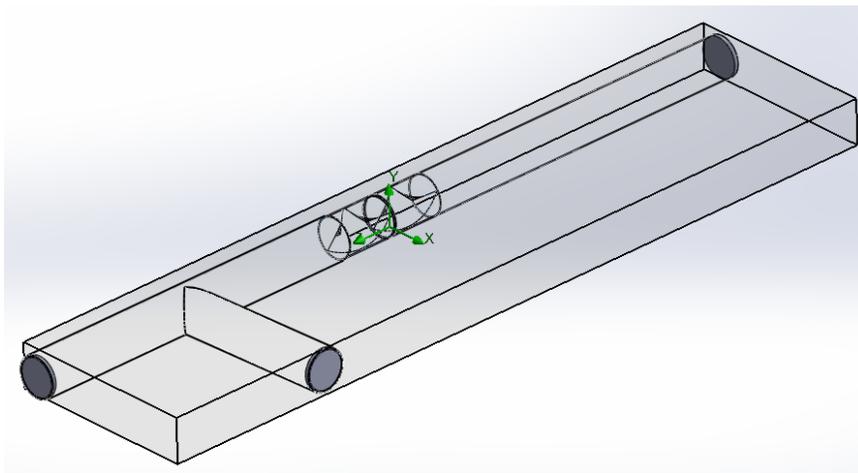
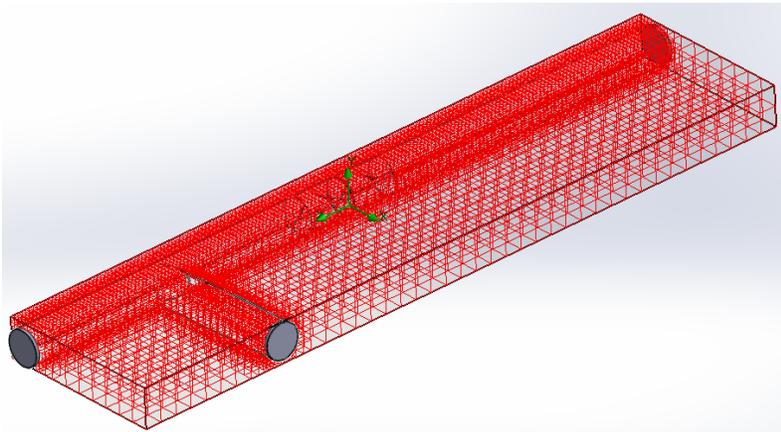


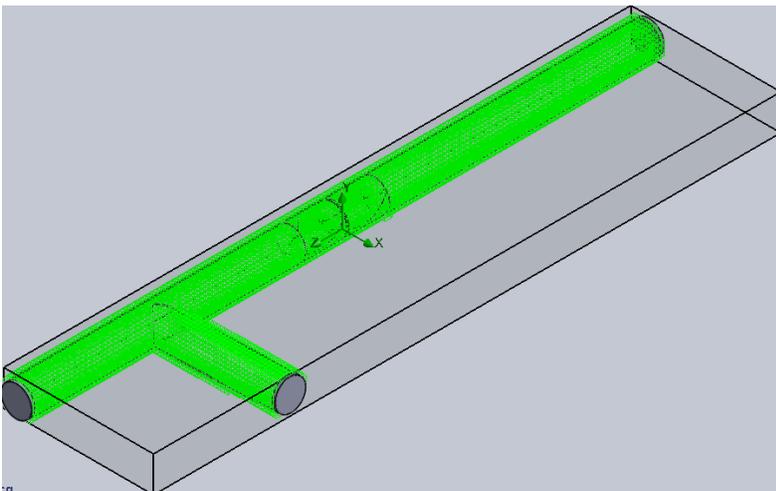
Figura 4.1. Elemento mezclador incorporado a la "T". Diseño actual.

Esta pieza se obtuvo soldando a la "T" un elemento en sentido de las manecillas del reloj y otro en el sentido contrario de las manecillas del reloj, y después se soldó a la tubería final la cual se conectará al sistema de alimentación de las aeronaves.

Igualmente que para la "T", el mallado del sistema final fue lo primero que se seleccionó para iniciar la simulación. La Figura 4.2 y 4.3 muestra dicho mallado.



*Figura 4.2. Vista trimétrica del mallado del ensamblaje final.*



*Figura 4.3 Detalle del mallado del área de flujo. Como se puede observar el mallado es más fino en las zonas, tanto donde está ubicado el mezclador como en las paredes y se vuelve más grueso mientras se acerca al centro de la tubería.*

Una vez que se ha realizado el mallado y se han insertado las condiciones iniciales así como también ya se han especificado los fluidos, se procede a correr la simulación. Esto se ha realizado cerrando la salida y entradas de los líquidos y seleccionando una región de análisis, la cual es toda la tubería y los elementos de interés.

Los resultados de la mezcla del bio-kps y el kps se muestran a continuación en la figura 4.4:

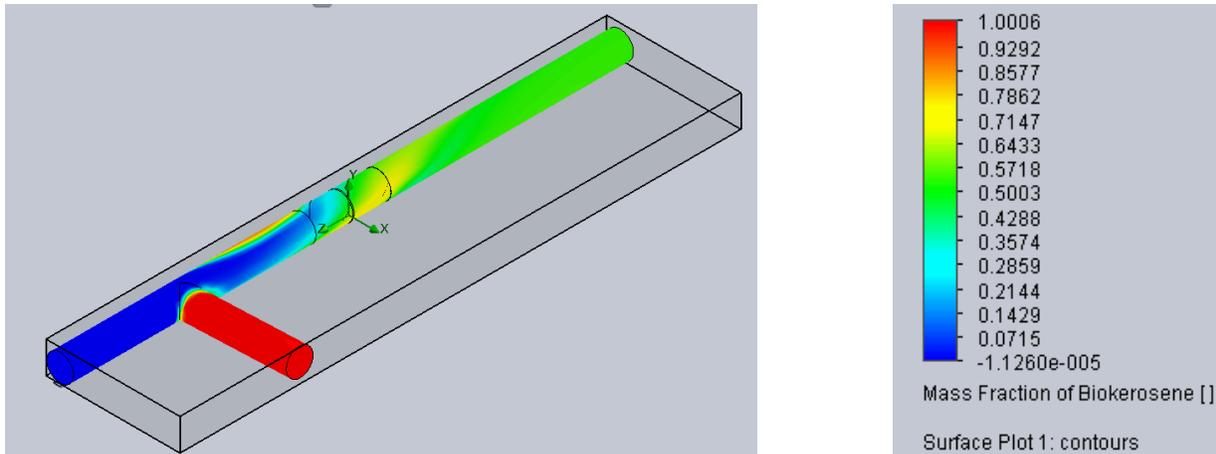


Figura 4.4. Vista superficial de la región de análisis. Así como tabla de valores.

Como se puede observar en la Figura 4.4, antes de la “T” los 2 fluidos no se mezclan de forma superficial, se observan regiones completamente azules. Una vez que han pasado ese punto las regiones verdes nos indican que el mezclado es homogéneo en su totalidad y esto se observa claramente en las regiones a la salida del mezclador. Los matices del rojo o del azul nos indican como un fluido domina sobre el otro según sea el caso. Para los colores azules claro o cian se supondrá concentración mayor del kps y para los colores naranja o amarillo se supondrá mayor concentración de bio-kps. Así la región verde nos indicara una mezcla homogénea, obviamente, de ambos. En la figura 4.4 se puede observar una región verde en su totalidad, orillándonos a suponer mezcla 100% homogénea. Un análisis de partículas nos arroja los siguientes resultados Figura 4.5:

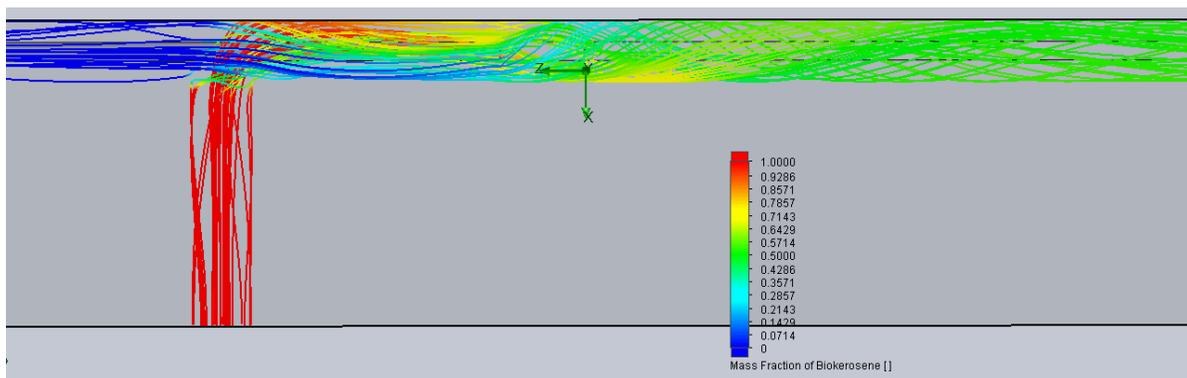


Figura 4.5. Análisis de partículas de las diferentes regiones del sistema.

La concentración usada, como ya se mencionó, fue del 50% bio-kps 50% kps y los resultados observados fueron muy favorables. Ahora haciendo un análisis por fracción de masa de bio-kps y haciendo un corte en la T, a 1 diámetro de la misma antes del mezclador, en el mezclador, a la salida del mezclador, y

después a 20 cm cada una de la muestras, obteniendo los cortes transversales de la Figura 4.6 y el detalle de la T en la Figura 4.7:

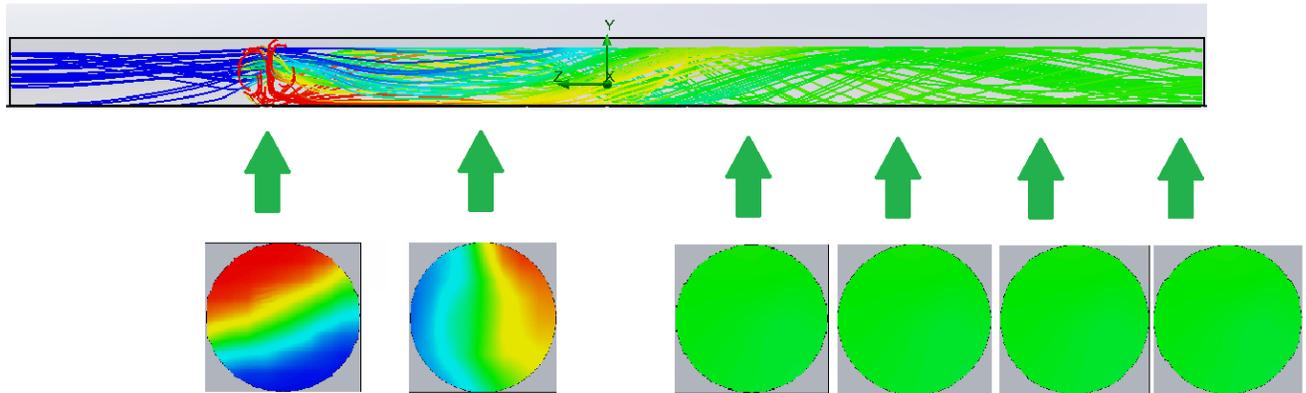


Figura 4.6 Corte transversal de izquierda a derecha: en la T. Antes de entrar al mezclador. A la salida del mezclador. A 20 cm. fuera del mezclador. A 40 cm. fuera del mezclador y a 60cm fuera del mezclador.

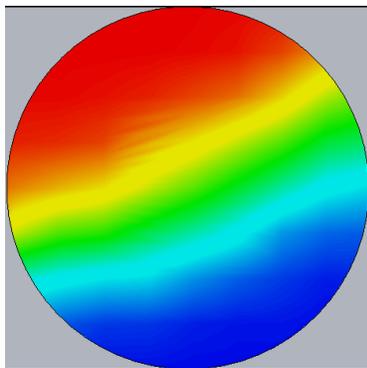


Figura 4.7. Como se puede observar en el detalle de la figura 4.7 la zona azul es la zona donde hay una concentración mayor de kps y los matices de ese tono indican su mezcla con el componente rojo (bio-kps) y de la misma forma el rojo indica una concentración mayor de bio-kps y sus matices más bajos indican mezcla con el componente azul. La zona verde indica una concentración del 50% de ambos lo que nos lleva a concluir que en la región central se ubica la fracción necesaria ideal, es decir que en ésta región se igualan sus propiedades.

#### Perfil de densidad

La simulación anterior muestra una vista superficial de cómo se comporta la fracción de masa a lo largo de todo el trayecto de los fluidos.

A continuación este trabajo se concentrará en la densidad, para la cual se analizó el sistema y se obtuvieron diversos resultados. La siguiente figura obtenida (Figura 4.8) es resultado de la misma simulación, nos muestra el comportamiento desde la "T" y hasta que el fluido abandona la sección de análisis así como los cortes realizados: en la "T" donde los fluidos convergen, antes del mezclador, a la salida del mezclador, 20, 40 y 60 cm después de que el fluido abandonó el mezclador. Como se puede observar, la densidad se comporta de manera casi lineal y esto es posible gracias a la gran similitud que

existe entre las densidades de ambos fluidos y por lo tanto se comporta siguiendo la regla de mezclado en donde (Figura 4.8):

$$\rho_{promedio} = (\rho * \%volumetrica\ del\ biokps) + (\rho * \%volumetrica\ del\ kps)$$

Ejemplo:

Regla de mezclado  $\rho_{promedio} = (750)*(0.5) + (830)*(0.5) = 790$  relación lineal.

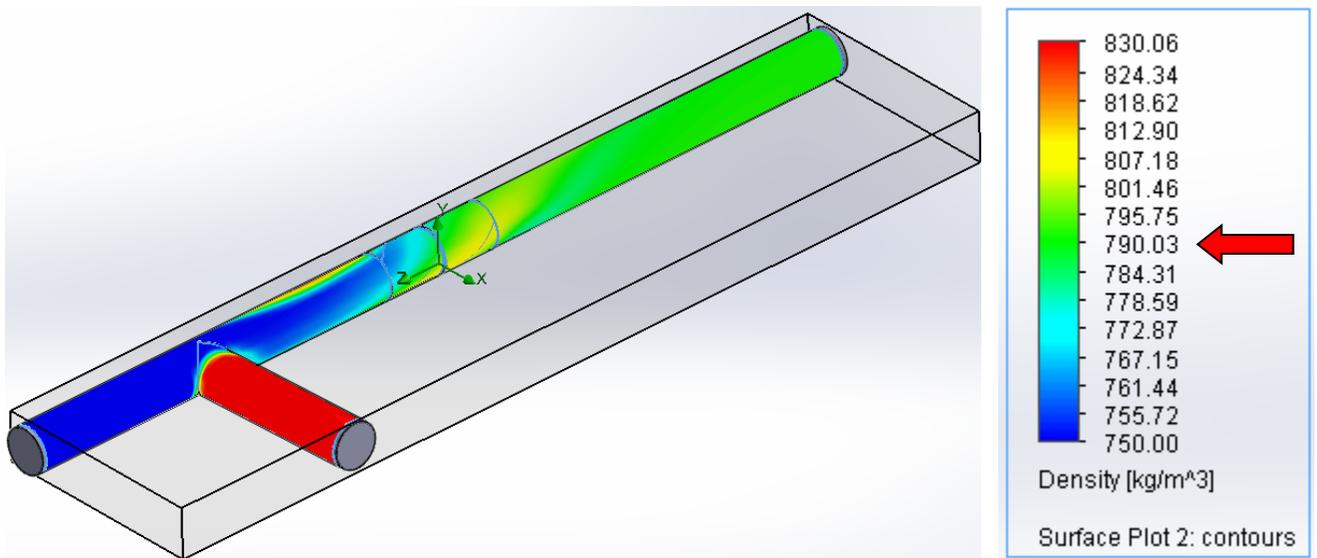
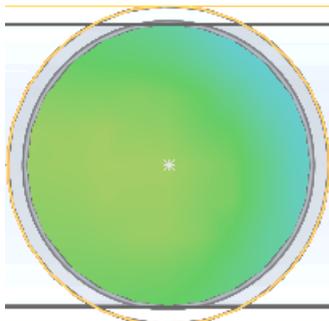


Figura 4.8. Análisis de partículas y comportamiento de la densidad en diferentes distancias.

La figura 4.8 muestra la densidad por separado de ambos y su evolución a lo largo de toda la trayectoria de mezclado, cuando supera al mezclador, y como se obtiene una mezcla homogénea al final.

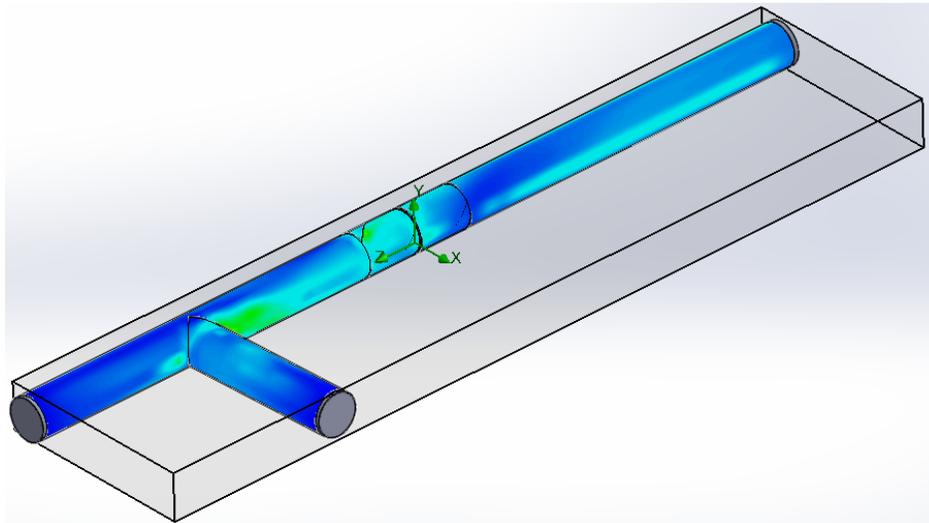


El detalle de la Figura 4.9 muestra como la densidad varía una vez que ha salido del mezclador. Se puede observar una región de color cian (azul claro) la cual indica que en esta región aún las propiedades no son homogéneas. También se alcanza a distinguir una tenue región amarilla, esta indica que hay una pequeña concentración de bio-kps aun sin mezclar totalmente. Sin embargo el 100% de mezcla se alcanzará en la siguiente etapa.

Figura 4.9. Detalle a 40 cm a la salida del mezclador.

*Vorticidad*

La Vorticidad superficial del sistema en análisis se obtuvo después de crear una vista superficial de la simulación en donde se agregan los parámetros que se desean conocer así como la resolución y el área que se desea analizar. Después de haber proporcionado estos datos obtenemos lo referente a la figura 4.10. Esta imagen proporciona de manera específica cuáles son los puntos en donde esta propiedad alcanza sus valores máximos. Las regiones rojas alcanzarán valores de hasta  $144.53 \left[ \frac{1}{s} \right]$  y las regiones azules indican las regiones en donde se alcanzará la menor vorticidad que en ocasiones será casi de cero. También se puede observar como las regiones más críticas se encuentran en las esquinas de la T y cuando el fluido transita por el elemento mezclador.



*Figura 4.10. Vista desde la superficie de la vorticidad.*

*Presión*

La presión es sin duda la propiedad de mayor interés, después de la fracción de masa y esto se debe a las condiciones de operación del sistema en el sitio (ASA).

Las imágenes 4.11 y 4.12 pertenecen a los datos obtenidos a la presión total dentro del sistema, y se observa el código de colores con la variación de la presión.

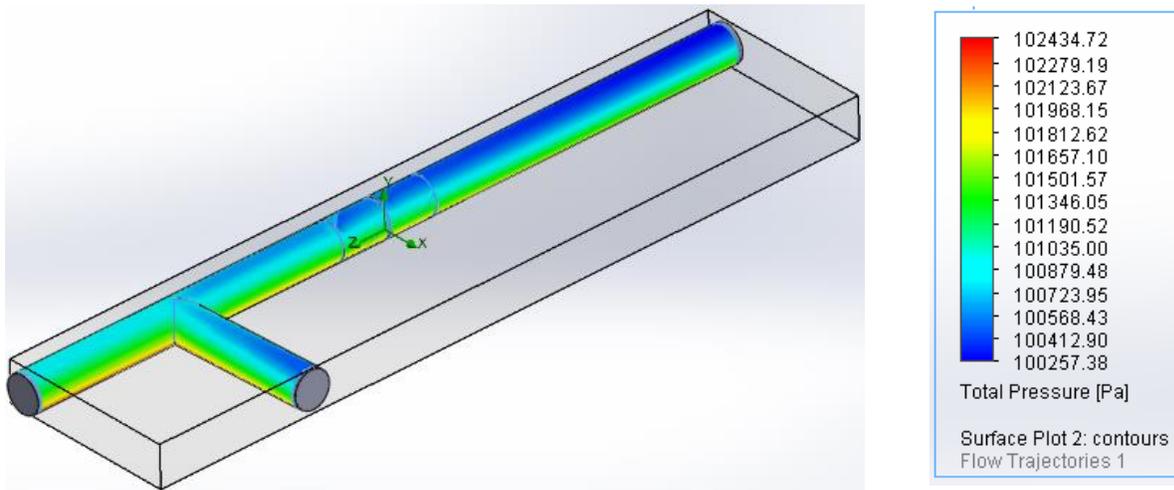


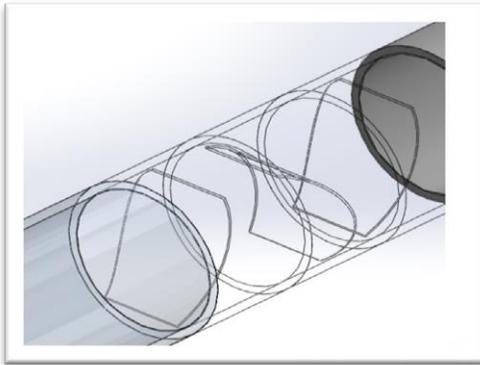
Figura 4.11. Vista del comportamiento de la presión total dentro del sistema. Figura 4.12. Código de colores de la presión total.

La figura 4.11 muestra el comportamiento de la presión dentro del sistema. Como se puede observar hay un cambio en la coloración dentro del sistema. Sin embargo al observar la Figura 4.12 en donde se encuentra la variación de esta podemos concluir que es muy pequeña con respecto a la inicial ocasionando cambios despreciables.

## Simulación del diseño CCADET

De igual forma se realizaron varias simulaciones por computadora para el diseño llamado CCADET, aunque los dos han sido diseñados para el mismo fin, se decidió llamarlo así con el fin de identificarlo fácilmente. Las simulaciones realizadas constituyen:

- Presión
- Vorticidad
- Concentración de bio-kps
- Concentración de kps
- Velocidad



La presión fue uno de los elementos más importantes a analizar debido a que una caída muy importante de presión evitaría que el sistema funcionara tal y como estaba planeado. Esto debido principalmente a que se requeriría de la instalación de una bomba adicional si es que ésta caía drásticamente, disminuyendo las ventajas que este ofrecería, sin embargo, esto no fue así como se podrá ver más adelante. Mientras tanto en la figura 4.13 se tiene el arreglo final de los elementos dentro de la sección de tubería.

Figura 4.13. Imagen del arreglo final del mezclador. Se pueden observar 3 placas alternadas de tal forma que permitan el tránsito del fluido y a la vez promuevan su mezclado.

#### Concentración de kps y bio-kps

Dentro del análisis uno de los más importantes factores es la concentración de ambos fluidos para obtener un buen mezclado, ya que la concentración de los combustibles debe ser del 50-50 al final de la sección tubular, y es vital monitorear el comportamiento de estos a lo largo de nuestro sistema.

#### Concentración 50%-50%

En este arreglo la tubería de alta presión de 4" es abierta para permitir el flujo de bio-kps que se encuentra con el flujo del kps que transita de manera perpendicular a ésta y comienza el proceso de mezclado. Aunque es mínimo, las corrientes comienzan a mezclarse. En la figura 4.14 se puede observar como el flujo de kps a una presión dada (naranja), que viene por una tubería de 4" se empieza a mezclar justo cuando la corriente de bio-kps a una presión diferente (roja), se incorpora a la tubería principal. Una vez que transitan por la sección previa llegan a la zona donde se encuentra el mezclador. Aquí se juntan las corrientes y comienzan a mezclarse, en la Figura 4.14 y 4.15 se observa el comportamiento de la presión total en el sistema.

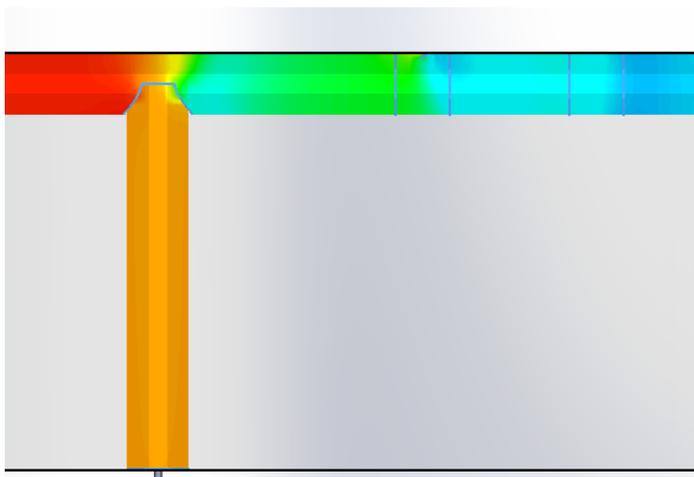


Figura 4.14. Vista superficial de la presión total.

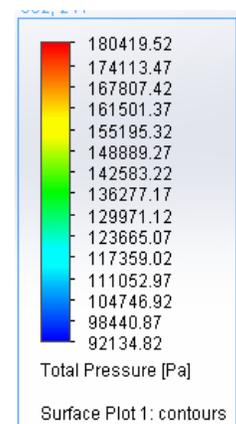


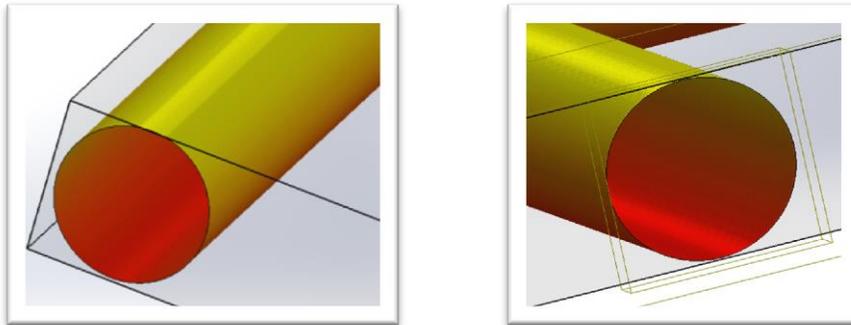
Figura 4.15. Código de colores

En la figura 4.14 se muestran los resultados de la caída de presión que, a un caudal total de 300 gal/min, se pudo observar de acuerdo a las especificaciones correspondientes de la concentración dada, en este caso 50% kps- 50% bio-kps. El código de colores que se utilizó en esta prueba se observa en la figura 4.15.

En la Figura 4.16 se puede observar la presión máxima que alcanzará este experimento, que para este caso es de 180.4 kPa y la presión mínima será aproximadamente de 92.1 kPa. Teniendo en cuenta estos datos que la simulación arrojó y obteniendo un porcentaje aproximado de la caída de presión según la siguiente relación:

$$\% = \frac{91200 - 84925}{91200} * 100 = 6.880482456\%$$

El lector podrá constatar que la caída de presión en la tubería de 4" y con un caudal de 300 gal/ min es de aproximadamente 7% de la presión inicial, lo cual no representa una caída importante en dicha propiedad. También se observa que las paredes de la tubería son las que alcanzan la mayor presión en todo el sistema. Lo cual se muestra en la Figura 4.16.



*Figura 4.16. Presión en el interior de la tubería. El color rojo indica un máximo de ésta dentro del sistema. Aproximadamente estará entre el límite máximo de 180 kPa.*

El área en donde se encuentra la transición más importante de presión, es el área del mezclador. En esta área podemos observar un color verde y azul claro que nos indica cómo es que ésta cae de manera casi precipitada en relación al cambio de coloración, aunque en la realidad no de una manera muy brusca ya que como se mencionó antes el  $\Delta P$  no es crítico. Figura 4.17.

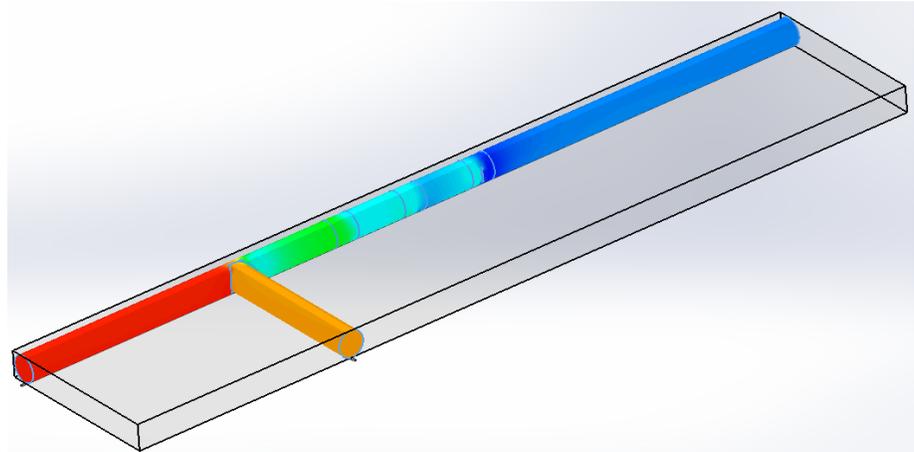
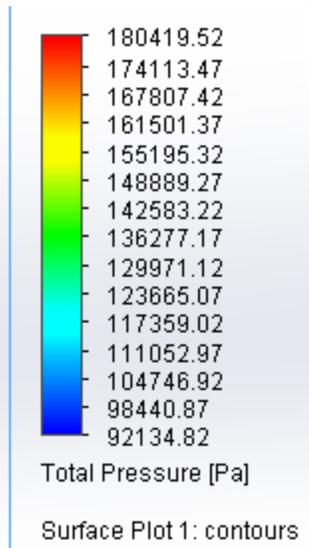


Figura 4.17. Caída de presión durante el tránsito completo del fluido a través del sistema final. A la derecha se puede observar la tabla que corresponde al código de colores relacionado con la presión.

#### La vorticidad

La vorticidad que experimentan los fluidos dentro de la tubería se puede definir a partir de la rotación del mismo, la mayor rotación que se observa, Figura 4.18 y 4.19, está de nuevo en el área dónde se encuentra el elemento mezclador lo cual es de esperar por obvias razones. Claramente las zonas donde menos vorticidad se presenta es en donde el flujo se encuentra agrupado en forma de láminas por más tiempo. Otro detalle importante que se debe observar, es que a la salida de las tuberías que incorporan perpendicularmente sus respectivos fluidos, se observa una pequeña línea de color cian que nos indica que existe una leve porción de ésta y al salir del elemento mezclador, se observa otra muestra de ello.

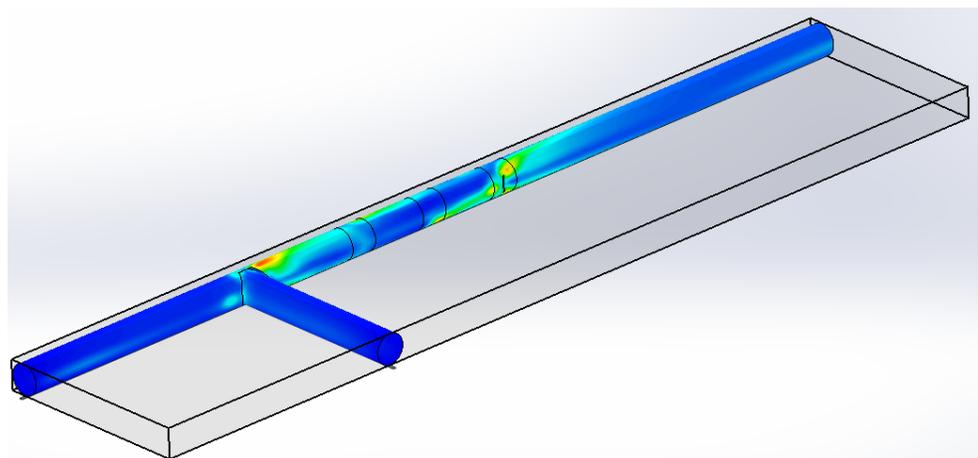
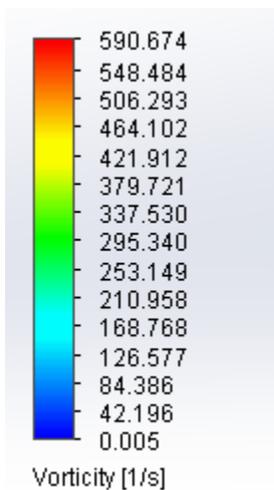


Figura 4.18. Vorticidad en el sistema completo. Las regiones más claras nos muestran una actividad mayor de ésta propiedad.

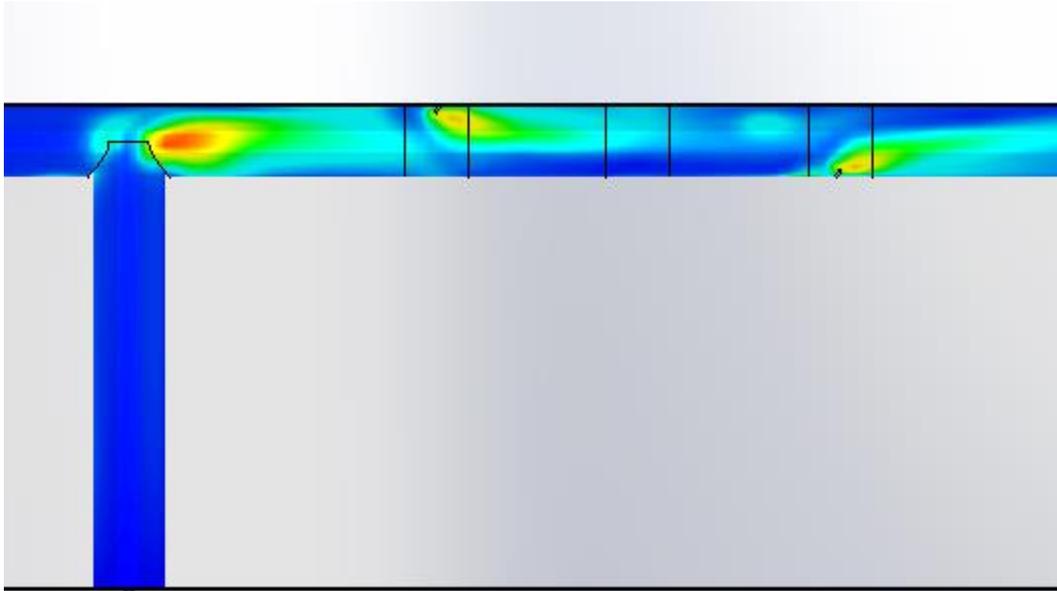


Figura 4.19. Detalle de cómo se comporta la vorticidad cuando el fluido transita por el mezclador estático. Este detalle muestra la zona del mezclador en donde la región verde muestra la más alta actividad de la vorticidad.

#### Concentración de la mezcla

Se puede observar que la mezcla de estos colores primarios arroja una gama importante de matices los cuales nos indican el porcentaje de mezclado. Así se puede identificar que el amarillo indica zonas en donde hay una mayor concentración de bio-kps, mientras que en las zonas azules y sus matices se encontrará una mayor concentración de kps. La combinación homogénea de ambos estará dada por el color verde. Así lo muestra la figura 4.20.

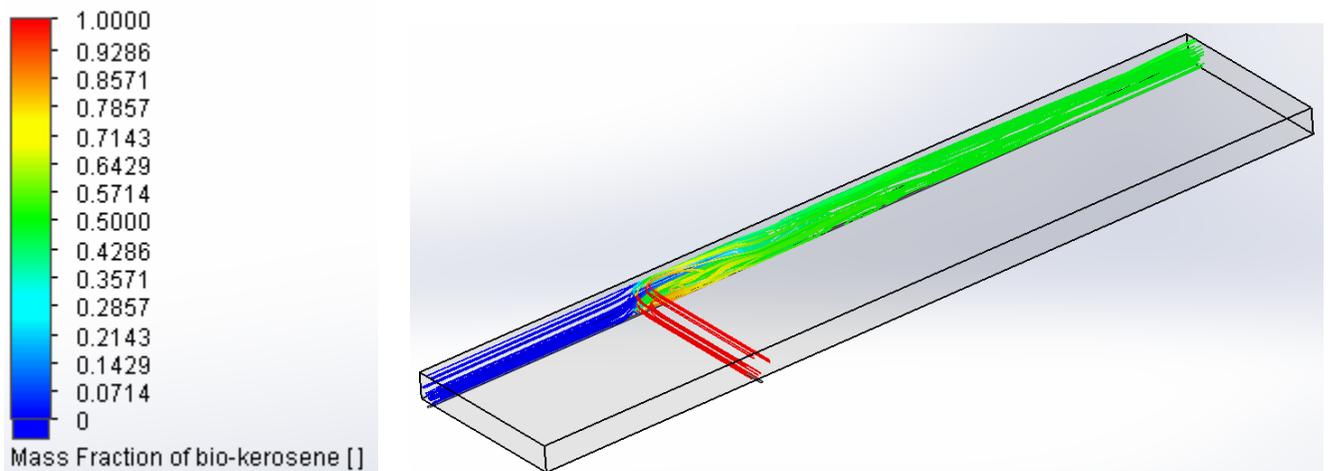


Figura 4.20. Se muestra el comportamiento interno de las líneas de corriente de los combustibles. Así como la tabla en donde el 1 es 100% bio-queroseno, el 0 es 100% fósil y el 0.5 se trata de mezcla homogénea.

A continuación se muestra la figura 4.21 la cual proporciona una vista lateral del sistema junto con una serie de cortes transversales de la tubería en donde se puede observar la concentración a lo largo de 6 diferentes posiciones las cuales se definen en base a un criterio que se explica en el siguiente apartado.

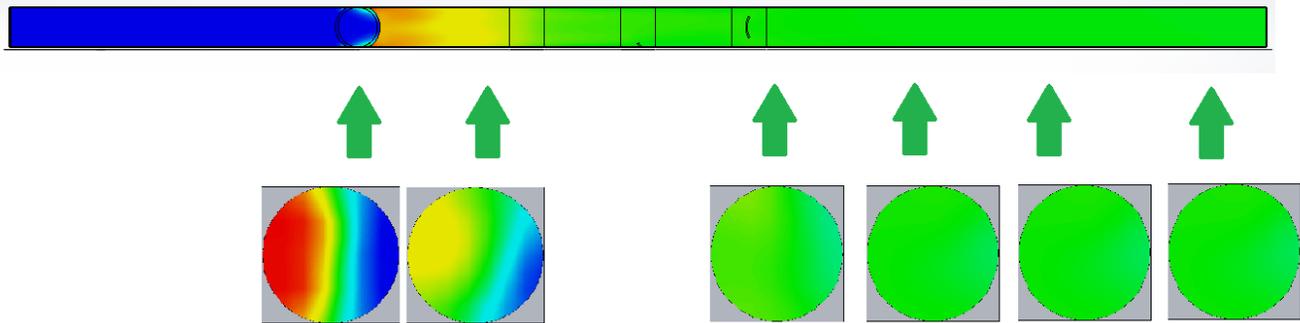


Figura 4.21. Vista de los cortes transversales del sistema cuando entran en la misma concentración queroseno y bioqueroseno, de izquierda a derecha: en la T. Antes de entrar al mezclador. A la salida del mezclador. A 20 cm. fuera del mezclador. A 40 cm. fuera del mezclador y a 60 cm fuera del mezclador.

## 4.2 ANÁLISIS DE MEZCLAS

Por ahora este trabajo solamente se ha enfocado, casi de forma cualitativa en los resultados obtenidos. Una forma de obtener resultados numéricos a través de los resultados que se obtuvieron de las simulaciones por computadora, es analizando las imágenes obtenidas de los cortes transversales que se realizaron en 4 posiciones previamente utilizadas pero no definidas, las cuales se describen a continuación en la tabla 11:

Sección	Descripción
A	Imagen tomada en la sección donde se encuentran ambos fluidos y puede reconocerse fácilmente dado que es en ésta zona donde es más evidente la diferencia entre ellos.
B	Antes del entrar al mezclador estático.
C	A la salida del mezclador.
D,E,F	20,40 o 60 cm después, según corresponda, de salir del mezclador

Tabla 11. Secciones donde se describe la posición de la toma de muestra.

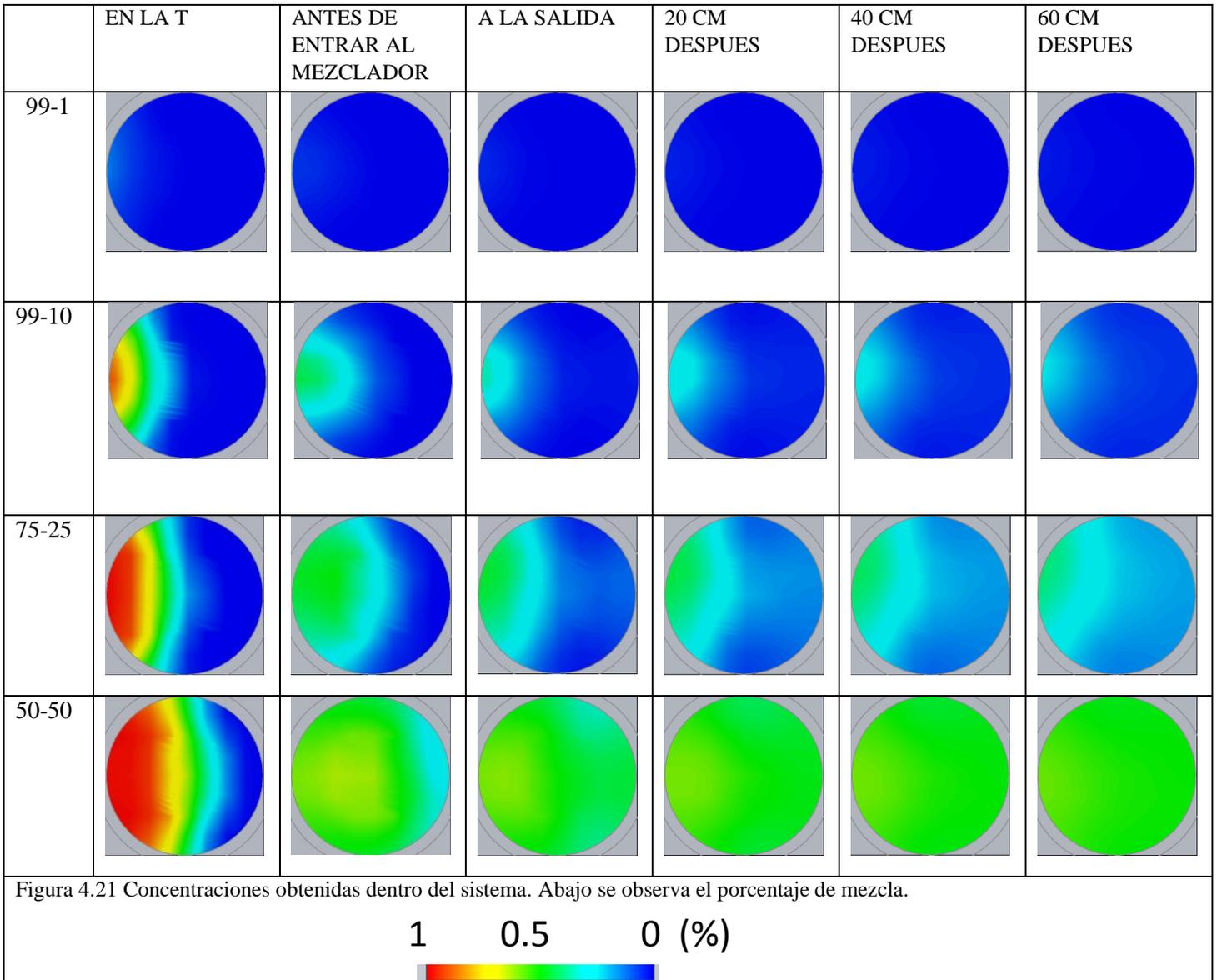
Los diferentes cortes que se realizaron en las secciones previamente definidas de la tubería se muestran en esta sección del trabajo. A partir de los resultados obtenidos tomamos cortes diferenciados de las secciones de la tubería de forma que se mantuvo constante para todas las concentraciones las distancias de las cuales se tomaron dichas imágenes muestra. Estas imágenes se analizarán de manera independiente en forma numérica de manera que podamos obtener cuantitativamente un comportamiento gráfico de cómo es que los fluidos se mezclan en nuestro sistema.

Este análisis se realizará con un programa llamado “ImageJ”. Este es un programa de procesamiento de imágenes digitales programado por Java. Y en el cual se pueden desarrollar plug-ins de escaneo personalizado, análisis y procesamiento usando el editor incluido en “ImageJ” y un Java. Estas imágenes fueron obtenidas realizando un corte transversal, dependiendo del lugar en dónde quisiéramos obtener dicha imagen. Y estas se describirán a continuación para cada tipo de mezclador en particular.

Inicialmente se mostrarán los resultados obtenidos con el diseñado llamado CCADET, y se colocarán 1, 2 y 3 elementos, posteriormente se presentarán los otro dos diseños: el Kenics y el Komax.

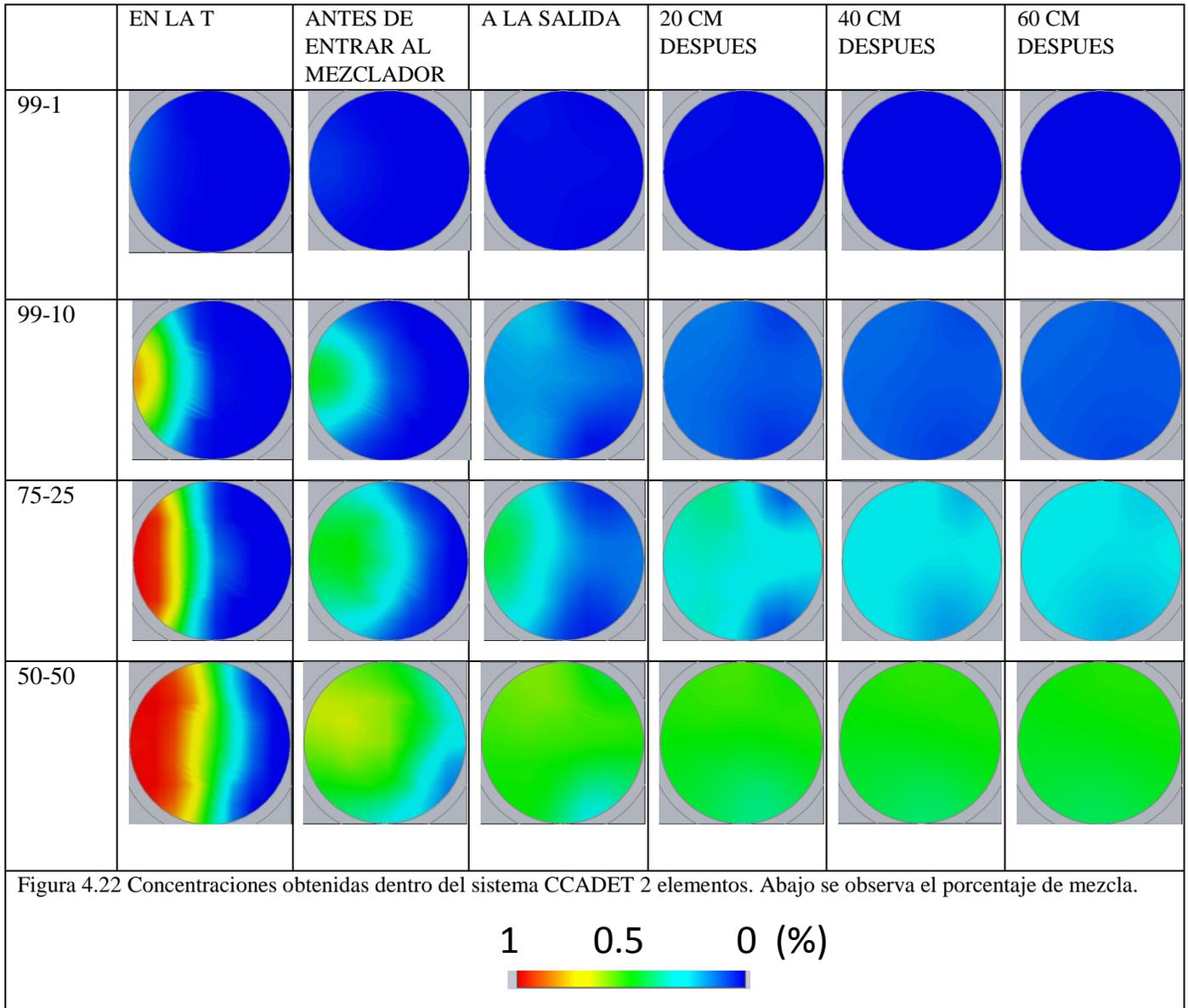
CCADET 1 ELEMENTO

Para comprobar de manera directa la eficacia del elemento diseñado, se realizaron 3 mezcladores diferentes con el diseño que se le ha llamado CCADET. Primeramente se ha colocado un elemento y se han analizado las 4 concentraciones diferentes 99-1, 90-10, 75-25, 50 esto para la fracción de bioqueroseno, es decir la concentración a lo largo del tránsito por el sistema. El rojo representa el bioqueroseno y el azul el queroseno. A continuación los resultados en la Figura 4.21.



**CCADET 2 ELEMENTOS**

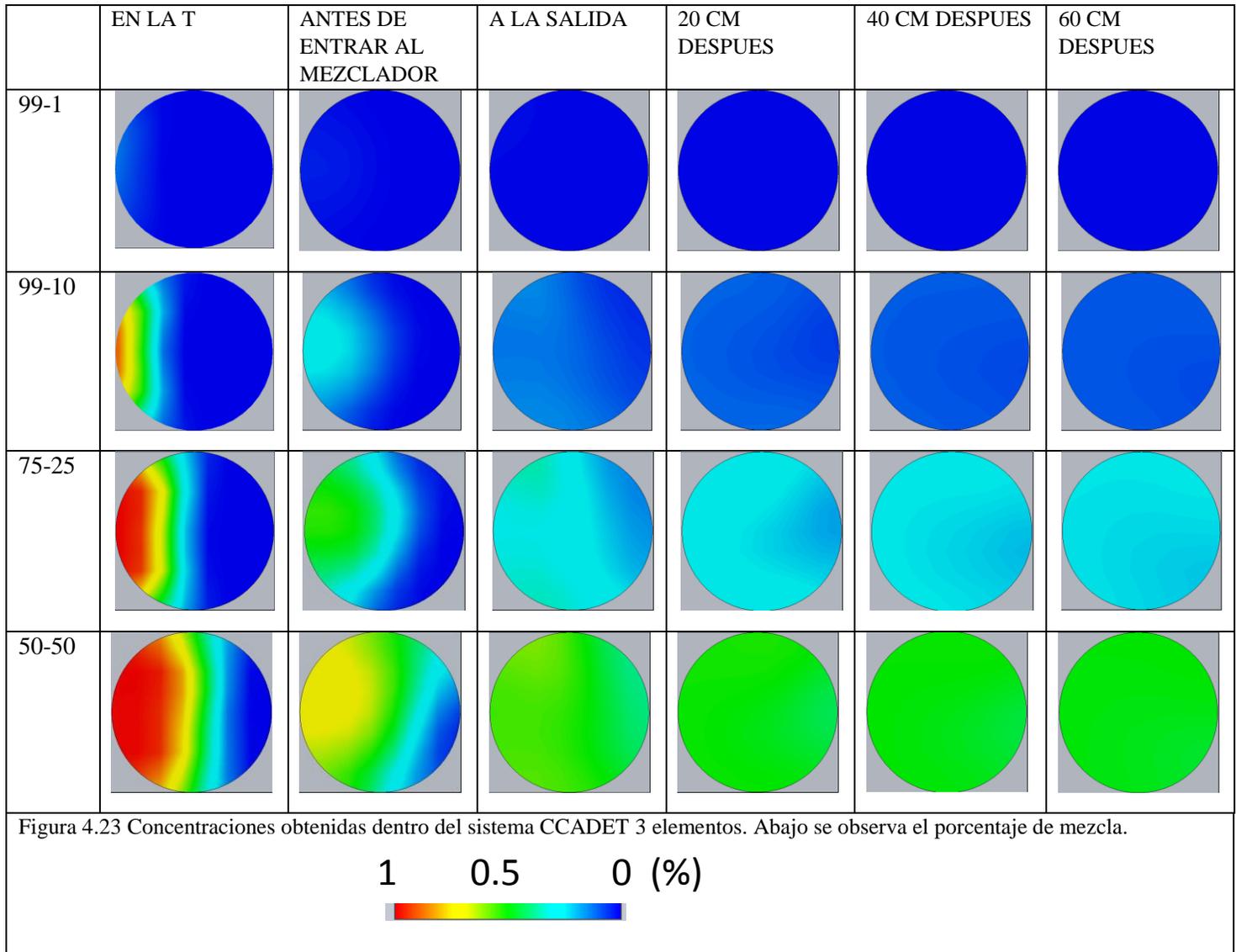
De la misma forma se ha realizado el procedimiento para 2 elementos y a continuación se muestran los resultados con diferentes concentraciones en la Figura 4.22.



**CCADET 3 ELEMENTOS**

Tres elementos fue la última opción considerada debido a las pérdidas de presión en el modelo con 4 elementos no incluido en este trabajo. A continuación se muestran los resultados en la Figura 4.23.

Concentración 99-1



**KMS**

El mezclador analizado a continuación se ha llamado kms con el fin de identificarlo, ya que la empresa puede diseñar el mezclador según las necesidades del cliente. Los resultados se muestran en la figura 4.24 también para el porcentaje de mezclado.

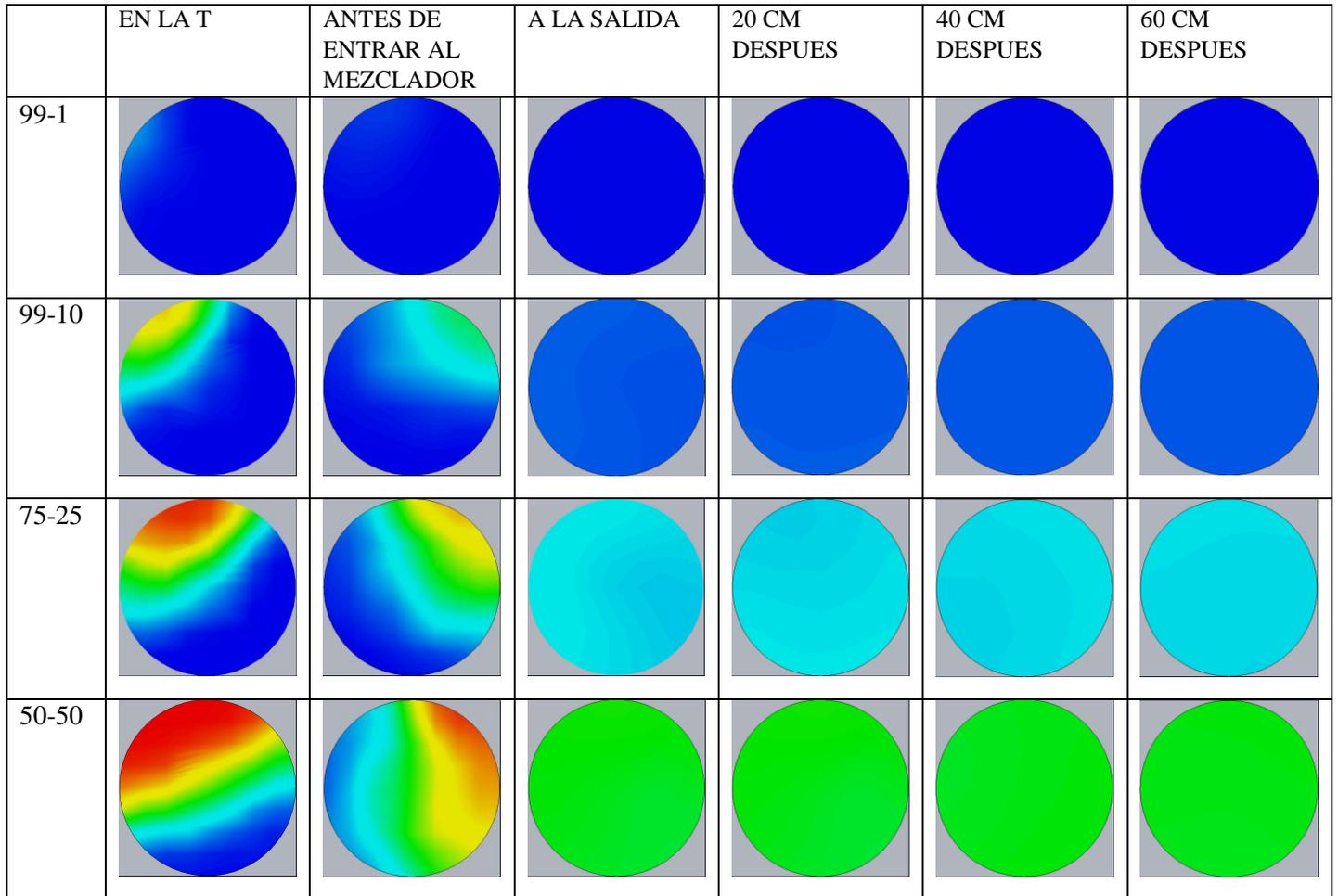
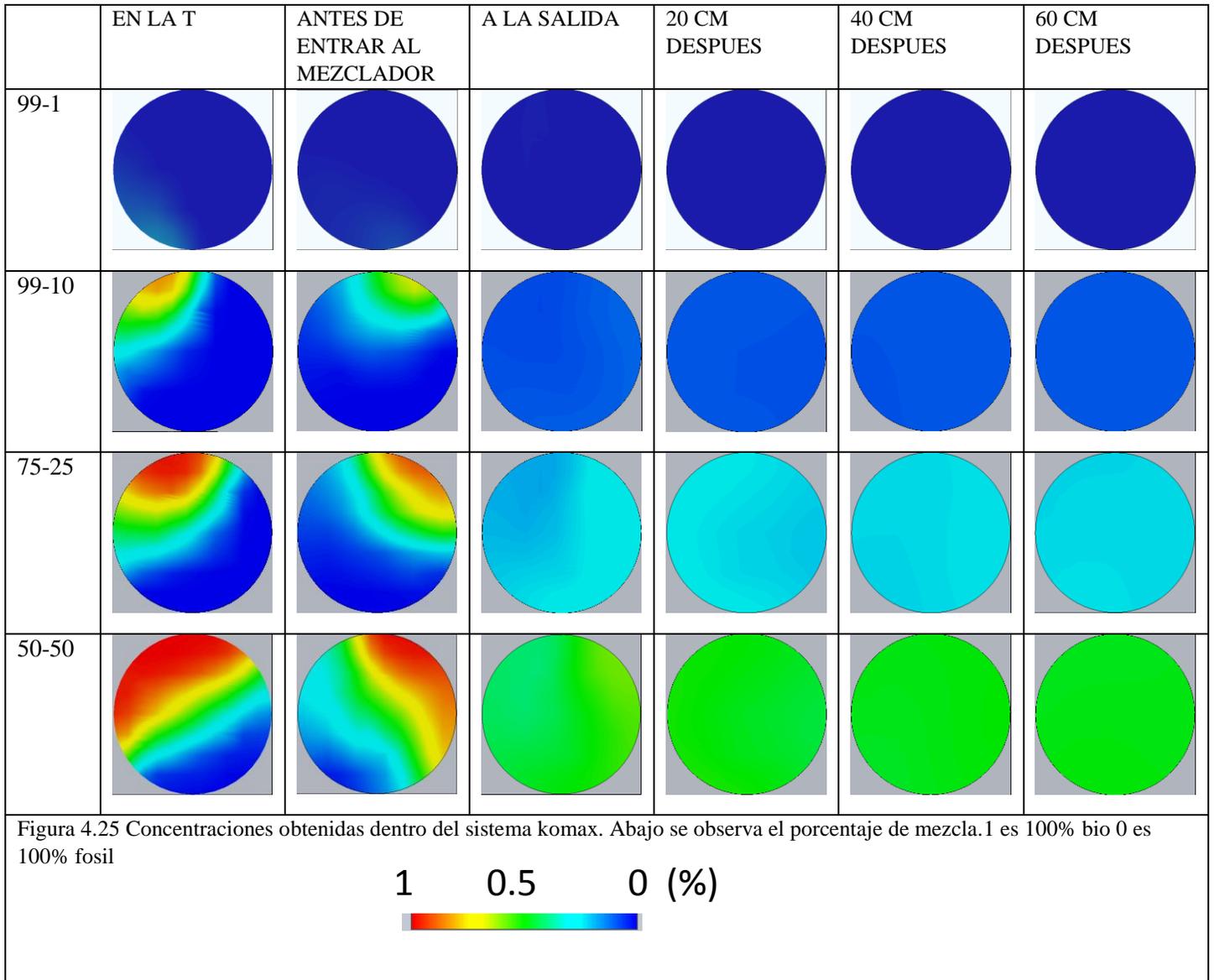


Figura 4.24 Concentraciones obtenidas dentro del sistema kms. Abajo se observa el porcentaje de mezcla.



KOMAX

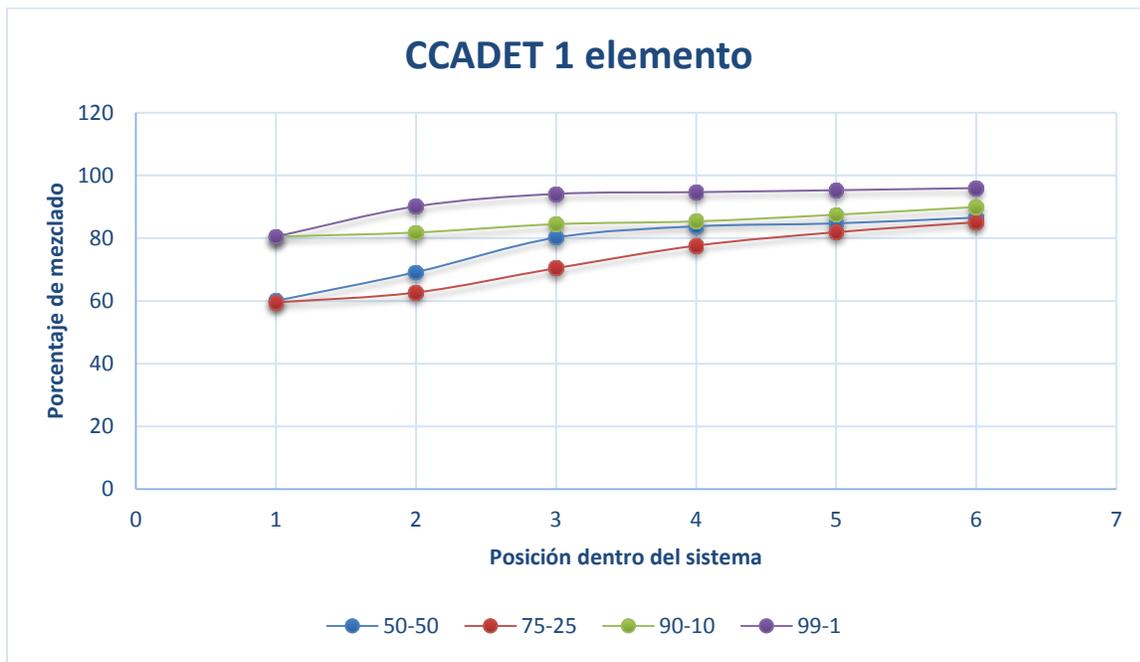
Este diseño que se realizó con fines comparativos, siguiendo el original que ésta empresa utiliza para fines de mezclado en sistemas cerrados y continuos. A continuación los resultados en la Figura 4.25.



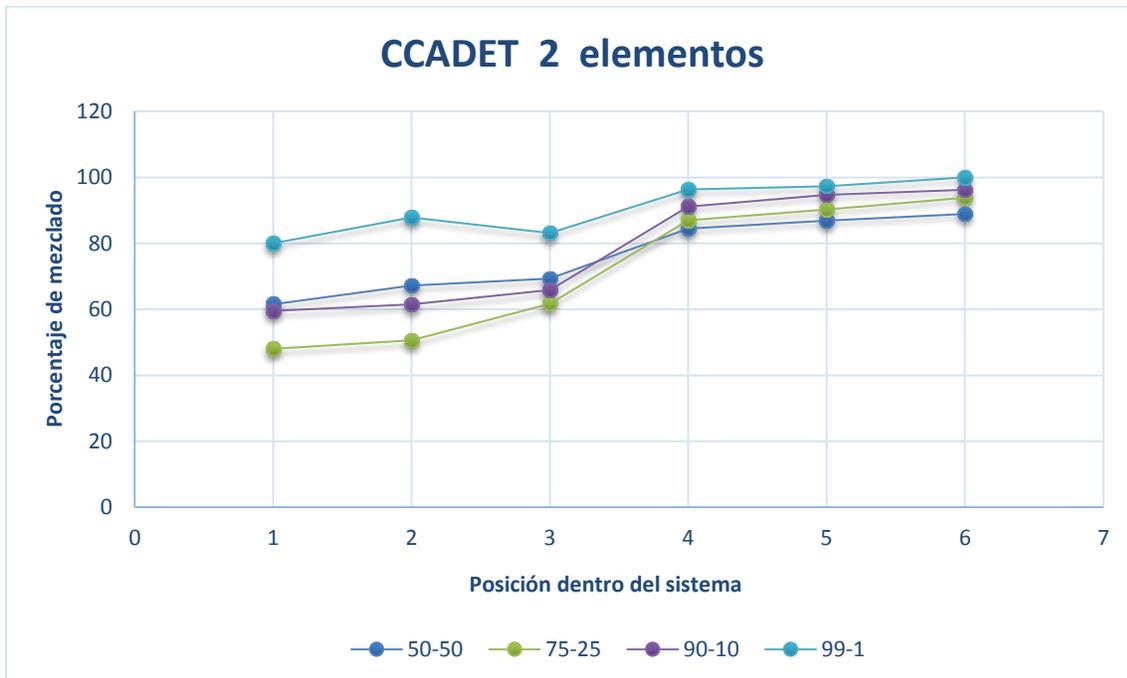
GÁFICAS DE RESULTADOS

Para las Gráficas que se muestran a continuación, la concentración es variable y el mezclador es constante, por lo que se observará que en cada gráfica hay 4 concentraciones diferentes, 50-50, 75-25, 90-10 y 99-1.

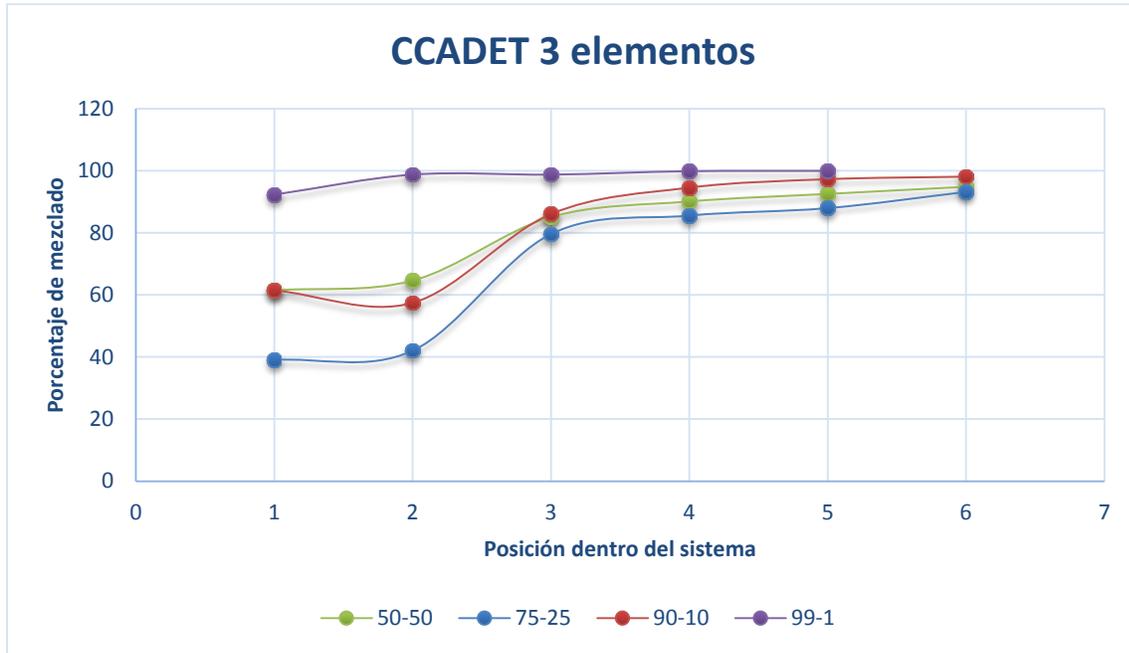
Una vez que se han analizado todas la imágenes y que se han presentado individualmente, los datos se vacían a una tabla y se grafican, así se obtiene como resultado el comportamiento de la desviación estándar. A través de este comportamiento se han construido las siguientes gráficas en donde se observa con mayor claridad su comportamiento, y se comparan con los 5 mezcladores. En cada una de ellas se observa el porcentaje de mezclado. Así los que alcancen el 100% en todas las concentraciones serán los mezcladores más eficientes y de forma inversa para los que no alcancen ese porcentaje.



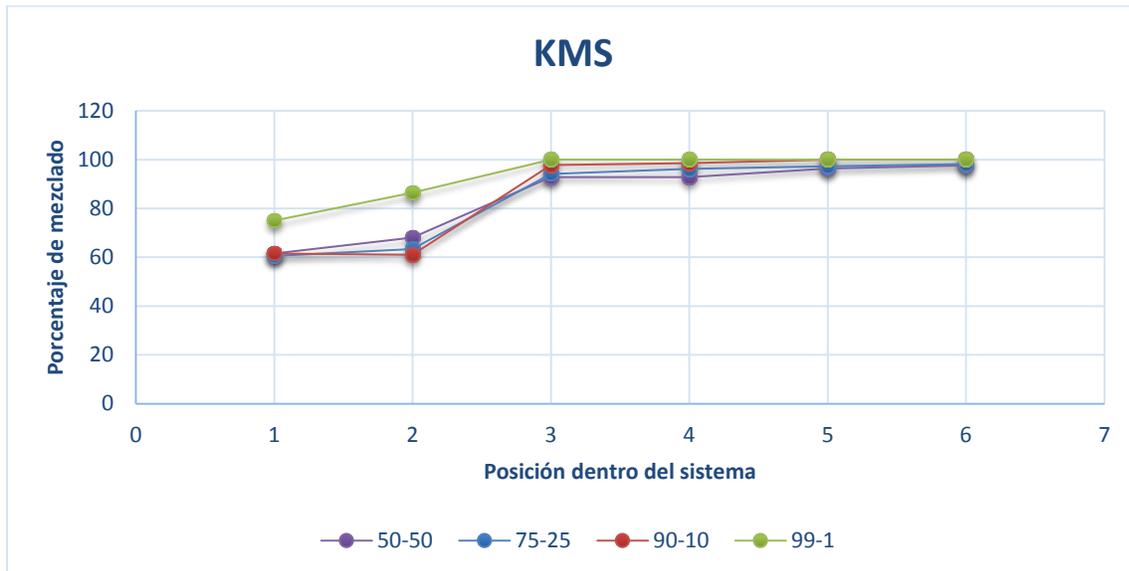
Gráfica 4. Porcentaje de mezclado contra posición dentro del sistema. La posición coincide de la misma forma con lo descrito al inicio de la sección.



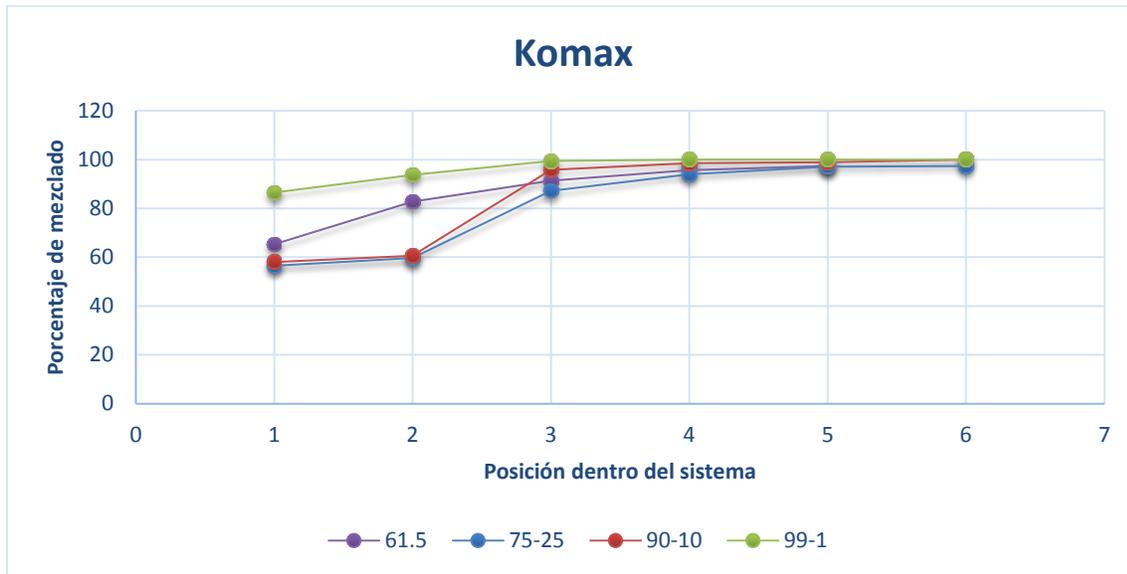
Gráfica 5. Porcentaje de mezclado contra posición en el sistema.



Gráfica 6. Porcentaje de mezclado contra posición en el sistema.



Gráfica 7. Porcentaje de mezclado contra posición en el sistema.



Gráfica 8. Porcentaje de mezclado contra posición en el sistema

Gracias a la información anterior, la elección del mezclador será más sencilla y respaldará la decisión final.

Para el sistema mezclador CCADET con 1 elemento la dosificación de los componentes no alcanza un nivel deseado, y se observa que en ninguno de los casos se alcanza el 100% de mezcla, es importante hacer notar que es posible que si tuviéramos un sistema en donde se tuviera a la salida del mismo, la libertad de colocar una tubería más larga, los elementos se mezclarían en algún punto debido a que la gráfica no se estabiliza en los 60 cm propuestos y es posible que lo hiciese en 1.5 m por lo tanto este modelo se ha descartado.

Para el sistema CCADET 2 elementos el mezclado se observa, también deficiente, excepto cuando se mezcla 99-1. Este es el más sencillo de todos los porcentajes a mezclar pero no es suficiente ya que la concentración 50-50 apenas alcanza un 87% aproximadamente.

El sistema CCADET 3 elementos es el diseño que alcanzó el porcentaje más alto de mezclado de todos los de este tipo. Cabe destacar lo sencillo del diseño y la alta dosificación que se logró.

Para el diseño kms y komax, se observa que el mezclado es altamente eficiente incluso desde la fase C (salida del mezclador) dotando a ambos diseños de la más alta valoración de este trabajo. Esto sin embargo no será determinante para la elección de los mismos.

### Decisión Final

Es sin embargo el mezclador llamado CCADET 3 elementos el elegido por el equipo de trabajo, debido principalmente a los problemas de construcción que conllevan tanto el modelo kms como el komax. A pesar de que se contaba con herramientas para su construcción, se decidió construir el más sencillo por obvias razones. Ya no se tomó tanto en cuenta la velocidad con que se mezclaban en un corto periodo de tiempo para los modelos comerciales, sino que se consultó con el equipo de trabajo del taller, cuál sería el más viable y rápido de construir. Los expertos del taller recomendaron éste por su sencillez, y ya que cubría los requerimientos técnicos del proyecto la decisión fue definitiva.



*Fuente: maquinado de un globo.*

## **CAPÍTULO 5**

### **CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO**

---

## 5.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Para llevar a cabo esta parte tan importante fue necesario realizar diversas actividades, las cuales se mencionarán brevemente y después se describirá detalladamente.

1. Generación de los planos correspondientes para los elementos
  2. Cotización de material a utilizar
  3. Programación de la maquina CNC para generar dichos elementos
  4. Rectificación del tubo
  5. Soldadura de los elementos
  6. Pieza final
- 
1. Generación de los planos correspondientes para los elementos

Esta actividad fue la más sencilla de realizar ya que los planos se obtuvieron directamente del programa utilizado. Los planos están descritos a continuación:

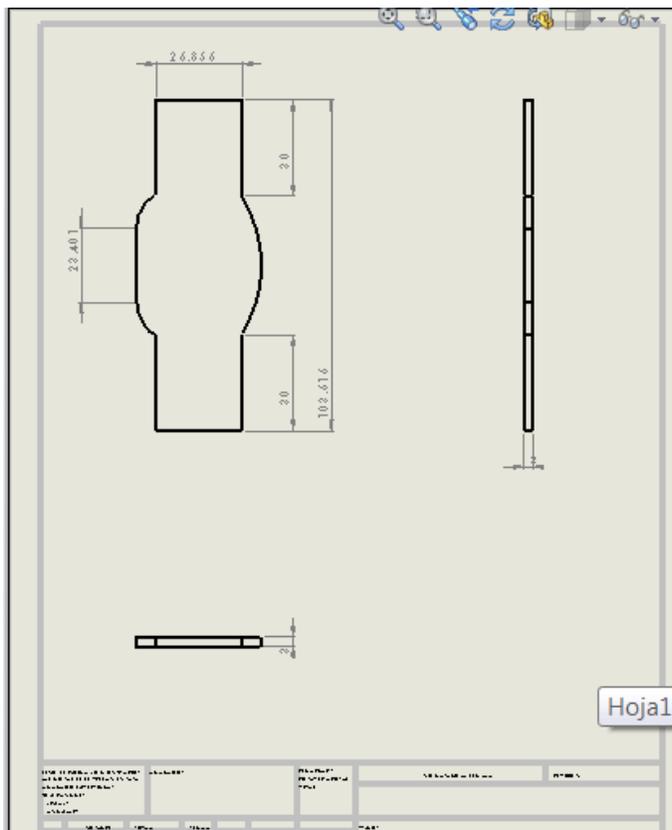
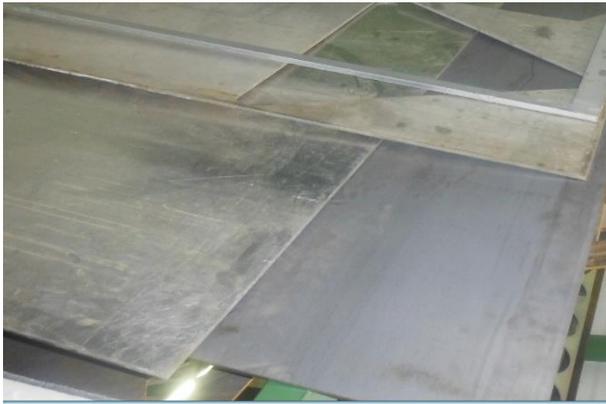


Figura 5.1. Planos obtenidos de la simulación.

### 2. Cotización de material a utilizar

La cotización del material fue inmediata pero el proveedor tardó un par de semanas, por lo tanto es la actividad que más tiempo se demoró. Se cotizó la placa de acero inoxidable y la tubería en el mismo lugar para intentar ganar tiempo y después de dos semanas se recibió el pedido. Las especificaciones fueron las siguientes:

- Tubería de 4 in ced. 40 de acero inoxidable.
- Placa de acero inoxidable de 3mm



*Figura 5.2. Placa cotizada en \$5800. Acero inoxidable 3mm de espesor 1.5m x 3m.*

El problema que se presentó en esta etapa fue que la mayoría de los proveedores solo venden 10 m de tubería y placas muy grandes, el proyecto solo necesitaba esencialmente 1 m de tubería y 1 m<sup>2</sup> de placa. Pero se compró un tubo de 10 m de largo y una placa de 4.5 m<sup>2</sup>.



*Maquina cortadora. Con esta máquina se cortó la original placa más grande y se obtuvo una pieza pequeña.*



*Placa pequeña obtenida de la placa*

*Figura 5.3. Herramientas utilizadas en la manufactura.*

### 3. Programación de la maquina VMC para generar dichos elementos.

Después de que se obtuvo una placa más pequeña se procedió a cortarla en una maquina especial tipo VMC. Estas herramientas tienen la característica de que aceptan códigos de varios programas y es más rápida y sencilla su manufactura. El plano fue proporcionado a los encargados del taller para ser cortada de acurdo a las especificaciones.



*Figura 5.4. En esta máquina se cortaron los elementos que serían insertados en la sección de tubería.  
Ubicación: CCADET.*



*Figura 5.5. Maquina cortando los elementos del mezclador.*

#### Imagen del elemento final

El elemento mezclador final se muestra en la figura 5.6. Este elemento se soldará posteriormente a la sección tubular y le dará forma al mezclador estático.



*Figura 5.6 Estos elementos fueron los producidos en el prototipado rápido, se fabricaron 4 elementos, uno más de los que se necesitaban por cuestiones de logística.*

### 4. Rectificación del tubo

La rectificación del tubo se llevó a cabo por el método tradicional. Este proceso se debe llevar a cabo debido a que dentro de la tubería se acumulan óxidos o se desgasta debido a la acción natural o porque en ocasiones se raya. Debido a esto hay que raspar o lijar las paredes del cilindro con un torno, o una máquina de precisión para que el interior quede lo más liso posible.

### 5. Soldadura de los elemento

Una vez que se ya se contaba con los elementos, se procedió a soldar en el taller. En este proceso se indicó donde se debían colocar y a que distancia aproximada. En la figura 5.7 se observa la configuración final de esta. La soldadura que se ha utilizado es especial debido a que los elementos son de acero inoxidable.



*Figura 5.7. Se observa como en el taller se soldaron los elementos. Dichos elementos se observan en la mesa de trabajo.*



*Figura 5.8. Varillas de soldadura especial para unir elementos de acero inoxidable. También se observa el diodo con el cual se soldó el mezclador.*



*Figura 5.9 Enfriamiento de la pieza. Una vez que se soldaron todos los elementos del mezclador, se procedió a enfriarlo.*

### 6. Pieza final

Esta pieza ya terminada, es el elemento mezclador que será instalado en el AICM una vez que los equipos y todos los sistemas de tuberías sean instalados así como la obra civil quede terminada.

En esta imagen podemos ver como se venden los mezcladores estáticos comerciales. La apariencia de estos sería idéntica.



*Figura 5.10. Elemento final que se instalará en ASA.*

## 5.2 INSTALACIONES DE ASA

---

Las instalaciones de Aeropuertos y Servicios Auxiliares se encuentran en el complejo norte del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de Mexico. En dicho lugar se encuentran las instalaciones que ASA ocupa para suministrar combustible a todas las aerolíneas que operan en el AICM, las cuales son únicamente clientes de esta empresa del gobierno.

En las imágenes que a continuación se presentan se puede observar dónde se ubicará el sistema mezclador de combustibles, veremos los tanques de bioturbosina así como los tanques de turbosina y de agua que tienen, en caso de un accidente.

Una de los aspectos que más llamó la atención del equipo, fue los estándares de seguridad que siguen dentro de estas instalaciones, y los altos estándares de calidad certificadas que deben de cumplir todas las empresas que trabajen para el Gobierno Federal.



*Figura 5.11. En esta imagen se observan los tanques de bioturbosina o combustible organico que se utilizarán para mezclar con el combustible fosil.Dichos tanques se encuentran al fondo de esta imagen.*

En la siguiente imagen se observan dos tanques uno de agua con capacidad de 2 millones de litros y otro con capacidad para 100 mil litros de bioturbosina, la cual se importa desde el estado de Texas.



*Figura 5.12. Tanque en instalaciones de ASA. Un avion comercial tipo 747 jumbo tiene capacidad para este tanque de 100 000 litros.*

En la siguiente imagen se observa el lugar donde estará instalado el sistema mezclador de combustibles. Aquí se pueden observar filtros y líneas de combustible fósil así como flujómetros y otro dispositivos que se utilizan para mantener la alta pureza del combustible y un control minucioso de los volúmenes del mismo.



*Figura 5.13. Instalaciones de ASA. En la extrema derecha de la imagen se colocará la caseta de vigilancia del sistema mezclador de combustibles.*



Planta de producción de bioturbosina a partir de turbosina convencional y biokeroseno vegetal desarrollada para Aeropuertos y Servicios Auxiliares.

*Figura 5.14 Instalacion final del sistema de mezclado.*

## CONCLUSIONES

---

- Se propusieron al menos 7 diseños posibles de los cuales solo fueron viables 2 y de esos 2 se eligió uno que era el más viable para su construcción y que cumplía con las especificaciones de diseño.
- Se generaron a lo largo de este trabajo alrededor de 150 simulaciones con diferentes proporciones y diferentes diseños, todos ellos documentados. Dichas simulaciones nos permitieron conocer el comportamiento de los fluidos para mejorar los diseños de estos y así obtener el que se adaptara mejor a nuestras posibilidades tanto de producción como de instalación.
- El diseño fue el más sacrificado ya que se tenían por lo menos 3 mezcladores que cumplían con las especificaciones de ASA sin embargo nos limitaba los procesos de producción a los cuales nos apegamos, al final, de manera que dependía de si se podía construir o no primeramente y después realizar las simulaciones.
- Se logró a través del trabajo en equipo, con personal del taller, establecer parámetros reales de producción ya que nosotros teníamos ideas muy imaginativas desde su punto de vista, debido a lo complicado de los diseños.
- Ya que los fluidos no presentaban grandes diferencia en propiedades, el diseño fue adaptable, sin embargo fluidos ms viscosos requerirían geometrías muy complicadas para su correcta mezcla.
- A través de este prototipo se esperan construir varios mezcladores estáticos que funcionaran en otros aeropuertos internacionales de nuestro país, y donde los resultados que se obtengan de esta etapa serán analizados y mejorados, en el futuro.
- Antes de producir el elemento de prototipado rápido, se tuvieron que agregar unas aletas ya que este se doblaría con un radio de 8cm que no alcanzaría con un pedazo tan pequeño de placa de acero debido a la resistencia del mismo al ser doblado. Esto se puede observar en el plano final, donde podemos ver como las aletas se doblarán y así la parte central alcanzará el radio deseado. Esto fue uno de los detalles más curiosos de la producción.

**BIBLIOGRAFÍA**

---

Gasolina de Aviación, precios diarios (s.f) recuperado el 25 de Noviembre de 2015, de <http://www.indexmundi.com>, Graficas y precios del queroseno.

Frank M. White, *Mecánica de Fluidos* 5ta Edición [impreso]. University of Rhode Island. Revisión: Amable Liñan Martínez. Mc Graw Hill 2004.

Robert L. Mott, *Mecánica de Fluidos* 6ta Edición.[digital]. Universidad de Dayton 2006. Pearson Education. ISBN 970-26-0805-8

Archambault J., Williams R.D. (1996) *Production of sanguinarine by elicited plan cell culture*, I. Shake flasks suspension cultures. *Journal of Biotechnology* 46: 91-105.

Atkinson B., Mavituna F. (1991) *Biochemical engineering and biotechnology handbook*, Macmillan 1983 - 1119.

Büchs J. (2001) *Introduction to advantages and problems of shaken cultures*. *Biochemical Engineering Journal* 7: 91-98

Büchs J., Lotter S., Milbradt C. (2001) *Out-of-phase operating conditions, a hitherto unknown phenomenon in shaking bioreactors*. *Biochemical Engineering Journal* 7: 135-141

Büchs J., Maier U., Lotter S., Peter C.P. (2007) *Calculating liquid distribution in shake flasks on rotary shakers at waterlike viscosities*. *Biochemical Engineering Journal* 34: 200-208.

Erwing Kreiszig, *Matemáticas avanzadas para ingenieros*, Metodos numéricos, Análisis por elemento finito, 3ra Edición, 397-440

Markus Ascher. *Cadena de Producción Sustentable de Bioqueroseno en la América Latina y el Caribe vinculada a los Territorios Rurales*. Organización Latinoamericana de energía. Agosto de 2012. Libro de consulta.

Thong D. Honga,, Tatang H. Soerawidjajab, Iman K. Reksowardojoa, Osamu Fujitac, Zarah Dunianid, Mai X. Pham *A study on developing aviation biofuel for the Tropics: Production process—Experimental and theoretical evaluation of their blends with fossil kerosene* *Chemical Engennering and process* 2013.

F. Theron, N. Le Sauze, *Comparison between three static mixers for emulsification in turbulent flow*, 2011 Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse 2011.

EXSA S.A. *Manual de soldadura*. Capitulo I Conceptos Generales de Soldadura pag. 22, Capitulo VII Soldabilidad de aceros inoxidable pag. 124. Lugar y fecha de publicación.

Gerardo Cuesta Elizalde, Francisco José Guerra Millán, Adelwart Struck Garza, *Floculante* s.f. Recuperado el 20 de diciembre de 2015 de [jartnmusic.com/Personal/UIA\\_files/Floculación%20PPT.pdf](http://jartnmusic.com/Personal/UIA_files/Floculación%20PPT.pdf) . Agente floculante diapositiva 2.

## BIBLIOGRAFIA

Maquinado de elementos, recuperado el 25 de enero de 2016 a las 12:00 pm, de página:  
<https://www.youtube.com/watch?v=EjkvPLNgj0oEdwards>.

*Mixing in the process industries*, Second Edition 2001. N Harby. N.F. Edwards. Editorial Botterworth – Heinemann Capitulo 1 a 7. PP 5-136.

Orellana Gajardo Elís Gerardo. *Calculo computacional de la dinámica de fluidos de un mezclador a través del software "fluent "*. Facultad de Ingeniería. Universidad del Bio-Bio. Chile. 2006. Capitulo3 Tipos y características de mezcladores estáticos.

R.K.Thakur, Ch. Vial, K.N.P.Nigam, E.B.Nauman y G.Djelveh. *Static Mixers in the Process Industries. A Review*. Agosto 2003. Institute of Chemical Engineers. Université Blaise Pascal, France. Indian Institute of Technology Delhi India. Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York USA. Pag 787-822. Obtenido de Elsevier en año 2012.

## INDICE DE TABLAS, GRÁFICAS Y FIGURAS

---

### INDICE DE GRÁFICAS

*Gráfica 1. Comportamiento de los precios del queroseno en el mundo hasta junio de 2015 (usd./galón).*

*Gráfica 2. Grafica densidad vs % volumétrico*

*Grafica 3. Comportamiento de la densidad vs temperatura.*

*Gráfica 4. Porcentaje de mezclado contra posición dentro del sistema. La posición coincide de la misma forma con lo descrito al inicio de la sección.*

*Gráfica 5. Porcentaje de mezclado contra posición en el sistema*

*Gráfica 6. Porcentaje de mezclado contra posición en el sistema*

*Gráfica 7. Porcentaje de mezclado contra posición en el sistema*

*Gráfica 8. Porcentaje de mezclado contra posición en el sistema*

### INDICE DE TABLAS

*Tabla 1. Ventajas y desventajas de los mezcladores.*

*Tabla 2. Factores de fricción para diferentes tipos de mezcladores incluyendo el diseñado en este trabajo,*

*Tabla 3. Diferentes fabricantes de mezcladores estáticos y su modelo característico.*

*Tabla 4. Propiedades del Queroseno y el bio-queroseno.*

*Tabla 5. Densidad de las diferentes mezclas.*

*Tabla 6. Densidad de cada Prueba y Densidad Promedio.*

*Tabla 7. Densidades Finales.*

*Tabla 8. Concentraciones que se consideraron para la realización de éste trabajo*

*Tabla 9. Diseños generados en la primera etapa*

*Tabla 10. Concentraciones analizadas.*

*Tabla 11. Secciones donde se describela posición de la toma de muestra.*

## INDICE DE FIGURAS

*Figura 2.1. Ejemplo de la obtención de los productos derivados del petróleo.*

*El combustible usado en las aeronaves se obtiene a partir de la destilación atmosférica del crudo, en concreto, a la fracción de la destilación comprendida entre 145 y 240°C*

*Figura 2.2. Ciclo de vida de los biocombustibles. Como se puede observar el cultivo toma el O<sub>2</sub> y el C del ambiente, después se cosecha se refina y se transporta hasta los aeropuertos. Una vez en que se encuentra en la cámara de combustión del avión éstos elementos, se devuelven a la atmosfera a través del ciclo de Bryton. Estos ya devueltos a la atmósfera la planta los vuelva a tomar nuevamente y se cierre el ciclo.*

*Figura 3.1: Muestras de los combustibles que proporcionó ASA.*

*Figura 3.2. Instrumental.*

*Figura 3.3. Instrumental (izquierda), colocación de las muestras (derecha).*

*Figura 3.4. Medidor Oyster para Temperaturas*

*Fugura 3.5. Discretización.*

*Figura 3.6. Tipos de mallado. El utilizado en este trabajo es el de la Figura 3.6B.*

*Figura 3.7 .A través de este diagrama se puede explicar cómo se realiza la triangulación. Se obtiene el promedio de las distancias entre dos puntos y se traza una línea. Después se repite el proceso para cada uno y se obtienen los polígonos que se observan en la figura 3.2.*

*Figura 3.8 .Una vez que se han obtenido los polígonos, el programa procede a realizar lo que se llama triangulación de Delaunay. Esta consiste en crear pequeños triángulos todos pegados entre sí.*

*Figura 3.9. La figura muestra el caso en el que el cubo se encuentra en la frontera entre el fluido y el sólido.*

*Figura 3.10. En esta figura se observa el modelo físico del flujo.*

*Figura 3.11. Elemento "T". Es importante justificar el diseño del mezclador comprobando si es posible que se mezclen los fluidos sin necesidad de un elemento adicional.*

*Figura 3.12. Malla interna. Esta malla es la que se usó para el análisis de los fluidos en el elemento "T".*

*Figura 3.13. Malla externa del elemento. Como se puede observar el mallado es más fino en las zonas donde el programa prevé mayor estrés.*

*Figura 3.14 Mapa de contorno. Mezcla del bio-kps(rojo) y kps(azul) en el elemento "T". La región verde representa una mezcla ideal. Esta tubería es de 2 m de distancia y nos confirma que es necesario un elemento mezclador para obtener los resultados deseados.*

## BIBLIOGRAFIA

*Figura 3.15. Detalle de la salida de la "T". Zonas de colores entre el azul y el verde muestran la baja homogeneidad del fluido final.*

*Figura 3.16. Perfiles obtenidos de la sección "T".*

*Figura 3.17 El comportamiento de los histogramas para cada imagen se muestra a continuación*

*Figura 3.18 Vistas del elemento mezclador 1.*

*Figura 3.19 Vistas del elemento mezclador 2.*

*Figura 3.20. Arreglo final de los elementos helicoidales*

*Figura 3.21. Elemento individual del mezclador 3. Como vemos es una placa doblada con una geometría que permite al fluido transitar pero que a la vez sirve de obstáculo con el fin de promover el movimiento molecular.*

*Figura 3.22. Vista lateral del mezclador.*

*Figura 3.23. Se alternaron 180° con el fin de promover el movimiento del fluido y al alternar los elementos nos garantiza que el fluido cambiará de dirección dando como resultado que las múltiples capas sean homogéneas a la salida de éste.*

*Figura 4.1. Elemento mezclador incorporado a la "T". Diseño actual.*

*Figura 4.2. Vista trimétrico del mallado del ensamble final.*

*Figura 4.3 Detalle del mallado del área de flujo. Como se puede observar el mallado es más fino en la zona tanto donde está ubicado el mezclador como en las paredes y se vuelve más grueso mientras se acerca al centro de la tubería.*

*Figura 4.4. Vista superficial de la región de análisis. Así como tabla de valores.*

*Figura 4.5. Análisis de partículas de las diferentes regiones del sistema*

*Figura 4.6 Corte transversal a: 1 diámetro de la T. Durante su tránsito dentro del mezclador. A 1 diámetro fuera del mezclador. A 2 diámetros fuera del mezclador y 70cm del mezclador*

*Figura 4.7. Como se puede observar en el detalle de la figura 4.7 la zona azul es la zona donde hay una concentración mayor de kps y los matices de ese tono indican su mezcla con el componente rojo (bio-kps) y de la misma forma el rojo indica una concentración mayor de bio-kps y sus matices más bajos indican mezcla con el componente azul. La zona verde indica una concentración del 50% de ambos lo que nos lleva a concluir que en la región central se ubica la fracción necesaria ideal es decir que en esta región se igualan sus propiedades.*

*Figura 4.8. Análisis de partículas y comportamiento de la densidad en diferentes distancias.*

*Figura 4.9. Detalle a 40 cm a la salida del mezclador.*

*Figura 4.10. Vista desde la superficie de la vorticidad*

*Figura 4.11. Código de colores de la presión total.*

*Figura 4.12 Vista del comportamiento de la presión total dentro del sistema*

## BIBLIOGRAFIA

*Figura 4.13. Imagen del arreglo final del mezclador. Se pueden observar 3 placas alternadas de tal forma que permitan el tránsito del fluido y a la vez promuevan su mezclado.*

*Figura 4.14 y 4.15. Caída de presión dentro de la tubería en donde se encuentra el elemento mezclador*

*Figura 4.16. Presión en el interior de la tubería. El color rojo nos indica un máximo de ésta dentro del sistema. Aproximadamente estará entre el límite máximo de 91200 Pa.*

*Figura 4.17. Caída de presión durante el tránsito completo del fluido a través del sistema final. A la derecha se puede observar la tabla que corresponde al código de colores relacionado con la presión.*

*Figura 4.18. Vorticidad en el sistema completo. Las regiones más claras nos muestran una actividad mayor de ésta propiedad.*

*Figura 4.19. Detalle de cómo se comporta la vorticidad cuando el fluido transita por el mezclador estático. Este detalle muestra la zona del mezclador en donde la región verde nos muestra la más alta actividad de la vorticidad.*

*Figura 4.20. Nos muestra el comportamiento interno de las líneas de corriente de los combustibles. Así como la tabla en donde el 1 es 100% bio-combustible y el 0 es 100% fósil.*

*Figura 4.21. Vista de los cortes transversales del sistema cuando entran en la misma concentración queroseno y bioqueroseno*

*Figura 5.1. Planos obtenidos de la simulación*

*Figura 5.2. Placa cotizada en \$5800. Acero inoxidable 3mm de espesor 1.5m x 3m*

*Figura 5.3. Herramientas utilizadas en la manufactura.*

*Figura 5.4. En esta máquina se cortaron los elementos que serían insertados en la sección de tubería. Ubicación: CCADET.*

*Figura 5.5. Máquina cortando los elementos del mezclador.*

*Figura 5.6. Estos elementos fueron los producidos en el prototipado rápido, se fabricaron 4 elementos, uno más de los que se necesitaban por cuestiones de logística.*

*Figura 5.7. Se observa como en el taller se soldaron los elementos. Dichos elementos se observan en la mesa de trabajo.*

*Figura 5.8. Varillas de soldadura especial para unir elementos de acero inoxidable. También se observa el diodo con el cual se soldó el mezclador*

*Figura 5.9. Enfriamiento de la pieza. Una vez que se soldaron todos los elementos del mezclador, se procedió a enfriarlo*

*Figura 5.10. Elemento final que se instalará en ASA.*

*Figura 5.11. Aquí podemos observar los tanques de bioturbosina o combustible orgánico que se utilizarán para mezclar con el combustible fósil. Dichos tanques se encuentran al fondo de esta imagen.*

*Figura 5.12. Tanque en instalaciones de ASA. Un avión comercial tipo 747 jumbo tiene capacidad para este tanque de 100 000 litros.*

*Figura 5.13. Instalaciones de ASA. En la extrema derecha de la imagen se colocará la caseta de vigilancia del sistema mezclador de combustible.*

*Figura 5.14 Instalacion final del sistema de mezclado.*

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS**

---

KPS: Término técnico que se utiliza para referirse al combustible de origen 100% fósil.

Bio-KPS: Término utilizado para referirse al combustible de origen 100% orgánico.

Bio-Combustible: Este término se utiliza para referirse al combustible que resulta de la mezcla del combustible orgánico con el combustible fósil.

Jet fuel: Término técnico que se utiliza para referirse al combustible fósil que se usa en la región de Europa.

Turbosina: Otra manera de referirse al combustible fósil que usan las aeronaves.

Ligno-celulósicos: que está fabricado a partir de tecnología etanol celulósico.

BTL: "Biomass-to-Liquids" se refiere a la materia prima con la que está fabricado un combustible sintético "biomasa a líquido"

Floculante: Se refiere a una sustancia orgánica la cual aglutina las sustancias coloidales presentes en el agua facilitando su decantación y posterior filtrado.

Alginato: El alginato es un polisacárido que se obtiene de algunas "algas marrones", algas de gran tamaño.

Dietanolamina: Amina secundaria perteneciente a un compuesto químico orgánico que se utiliza en disolventes, emulsionantes y aplicaciones detergentes.

Reología: Estudio de la deformación y flujo de la materia.

CFD: Dinámica de Fluidos Computacional

Lpd: baja caída de presión (Low pressure down)

## ANEXOS

---

### Anexo 1

Alternativa para el manejo de los combustibles en dos entradas diferentes para dosificar las mezclas de alta y baja concentración.

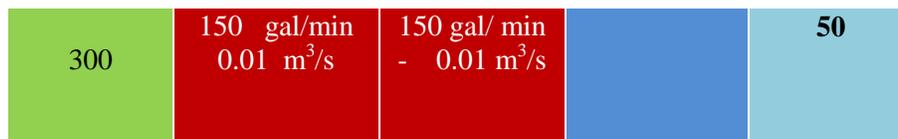
Las condiciones iniciales y las especificaciones de la tubería son las mismas:

Especificaciones técnicas de la tubería: 4 in; Cedula : 40

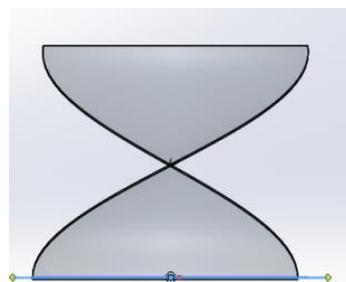
Condiciones iniciales de operación.

Las condiciones iniciales de operación son las mismas para todos los sistemas que se han simulado por AEF. El proyecto incluye adicionalmente la simulación de varios prototipos que se construirían pero que por diversas razones no se hicieron.

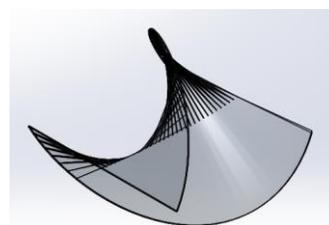
Uno de ellos es este prototipo que simula la forma del ADN. Dicho prototipo es el candidato por excelencia debido a su diseño y a las características del fluido. Sin embargo las dificultades que se presentaron para su construcción provocaron que nos adaptáramos a los recursos disponibles, teniendo por consecuencia que eliminar este candidato hasta ese momento.



Condiciones de operación



*Vista superior*

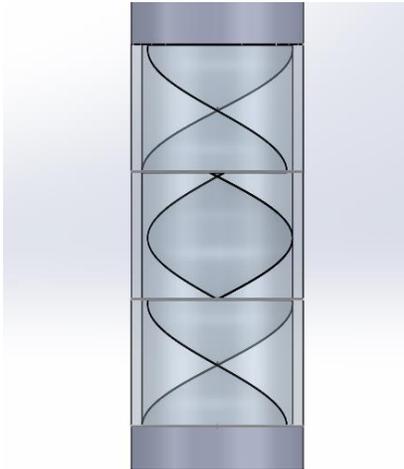


*Vista lateral*

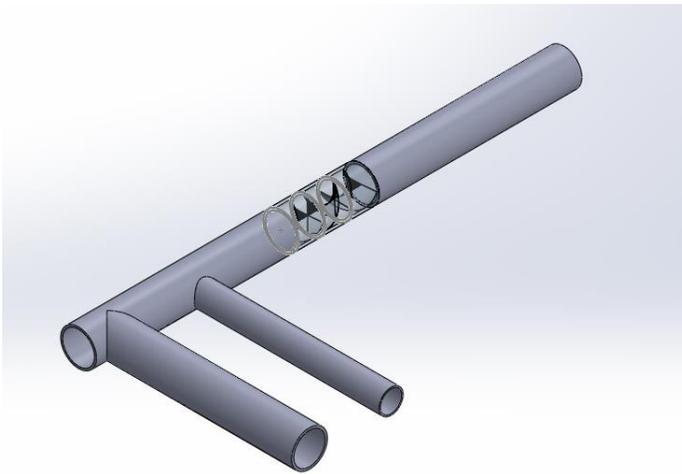
*Imagen 1ª. Elemento en forma de ADN.*

### Arreglo de tres elementos

Como se puede observar los elementos fueron alineados dirección al eje y se fueron alternando un sentido de las manecillas del reloj, otro en sentido contrario a las manecillas del reloj y así sucesivamente hasta llegar a 3. Adicionalmente se llevaron a cabo arreglos de hasta 5 elementos para comprobar experimentalmente la necesidad de agregar o retirar elementos de nuestro prototipo.



*Figura 2a. Arreglo de tres elementos emulando un diseño existente*



*Figura 3ª. Arreglo final y vista superior del sistema. Aquí se observa claramente dos entradas de combustible orgánico. Las cuales originalmente proporcionarían una cantidad alta o baja de este combustible.*

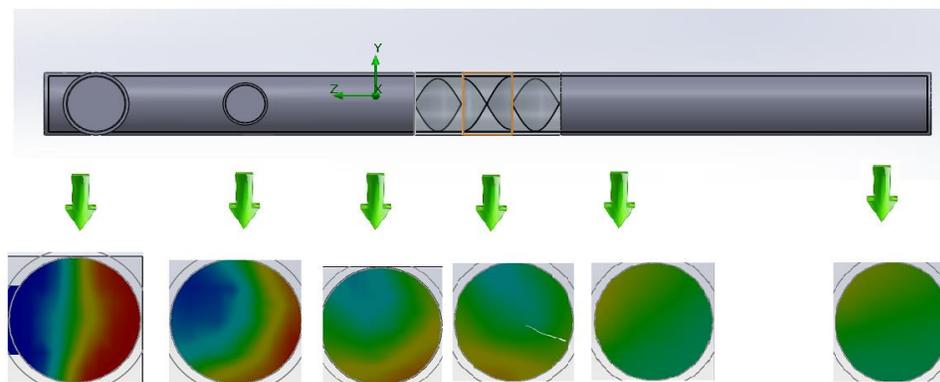
### **Simulación por computadora.**

La simulación se llevó a cabo con los fluidos ya descritos anteriormente y con las condiciones iniciales y de frontera proporcionadas por ASA.

Una vez que se llevó a cabo la simulación se obtuvieron los siguientes resultados.

De manera inicial, tenemos las vistas laterales realizadas con cortes transversales a diferentes distancias del mezclado. De izquierda a derecha tenemos la primera imagen que es donde los fluidos se encuentran. El color azul representa el combustible orgánico y el rojo el fósil. SE puede observar en la tubería el comportamiento de dichos fluidos y en el centro una zona verde la cual corresponderá al mezclado 100%.

Así en la sección 2 se observa cómo se mezclan a pesar de que aun no han pasado por el mezclador estático. Dicha mezcla corresponde aproximadamente al 20% del total. Realizando análisis previos se observó que los fluidos continuarían con este comportamiento de manera infinita si transitaran por una tubería de la misma dimensión. Antes de entrar al mezclador se observa la condición descrita. Una vez dentro del mezclador (sección 4) se observa cómo cambian de posición los colores, indicándonos un vórtice que provocara la mezcla de los fluidos. Finalmente se observa a la salida del mezclador estático una zona amarilla que indica aun presencia mayoritaria del combustible fósil, sin embargo esta desaparecerá una vez que los vórtices actúen más adelante de la tubería en la sección 6 donde prácticamente han desaparecido.



*Figura 4ª. Vista lateral de las concentraciones. Podemos observar regiones que no se mezclan por completo, estas regiones se pueden apreciar gracias a las diferentes tonalidades que presentan; esto es matices del amarillo y azul cian.*

A pesar de que los fluidos a transitado por este sistema aparentemente funcional, los fluidos no han alcanzado una mezcla 100%, esto es evidenciado por las zonas que no son de color verde las cuales indican mezcla 100% y las podemos observar en la figura 5ª.

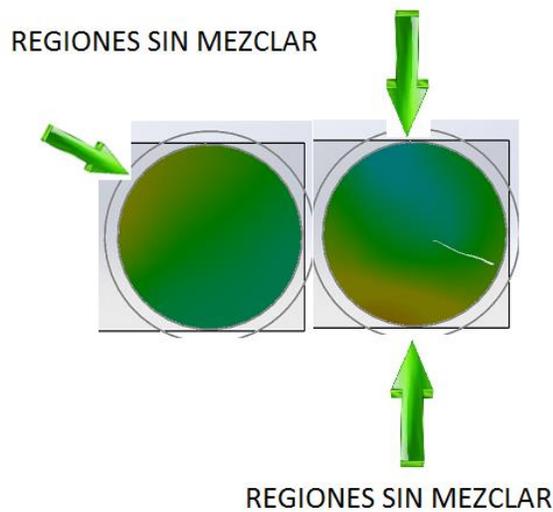
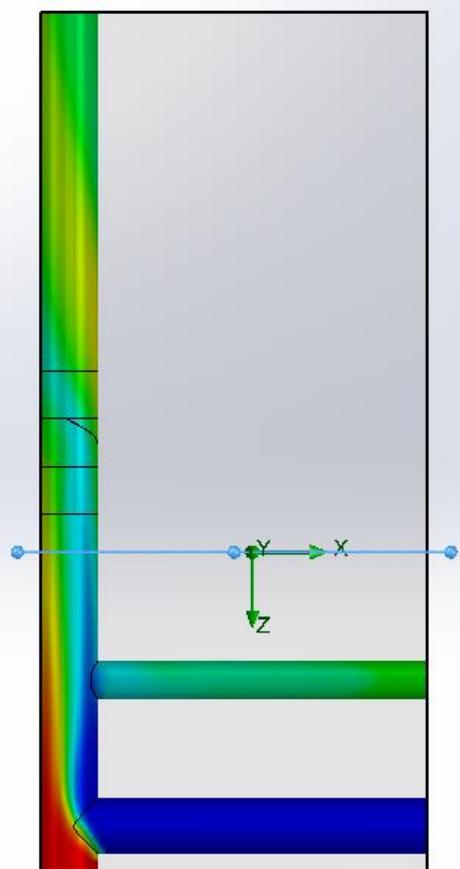


Figura 5ª. Detalle a la salida del mezclador donde se observan regiones sin mezclar denotadas por el color amarillento presente en la sección transversal.

#### ANALISIS SUPERFICIAL

Un analisis superficial nos muestra el comportamiento de los fluidos dentro del sistema. En la siguiente figura podemos observar como una parte de la mezcla se introduce en la tubería de baja concentración derivado de que se ha dejado abierta y absorbe una cantidad que debe ser considerada en los siguientes diseños.



El comportamiento superficial nos muestra de la misma manera como el combustible fosil (rojo) y el combustible organico(azul) se mezclan en el sistema. Adicionalmente observamos una pequeña tabla en donde se muestran las concentraciones de de cada un de los fluidos. Figura 6ª.

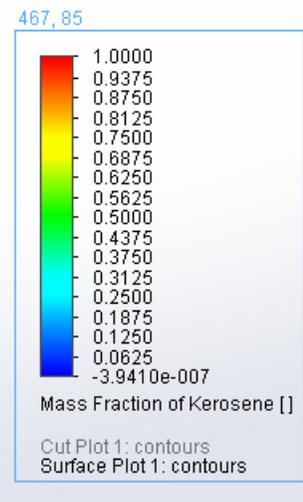


Figura 6ª. Análisis superficial de los fluidos.

Análisis de la presión dentro del sistema.

En lo que se refiere a la presión, sera un de las propiedades más vigiladas debido principalmente a la naturaleza del mezclador estático, que dependiendo de los diseños, tiende a reducir drásticamente dependiendo directamente del diseño.

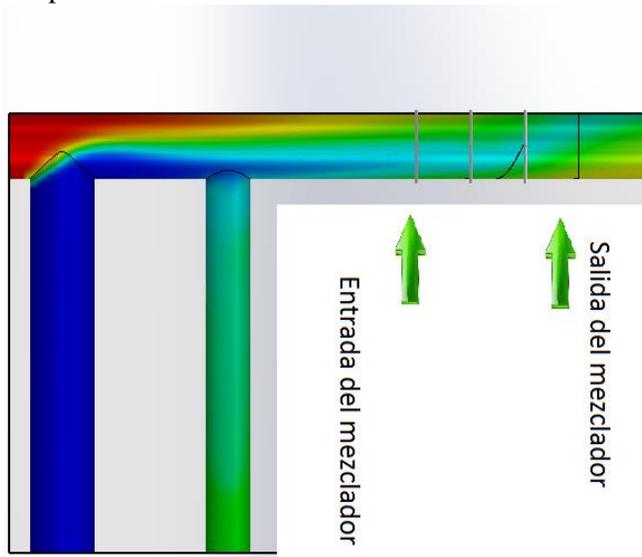


Figura 7ª. Ubicación del mezclador estático.

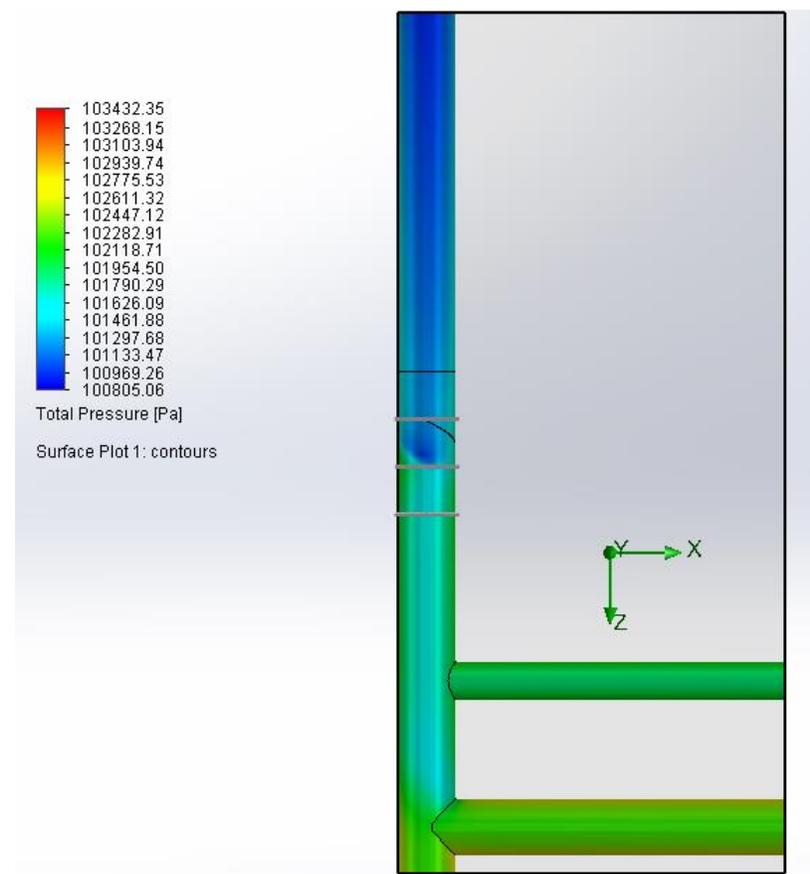


Figura 8ª Caída de presión.

En ésta figura podemos observar las diferentes caídas de presión que se tienen dentro del sistema. Inicialmente se tiene una presión de 102 Kpa y a la salida del mezclador podemos observar que cae a 100.8 Kpa lo cual no representa un cambio drástico de presión si se sabe que el pasascal es una unidad muy pequeña. En ésta imagen el aumento de la presión se identificaría con el color rojo y las caídas de ésta con el color azul.

### Análisis de las trayectorias

Un análisis de las trayectorias de las partículas ofrece siempre una alternativa para el diseño, ya que se puede observar de manera individual y minuciosa el arranque y el destino de ellas.

A continuación se muestran varias imágenes que se han obtenido de las trayectorias de los fluidos que no se analizarán de manera independiente pero que si formaron parte del análisis previo en un reporte técnico y con el fin de no robustecer aún más este trabajo se han optado por no incluirlo.

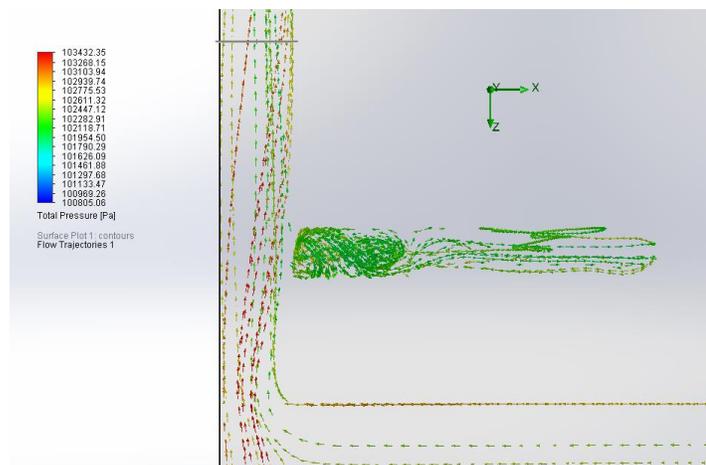


Figura 9ª. Líneas de trayectoria.

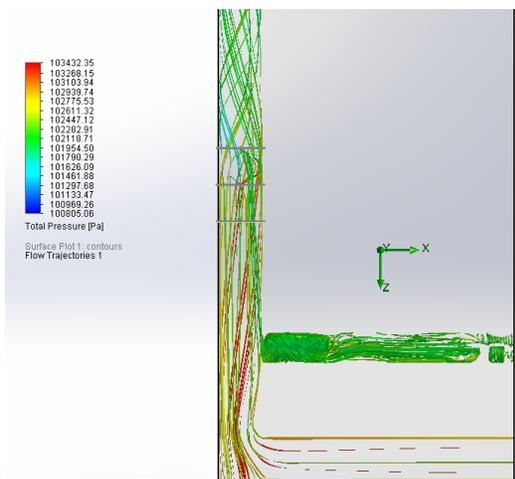


Figura 10ª. Líneas de trayectoria.

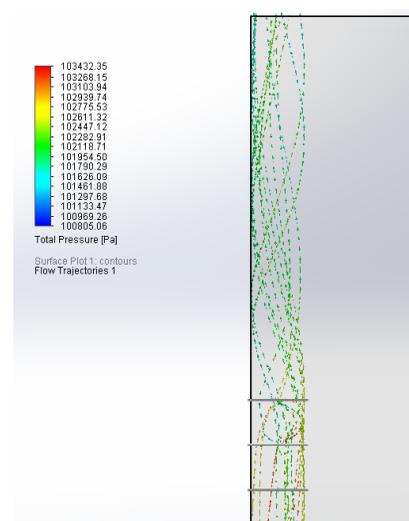


Figura 11ª Líneas de trayectoria.

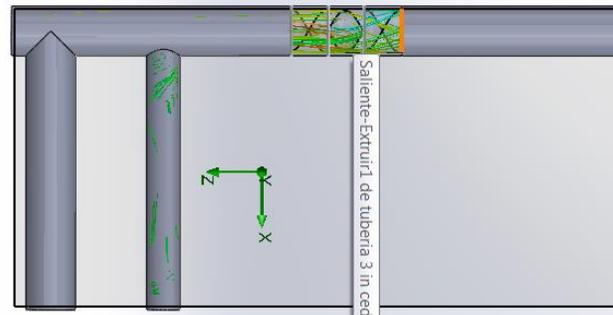


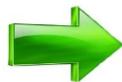
Figura 12ª. Líneas de trayectoria.

Figura 9ª 10ª 11ª 12ª. Líneas de trayectorias y tabla de presiones.

### Mezclador tipo ADN Continuo

Este tipo de mezcladores en particular tiene la función de mezclar fluidos poco densos y se tiene la facilidad de soldar los elementos dependiendo de las necesidades del usuario pero inicialmente se simulará en forma continua.

Las condiciones usadas para este sistema son las mismas:



Q Total	Q KPS	Q BIO ALTO $\Phi = 3''$	Q BIO BAJO $\Phi = 1.5''$	% KPS
300	150 gal/min - 0.01 m <sup>3</sup> /s	150 gal/min - 0.01 m <sup>3</sup> /s		<b>50</b>
300	225 gal/min - 0.014195 m <sup>3</sup> /s	75 gal/min - 0.004732 m <sup>3</sup> /s		<b>75</b>
300	267 gal/min - 0.016845 m <sup>3</sup> /s	33 gal/min - 0.002082 m <sup>3</sup> /s		<b>11</b>
300	270 gal/min - 0.017034 m <sup>3</sup> /s		30 gal/min - 0.001893 m <sup>3</sup> /s	<b>10</b>
300	297 gal/min - 0.018738 m <sup>3</sup> /s		3 gal/min - 0.000189 m <sup>3</sup> /s	<b>1</b>

## Arreglo final

El arreglo final de dicho mezclador se observa la figura 13<sup>a</sup>. Este mezclador resultaba en comparación con los demás, relativamente fácil en lo relacionado a su manufactura ya que es una lámina larga y delgada que se hace girar sobre un eje.

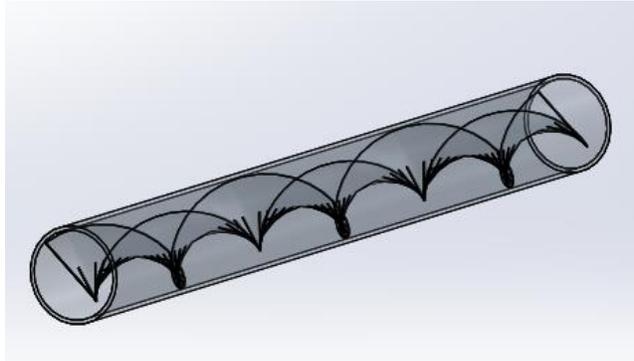


Figura 13a . Mezclador estático continuo.

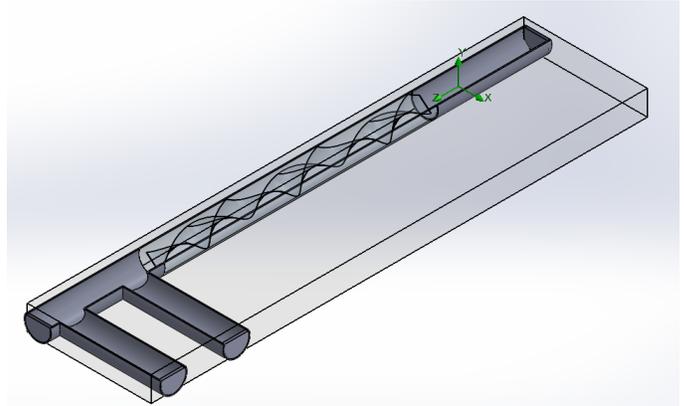


Figura 14<sup>a</sup> Ensamble del mezclador con los elementos de tubería.

## Simulación por computadora.

Bajo las mismas condiciones de operación y las mismas condiciones iniciales se llevó a cabo dicha simulación.

## Condiciones iniciales:

Q Total	Q KPS	Q BIO ALTO $\Phi = 3''$	Q BIO BAJO $\Phi = 1.5''$	% KPS
300 gal/min	150 gal/min 0.01 m <sup>3</sup> /s	150 gal/ min - 0.01 m <sup>3</sup> /s		<b>50</b>

## Resultados

Ésta vez inicialmente se ha analizado la presión dentro del sistema ya que debido a lo prolongado de este modelo se cree que las caídas de presión serán dramáticas. En la imagen 15<sup>a</sup> se muestra el diagrama de la caída de presión en el sistema. Y de manera concreta se puede observar que el comportamiento de esta propiedad que tanto nos preocupaba es muy discreto y no observamos caídas repentinas ni vórtices peligrosos.

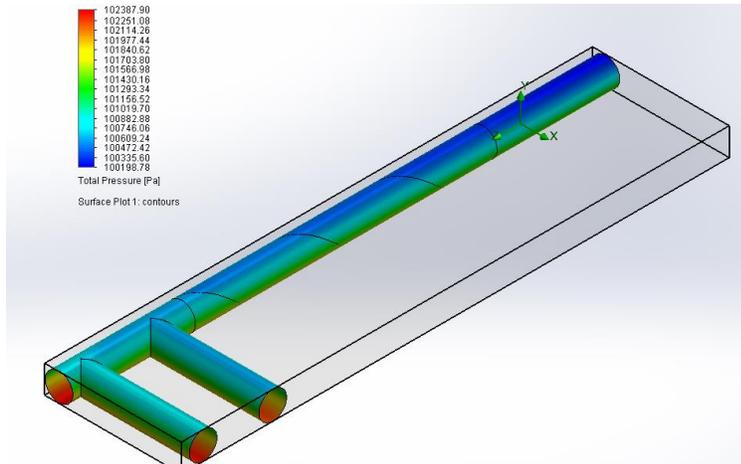


Figura 15ª Pérdida de presión en el sistema

### Fracción de masa.

En la siguiente imagen podemos observar el comportamiento superficial de los combustibles dentro del sistema. En esta imagen el azul es el combustible fósil y el rojo el orgánico. Así como el verde será indicativo de mezcla homogénea

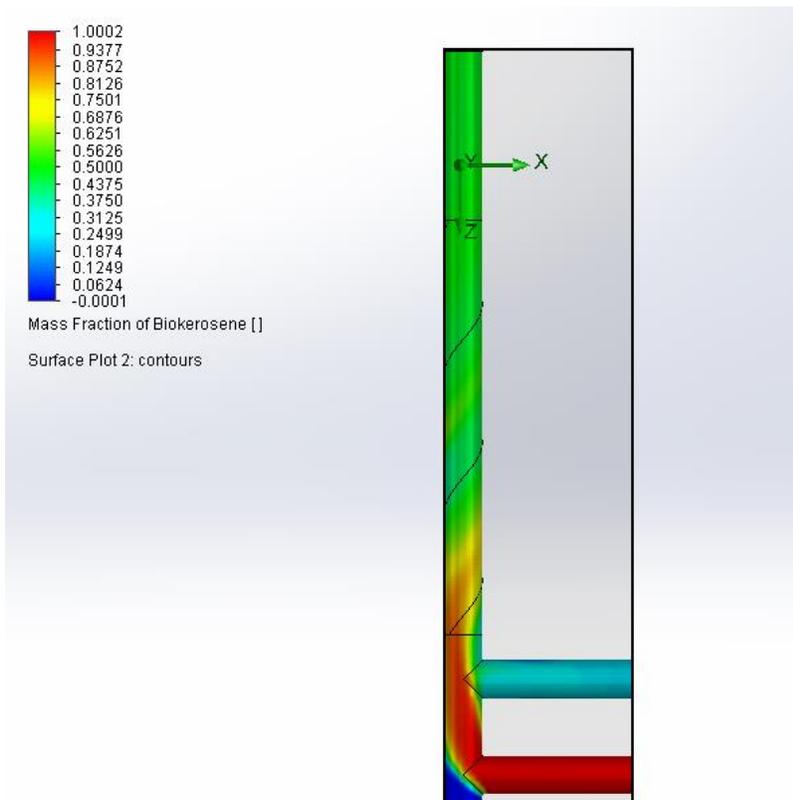


Figura 16ª. Fracción de masa de biokeroseno.

En este detalle el color azul nos muestra la entrada de combustible fósil y el color rojo nos muestra la entrada de biocombustible la tubería azul cian se mantiene cerrada pero podemos observar cómo es que existe un estancamiento en esta sección.

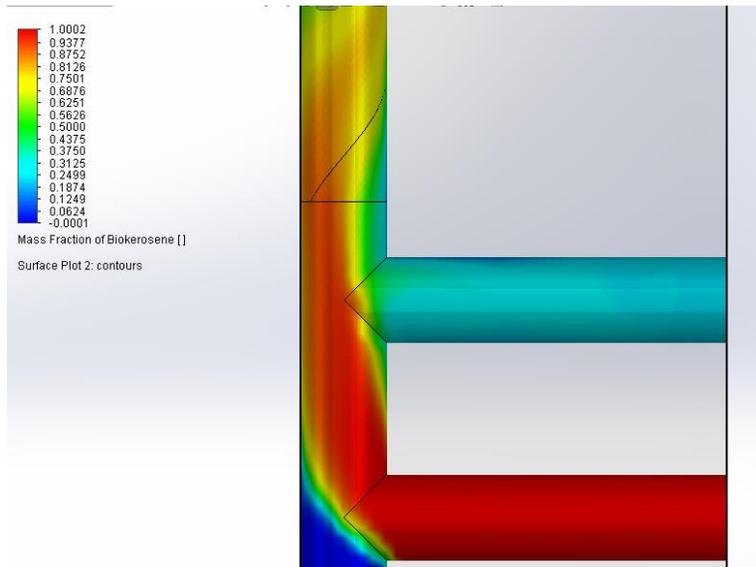


Figura 17<sup>a</sup>. Detalle de la entrada a la línea de mezclado.

La siguiente imagen nos muestra un análisis de las trayectorias de los fluidos así como su origen y destino, con el fin de tener una idea clara del comportamiento de los fluidos y la mezcla.

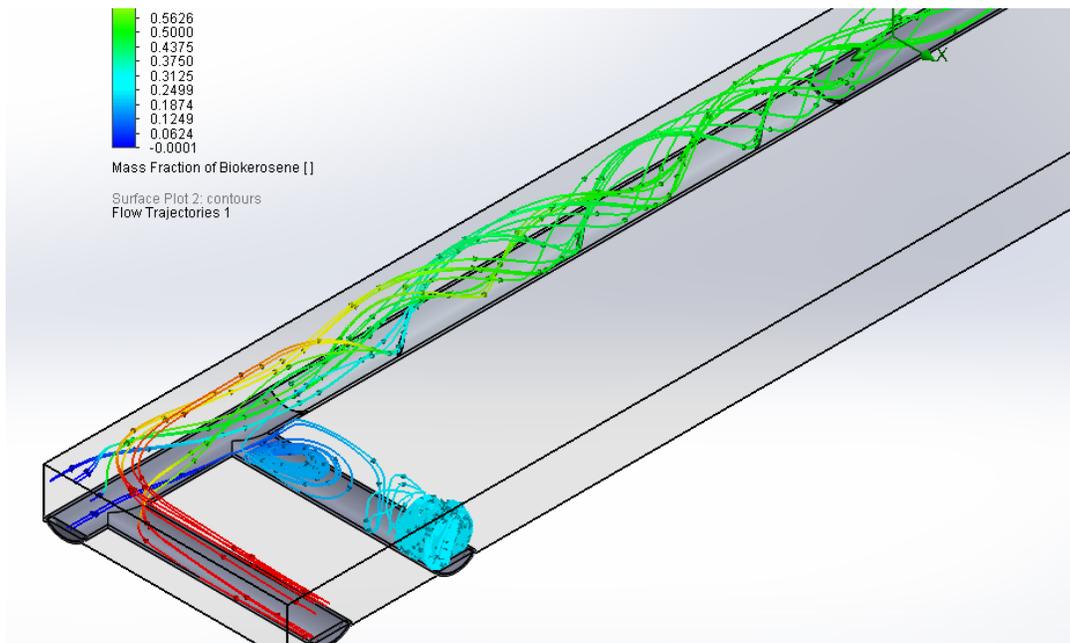
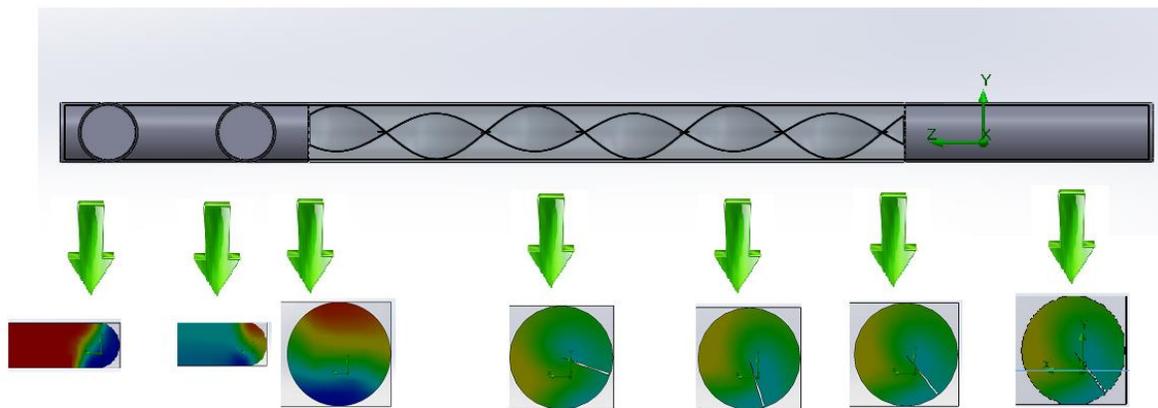


Figura 18<sup>a</sup>. Trayectorias de los fluidos.

### Secciones transversales.

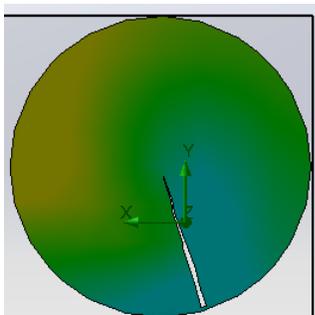
A continuación en la siguiente imagen se puede observar el comportamiento del fluido a lo largo de todo el trayecto. El azul representa la entrada de combustible fósil y el color rojo el biocombustible.

Siguiendo la misma lógica anteriormente usada, observamos de izquierda a derecha, las secciones transversales de nuestro experimento. Y de igual forma tenemos regiones verdes que son las que se han mezclado 100% y regiones azuladas o amarillentas las cuales nos indican concentración más alta de uno o de otro combustible según corresponda



*Figura 19ª. Secciones transversales.*

El siguiente detalle obtenido con la más alta resolución, de la mezcla se puede observar que al final no es homogénea ya que se aprecian regiones en las que aun el amarillo verdoso está presente debido, consideramos, a que no se alcanza una turbulencia considerable para llevar a cabo dicho mezclado. Figura 20ª.



*Figura 20ª. Detalle de regiones sin mezclar.*

## Anexo 2

## 2.1 El experimento de Reynolds

Conocer la forma en cómo se comporta el movimiento de un flujo dentro de una tubería a lo largo de un conducto o sección es elemental para la realización de éste trabajo, fue estudiada por O. Reynolds, y se denomina régimen de flujo, este físico irlandés estudió detalladamente el comportamiento en tuberías y gracias a esto determinó las leyes que describen la resistencia de los fluidos dentro de éstas. Al mismo tiempo determinó una relación matemática la cual es ampliamente usada en la mecánica de fluidos.

En el laboratorio reproducimos el experimento de Reynolds. Con lo cual pudimos observar tanto el flujo laminar como el flujo turbulento y la estrecha relación que estos tienen con la velocidad, el diámetro y las características particulares de cada fluido.

Pero el que un flujo sea laminar o turbulento depende en gran parte de las propiedades del fluido en particular. En el caso de un flujo dentro de una tubería la naturaleza del flujo, ya sea laminar o turbulento está determinado por el parámetro adimensional descrito anteriormente y que lleva el nombre de su descubridor.

En número de Reynolds es muy importante en la mecánica de fluidos ya que es un parámetro adimensional que se utiliza para determinar el tipo de flujo que circula por una tubería o conducto a estudiar. Éste relaciona básicamente dos tipos de fuerza:

$$Re = \frac{\rho D \vec{v}}{\mu} = \frac{\text{fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas viscosas}} \dots \dots \dots \text{ec 1}$$

Reynolds después de analizar el flujo en tuberías para diferentes regímenes de velocidad, encontró que, siguiendo la relación antes descrita (ecuación 1) obtuvo un límite superior y un límite inferior que distinguieron desde ese momento y hasta ahora estos flujos:

*Re > 4000 el flujo es turbulento*

*2000 < Re < 4000 el flujo está en transición*

*Re < 2000 el flujo es laminar*

Podemos esperar que las condiciones de flujo en la entrada de la tubería pueden afectar directamente el valor del número de Reynolds y la transición de flujo laminar a flujo turbulento ocurrirá dependiendo de cada caso en particular.

La clasificación de los diferentes tipos de flujos, se puede elaborar de muy diversas maneras, sin embargo cabe destacar que éstas principalmente se pueden deber a diferentes variables como lo son, de acuerdo a su velocidad, a la temperatura, al cambio de dirección que experimentan las partículas, así como la posición con respecto al tiempo, etc. Y también diversos procesos termodinámicos a los que se puede ver sometido, dicho lo cual podemos clasificarlos en: laminar, turbulento, permanente, no permanente, ideal, uniforme, no uniforme, estable, inestable, estacionario, no estacionario, reversible, irreversible, adiabático, exotérmico, etc.

Dado que en este trabajo lo que más interesa es la clasificación de acuerdo al cambio de velocidad y a la dirección de las partículas de los fluidos, el régimen laminar y el régimen turbulento son los de mayor interés por ahora, ambos se definirán de manera consecutiva a continuación.

### 2.2 Régimen de flujo laminar

De manera específica, el flujo laminar se define como aquel que se mueve dentro de una estructura o sistema en forma de placas o de láminas, en el cual no existe una mezcla macroscópica de ninguna clase, esto se comprueba con el experimento de Reynolds. Reynolds inyectó un filamento de tinta a cierto flujo y observó que este se mantenía a lo largo de una trayectoria definida y no había ninguna clase de dispersión de ésta excepto la pequeña dispersión debido al movimiento molecular propio.

Un ejemplo claro de flujo laminar puede ser el filamento de un incienso que se encuentra fijo, o la salida de humo de una chimenea cuando no hay condiciones de viento que perturben el flujo (ver Figura 2.2).

Las capas adyacentes del fluido se deslizan suavemente entre sí. El mecanismo de transporte es exclusivamente molecular. Se dice que este flujo es aerodinámico. Ocurre a velocidades relativamente bajas o viscosidades altas. En este tipo de régimen, llamado también viscoso, predominan las fuerzas viscosas sobre las de inercia y por lo tanto está asociado a números de Reynolds pequeños ( $R < 2000$ ).

En tuberías, tanto horizontales como verticales, se produce flujo siempre y cuando haya diferencia de presiones entre los extremos del tubo, de tal manera que habrá movimiento de menores a mayores presiones. El movimiento en una tubería estará determinado por las fuerzas gravitatorias y por las fuerzas de rozamiento viscosas. Tendremos en cuenta que la velocidad es nula en el punto de contacto del fluido con la tubería y alcanzará su valor máximo en el centro del tubo.

### 2.3 Régimen de flujo turbulento

El flujo turbulento se caracteriza principalmente por la naturaleza aleatoria de las partículas durante su movimiento. Cuando el mismo filamento de tinta se inyectó en un flujo turbulento, éste se dispersó rápidamente a través del campo de velocidad presente. La línea de tinta se rompe en innumerables hilos muy finos que dan la apariencia de enredarse unos con otros hasta que se disuelven en el fluido, el mezclado macroscópico de las partículas que se encuentran en capas adyacentes nos da como resultado una rápida dispersión de la tinta.

Un ejemplo claro de un flujo turbulento es el mismo humo del incienso pero en la región en que este ya no es una línea continua, sino cuando se revuelve y en el caso del avión, cuando éste experimenta turbulencia y entonces la estela ya no es una línea continua y como consecuencia la sensación dentro de este se vuelve desagradable (ver figura 2.1)

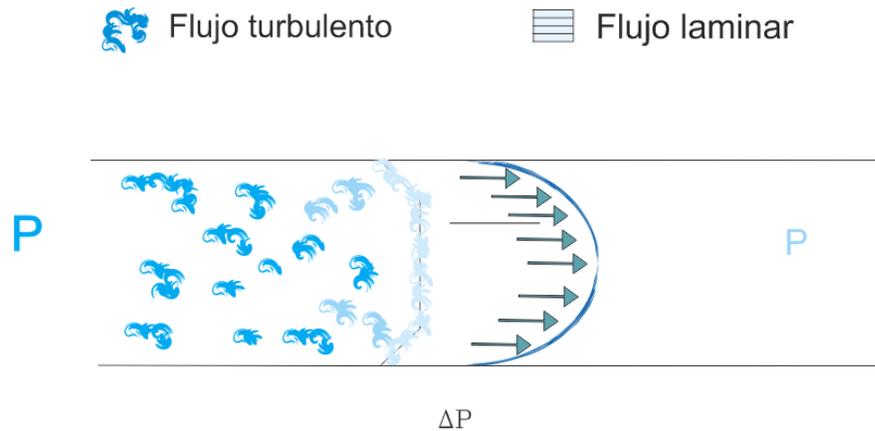


Figura 2.1 Comparación entre flujo laminar y flujo turbulento. Se observa la diferencia de presiones, pero también el frente de velocidad e cada uno de ellos. Las líneas flujo turbulento son “remolinos” desordenados, y con un frente trapezoidal. El frente de flujo laminar, se observa ordenado en láminas y de forma parabólica.

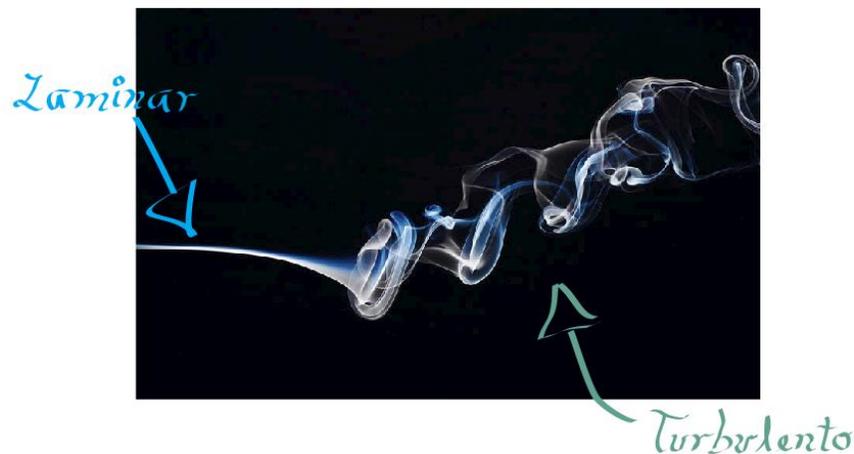


Figura 2.2. Comparación entre flujo laminar y flujo turbulento, en un hilo de incienso.

#### 2.4 Experimento de Hagen-Poiseuille

Para diversos cálculos la ley de Poiseuille que permite determinar el flujo laminar estacionario  $\Phi_V$  de un líquido incompresible y uniformemente viscoso (también denominado fluido newtoniano) a través de un tubo cilíndrico de sección circular constante, fue de gran utilidad. Esta ecuación fue derivada

experimentalmente en 1838, formulada y publicada en 1840 y 1846 por Jean Louis Marie Poiseuille (1797-1869). La ley queda formulada del siguiente modo:

Para un fluido que escurre por un tubo que tiene una superficie trasversal  $A$ , una viscosidad  $\mu$ , una velocidad de flujo  $V$  y una distancia a recorrer  $d$ , se define la fuerza viscosa como

Dedución de la ecuación de Hagen-Poiseuille

$$\Delta P + F = 0$$

$$P_1 \pi r^2 - P_2 \pi r^2 + F = 0$$

Y si además consideramos

$$\frac{F}{A_l} = \eta \frac{dv}{dr}$$

De donde

$$F = 2\pi r L \eta \frac{\partial v}{\partial r}$$

Y sustituyendo

$$P_1 \pi r^2 - P_2 \pi r^2 + 2\pi r L \eta \frac{\partial v}{\partial r} = 0$$

$$2\pi r L \eta \frac{\partial v}{\partial r} = P_2 \pi r^2 - P_1 \pi r^2$$

$$2\pi r L\eta \frac{\partial v}{\partial r} = \Delta P \pi r^2$$

$$\frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\Delta P \pi r^2}{2\pi r L\eta}$$

$$dv = \frac{\Delta P r}{2L\eta} dr$$

$$dv = \frac{\Delta P}{2L\eta} r dr$$

Integrando

$$\int dv = \int_r^R \frac{\Delta P}{2L\eta} r dr$$

$$v = \frac{\Delta P}{2L\eta} \int_r^R r dr$$

$$v = \frac{\Delta P}{2L\eta} \left[ \frac{r^2}{2} \right]_r^R + C$$

Si  $R=r$  quiere decir que la velocidad de flujo es igual a cero  $v=0$

$$0 = \frac{\Delta P}{2L\eta} \left[ \frac{r^2}{2} - \frac{r^2}{2} \right] + C$$

$$C = \frac{\Delta P r}{4L\eta}$$

Y por lo tanto

$$v = \frac{\Delta Pr}{4L\eta} (R^2 - r^2) \dots \dots \dots \text{Ec. 2}$$

Obtenemos la ecuación de distribución de velocidades de flujo en una tubería y cómo podemos observar la expresión que esta elevada al cuadrado nos describe un movimiento parabólico y este se alcanzará en el centro de la tubería donde los efectos de rozamiento son mínimos.

Para encontrar un máximo podemos igualar a cero  $r=0$

$$v = \frac{\Delta Pr}{4L\eta} R^2 \dots \dots \dots \text{Ec. 3}$$

Esta ley que se puede derivar de la ecuación de **Darcy Weisbach** nos puede arrojar también resultados acerca del coeficiente de fricción, la energía disipada, etc., según sus diversas formas.

*Figura 2.1 Comparación entre flujo laminar y flujo turbulento. Se observa la diferencia de presiones, pero también el frente de velocidad e cada uno de ellos. Las líneas flujo turbulento son "remolinos" desordenados, y con un frente trapezoidal. El frente de flujo laminar, se observa ordenado en láminas y de forma parabólica.*

*Figura 2.2. Comparación entre flujo laminar y flujo turbulento, en un hilo de incienso*

SIN MEZCLADOR

$$\Delta P =$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{789.0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.624 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.1 \text{m}}{.0035 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \cdot \text{s}} = 14066$$

CON MEZCLADOR

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{789.0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4.14 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.1 \text{m}}{.0035 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \cdot \text{s}} = 93327$$