

**ELABORACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE  
MEZCLADORES EN LÍNEA PARA HOMOGENEIZACIÓN  
DE CRUDOS PESADOS CON DILUYENTE**

**ROBERT LEON HERRERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA  
2016**

**ELABORACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE  
MEZCLADORES EN LÍNEA PARA HOMOGENEIZACIÓN  
DE CRUDOS PESADOS CON DILUYENTE**

**ROBERT LEON HERRERA**

**Monografía realizada para optar al  
Título de Especialista en Producción de Hidrocarburos**

**Director**

**M.Sc. Edison Odilio Garcia Navas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA  
2016**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta monografía a A Dios padre todo poderoso, a su hijo Jesús, y a la Virgen María, quienes siempre han estado en mi corazón y en todos los proyectos que he realizado, A mis padres quienes me dieron vida, educación, apoyo y su amor incondicional, A mis Hermanos, Esposa e hijos porque siempre han estado conmigo y nunca me he sentido solo, y a todas las personas que de una u otra manera me han inspirado para fijarme metas y luchar por lograrlas.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus agradecimientos a:

M.Sc. EDISON ODILIO GARCIA NAVAS, Ingeniero de Petróleos y Director de la monografía.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron para lograr la realización de este estudio.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION .....	17
1. ASPECTOS RELEVANTES SOBRE DILUCIÓN DE CRUDO PESADO .....	18
1.1 CRUDOS PESADOS.....	18
1.2 FLUJO LAMINAR Y FLUJO TURBULENTO .....	19
1.2.1 Mezclado laminar .....	21
1.2.1.1 Índices de Mezclado.....	22
1.2.1.2 Rata de Mezclado .....	22
1.2.1.3 Energía y eficiencia.....	22
1.3 VISCOSIDAD.....	22
1.3.1 Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de un fluido .....	23
1.3.2 Efecto de la presión sobre la viscosidad de un fluido .....	24
1.4 DENSIDAD.....	24
1.4.1 Efecto de la temperatura sobre la densidad.....	25
1.5 DISTRIBUIDORES DE FLUJO .....	26
1.6 MEZCLADORES ESTÁTICOS.....	26
1.6.1 Principios de operación .....	27
1.6.2 Elementos de mezclad .....	30
1.7 MEZCLADORES ESTÁTICOS EN FLUJO LAMINAR.....	36
1.8 MEZCLADORES ESTÁTICOS EN FLUJO TRANSITORIO. ....	38
1.9 MEZCLADORES ESTÁTICOS EN FLUJO TURBULENTO .....	39
1.10 MEZCLADOR DE PLATOS DE MULTIPLES ORIFICIOS .....	41
1.11 MEZCLADORES ESTÁTICOS SULZER.....	42
1.12 MEZCLADORES ESTÁTICOS KENICS.....	45
1.13 OTROS TIPOS DE MEZCLADORES .....	46
2. DILUYENTES Y RELACIONES VOLUMÉTRICAS .....	48
2.1 TIPOS DE DILUYENTES.....	48
2.2. IMPACTO DE LA DILUCIÓN SOBRE LA VISCOSIDAD Y LA DENSIDAD DE LA MEZCLA.....	4949
2.3 IMPÁCTO DE LA DILUCIÓN SOBRE EL REQUERIMIENTO DE ENERGÍA. ....	51
2.4 LEYES DE MEZCLA.....	52
2.5 FACTOR DE ENCOGIMIENTO .....	52

3.	METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE MEZCLADORES.....	55
3.1	CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO.....	56
3.2	SELECCIÓN DE MEZCLADORES ESTÁTICOS STAMIXCO.....	57
3.2.1.	Caida de presión, longitud de mezclado y requerimientos de potencia. ....	62
3.3	METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE MEZCLADORES ESTÁTICOS .....	66
4.	ANÁLISIS TECNICO PRESUPUESTAL.....	70
4.1	ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX – CAPITAL EXPENDITURE) 70	
4.2	ANÁLISIS DE COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX - OPERATING EXPENSE)....	71
4.3	OTROS COSTOS DE OPERACIÓN .....	71
4.3.1	Consumo de diluyentes (Insumos) .....	71
5.	CONCLUSIONES .....	73
6.	RECOMENDACIONES .....	74
	BIBLIOGRAFIA.....	75

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.	Tipos de Mezcladores en línea: (a) T, (b) Inyección (c) Anular. ....28
Figura 2.	Elemento de mezclado estándar.....30
Figura 3.	Elemento de mezclado Monomix .....31
Figura 4.	Elemento de mezclado Duomix.....31
Figura 5.	Instalación Típica de los Mezcladores estáticos. ....31
Figura 6.	Mezclador Helicoidal .....32
Figura 7.	División del flujo en un mezclador estático como función del número de elementos de mezclado.....33
Figura 8.	Diagrama del modo de funcionamiento de la División del flujo y del mezclado Radial en un mezclador estático .....33
Figura 9.	Tipos de Elementos en mezcladores estáticos. ....34
Figura 10.	Regimen de flujo Laminar en 2D.....38
Figura 11.	Regimen de flujo turbulento 2D. ....40
Figura 12.	Mezclador de platos de múltiples orificios. ....42
Figura 13.	Elementos de mezclado multicanal de baja caída de presión. ....42
Figura 14.	Elementos de mezclado Sulzer para varias aplicaciones.....43
Figura 15.	Ensamblaje de elementos de mezclado Kenics.....45
Figura 16.	Mezcladores Estáticos LPD y LLPD. ....46
Figura 17.	Viscosidad de Mezcla en función del porcentaje de diluyente.....50
Figura 18.	Porcentaje óptimo de diluyente. ....51
Figura 19.	Diagrama de flujo para selección de mezcladores estáticos para crudo pesado con diluyente. ....67

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. API y Viscosidad de los crudos.....	18
Tabla 2. Comparacion de mezcladores estaticos para homogeneidad equivalente en flujo Laminar. ....	37
Tabla 3. Propiedades de algunos Diluyentes .....	49
Tabla 4. Rangos de densidad y °API de aplicación.....	54
Tabla 5. Guía para aplicaciones en regímenes laminar y turbulento.....	57
Tabla 6. Selección de mezcladores estáticos. ....	58
Tabla 7. <u>Bases de Cálculo</u> . Ejemplo de aplicación.....	59
Tabla 8. Número de elementos de mezclado requeridos para condiciones de flujo laminar (relaciones de viscosidad 100:1).....	61
Tabla 9. Número de elementos de mezclado adicionales para relaciones de viscosidad superiores a 100:1 .....	62
Tabla 10. Elementos de mezclado metálicos. ....	66
Tabla 11. Relacion de costos de inversión (USD) Mezclador Estático - Elementos.....	70
Tabla 12. Relacion de costos de inversión (USD) Mezclador Estático – Mano de obra ..	70
Tabla 13. Relacion de otros costos de operación. ....	71
Tabla 14. Costos de diluyente. ....	71
Tabla 15. Volumen de crudo a tratar. ....	72
Tabla 16. Costos consumo de diluyente actual.....	72

## GLOSARIO

**API:** American Petroleum Institute.

**AIRE SECO:** Mezcla de gases que tienen un porcentaje muy bajo de agua.

**ALINEACIÓN:** Actividad que se realiza para darle un sentido de desplazamiento al fluido mediante la operación de válvulas sobre un Múltiple o Troncal.

**ASPECTO AMBIENTAL:** elemento de las actividades, productos o servicios de una organización que pueden interactuar con el medio ambiente. Un aspecto ambiental de alta significancia es aquel que tiene o puede tener un impacto ambiental significativo.

**BAFFLES** - Un separador que se encuentra en un depósito, tanque u otra cámara para desviar el flujo de fluido en una dirección específica(s) para la desaireación de fluido en movimiento. Placa o paleta se utilizan para dirigir o controlar el movimiento de líquido o aire dentro de la zona limitada.

**BOPD:** Barriles de crudo producidos por día.

**BWPD:** Barriles de agua por día.

**BS&W:** Porcentaje de agua y sólidos en la emulsión de crudo.

**CAIDA DE PRESIÓN:** Reducción de la presión de un punto a otro punto aguas abajo. La caída de presión se produce con las fuerzas de fricción sobre un fluido a medida que fluye a través del tubo.

**CONDENSADO DE GAS:** Hidrocarburo que se mantiene en estado gaseoso en las condiciones de su depósito natural pero por las altas presiones se licua en las condiciones superficiales normales.

**CONTAMINACIÓN:** Es la alteración nociva del estado natural de un medio como consecuencia de la introducción de un agente totalmente ajeno a ese medio

(contaminante), causando inestabilidad, desorden, daño o malestar en un ecosistema, en un medio físico o en un ser vivo.

**CROMATOGRAFÍA:** Es un conjunto de técnicas basadas en el principio de retención selectiva, cuyo objetivo es separar los distintos componentes de una mezcla, permitiendo identificar y determinar las cantidades de dichos componentes.

**CRUDO PESADO:** Crudo que no fluye con facilidad. Cualquier licuado de petróleo con un índice API inferior a 20°, este resultado es una degradación por estar expuesto a las bacterias, el agua o el aire, que trae como consecuencia, la pérdida de sus fracciones más ligeras, dejando atrás sus fracciones más pesadas.

**DECANTACIÓN:** Es un método mecánico de separación de mezclas heterogéneas, estas pueden estar formadas por un líquido y un sólido, o por dos líquidos.

**DILUYENTE:** Agente que se le agrega a un líquido demasiado espeso para que pueda fluir, reduciendo el valor de la viscosidad.

**EMULSIÓN:** Mezcla de líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea. Un líquido (la fase dispersa) es dispersado en otro (la fase continua o fase dispersante).

**EXPANSIÓN LÍQUIDO:** Es cuando su densidad disminuye a medida que aumenta la temperatura. La temperatura del líquido en el sistema variará en gran medida con el tiempo.

**FLUÍDO:** sustancia entre cuyas moléculas hay una fuerza de atracción débil. Los fluidos se caracterizan por cambiar de forma sin que existan fuerzas restitutivas tendientes a recuperar la forma "original"

**FLUJO AXIAL:** El flujo que circula paralelo al eje de rotación de la turbina, es decir las gotas de agua evolucionan en un cilindro de paredes delgadas.

**FLUJO MULTIFÁSICO:** En la mecánica de fluidos, es el flujo de múltiples fases en que las dos fases no están relacionados químicamente o cuando más de dos fases están presentes.

**FLUJO LAMINAR:** El flujo laminar se produce cuando las capas adyacentes de fluido se mueven uno respecto al otro en líneas de corriente suave, sin mezcla

macroscópica. En el flujo laminar, de cizallamiento viscoso, que es causada por el intercambio de impulso molecular entre capas de fluido, es la influencia predominante en el establecimiento del flujo de fluido. Este tipo de flujo se produce en las tuberías cuando  $Re < 2.100$ .

**FLUJO MONOFÁSICO:** Corresponde al transporte de una fase líquida o una fase gas.

**FLUJO RADIAL:** El flujo evoluciona en un plano perpendicular al eje.

**HOMOGENEO:** Sistema que está formado por una sola fase, es decir, que tiene igual valor de propiedades intensivas en todos sus puntos o de una mezcla de varias sustancias que da como resultado una sustancia de estructura y composición uniforme.

**HOUSING:** Carcasa rígida que encierra y protege una pieza de movimiento o equipos delicados.

**IMMISCIBLE** - La incapacidad de dos o más sustancias o líquidos para disolverse fácilmente el uno en el otro.

**INYECCIÓN:** procedimiento mediante el cual se hace pasar un químico o un material viscoso a través de un tubo o un conducto circular para tratamiento de crudo según las necesidades.

**MEDIO AMBIENTE:** Conjunto de valores naturales, sociales y culturales existentes en un lugar y en un momento determinado, que influyen en la vida del ser humano y en las generaciones venideras.

**MISCIBLE:** Capaz de mezclar. Dos líquidos se dice que son miscibles si son parcial o completamente solubles entre sí. Comúnmente, el término miscible se entiende que significa que los dos líquidos son completamente solubles entre sí.

**NUMERO DE WEBER:** Es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos y que es útil en el análisis de flujos en donde existe una superficie entre dos fluidos diferentes. Es una medida de la importancia relativa de la inercia del fluido comparada con su tensión superficial

**P&ID:** Diagrama de Tuberías e Instrumentación.

**PROCESO:** Conjunto de actividades mutuamente relacionadas, que transforman elementos de entrada en resultados (NTC-ISO 9000:2005).

**PUNTO DE ROCÍO:** Es la temperatura a la que empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire, produciendo rocío, neblina o, en caso de que la temperatura sea lo suficientemente baja, escarcha.

**RÉGIMEN DE FLUJO:** Descripción de la distribución geométrica de un fluido multifásico moviéndose a través de una tubería. Para describir esta distribución, se utilizan muchos términos diferentes y la distinción entre cada uno de ellos es cualitativa y algo arbitraria.

**VELOCIDAD DE FLUJO:** La masa volumétrica, o peso de un fluido que pasa a través de un conductor por unidad de tiempo. La velocidad real o la velocidad de movimiento del fluido.

**VISCOSIDAD:** Resistencia que presenta el fluido al moverse.

## RESUMEN

**TITULO:** “ELABORACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE MEZCLADORES EN LÍNEA PARA HOMOGENEIZACIÓN DE CRUDOS PESADOS CON DILUYENTE”<sup>1</sup>**AUTOR:** ROBERT LEON HERRERA<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Crudos pesados y extrapesados, dilución, homogeneización, transporte de crudos.

### DESCRIPCIÓN:

Con la identificación y definición de los aspectos más relevantes sobre la dilución se describe el efecto sobre la viscosidad y la densidad de los crudos pesados. La ley de mezcla se basa en la fracción másica de los componentes para estimar la densidad del producto final; no obstante, esta relación no es una simple adición aritmética, como lo explica el factor de encogimiento. Para el caso de fluidos con alta y media viscosidad el mezclado en régimen laminar es el recomendado.

Los mezcladores estáticos instalados en secciones tubulares han permitido dar solución a las necesidades de mezclado logrando las características de homogeneidad esperadas. Internamente estos equipos constan de elementos de distintas configuraciones construidos en una variedad de materiales que permiten adaptarse a las diferentes condiciones de proceso.

Debido a que la definición cuantitativa es difícil para esta clase de equipos, las consideraciones generales de diseño se centran en el cálculo de la caída de presión, longitud de mezclado, y requerimientos de potencia.

Una vez se finaliza el dimensionamiento de los equipos y se calculan las variables físicas, la estimación de los Costos de Inversión (CAPEX – Capital Expenditure), Costos de Operación (OPEX – Operating Expense), y otros costos asociados, son la base de la evaluación financiera, para lo cual se emplean herramientas como el Valor Presente Neto (VPN), con las que se definen si un proyecto es rentable ó no.

---

<sup>1</sup> Monografía Especialización en Producción de Hidrocarburos

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director M.Sc. Edison Odilio García Navas.

## ABSTRACT

**TITLE:** “DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR SELECTION OF STATIC MIXERS TO HOMOGENIZING HEAVY CRUDE WITH DILUENT”<sup>3</sup>

**AUTHOR:** ROBERT LEON HERRERA<sup>4</sup>

**KEY WORDS:** Heavy crude and extraheavy, dilution, homogenizing, crude oil transport.

### DESCRIPTION:

With the identification and definition of the most relevant aspects of the dilution, the effect on the viscosity and density of heavy crudes is described. Mixing law is based on the mass fraction of the components to estimate the density of the final product; however, this relationship is not a simple arithmetic addition, as explained by the shrinkage factor. In the case of fluids with high and medium viscosity laminar mixing it is recommended.

Static mixers installed in tubular sections have let give solution to the needs of achieving mixed characteristics of expected homogeneity. Internally these devices consist of elements of different configurations constructed in a variety of materials that allow accommodate different process conditions.

Because of the quantitative definition is difficult for this type of equipment, the general design considerations focus on the calculation of the pressure drop, mixing length, and power requirements.

Once the sizing of equipment is completed and the physical variables, the estimated investment costs (CAPEX - Capital Expenditure), Operating Costs (OPEX - Operating Expense), and other associated costs are calculated, they are the basis of the financial evaluation, for which tools such as Net (VPN) Present Value, with which defininen the profitability of a Project.

---

<sup>3</sup> Monography Specialization in Production of Hydrocarbons

<sup>4</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director M.Sc. Edison Odilio García Navas.

## INTRODUCCIÓN

La producción, transporte y deshidratación de crudos pesados y extrapesados representa la mitad de las fuentes de crudo en el mundo, el empleo de métodos convencionales para su extracción y tratamiento pueden ser difíciles y costosos, pues requiere hacer uso de técnicas que adicionen calor o reduzcan la viscosidad.

Buscando lograr una producción más eficiente de este tipo de fluidos, a medida que disminuyen las reservas de petróleo mediano y liviano convencional, se requiere del desarrollo o aplicación de tecnologías que permitan aprovechar el enorme potencial que presentan las vastas acumulaciones de crudos pesados.

Para la deshidratación y transporte de crudos pesados y extrapesados pueden emplearse distintos tipos de diluyentes, entre los que encontramos la nafta, el fin principal es lograr una mezcla crudo/diluyente con una viscosidad de 300 centistokes @ 30°C, con un porcentaje de diluyente entre el 5% - 35% en volumen de crudo; preferiblemente entre 10% - 20 %.

Con el fin de lograr una mezcla homogénea que cumpla con las especificaciones requeridas se emplean mezcladores, y para el caso de procesos continuos como es la producción de hidrocarburos la clase de mezcladores empleados son del tipo Estático, llamados así por que no poseen partes móviles, y se instalan en las líneas de producción aguas abajo del punto de inyección del diluyente.

En su interior contienen elementos de mezclado uno tras de otro, los cuales pueden variar en su diseño según sea el fabricante; su cantidad depende del grado de dificultad del mezclado, producto del tipo componentes que forman la mezcla.

## 1. ASPECTOS RELEVANTES SOBRE DILUCIÓN DE CRUDO PESADO

El desarrollo de tecnologías convencionales como la dilución, se fundamentan en la reducción de la viscosidad y/o en el incremento de la gravedad API del crudo producido, por lo cual se iniciará con la definición de los aspectos más importantes involucrados en la dilución de crudos pesados.

### 1.1 CRUDOS PESADOS

Los petróleos crudos se clasifican como livianos, medianos, pesados o extrapesados. Esta clasificación está muy vinculada a la gravedad específica o índice de grados API la cual también nos da una idea de la viscosidad o fluidez de cada tipo de crudo. En la tabla 1 se pueden observar valores típicos de viscosidad de acuerdo a la gravedad API para varios tipos de crudo.

**Tabla 1. API y Viscosidad de los crudos.**

Tipo de Crudo	°API	Viscosidad Promedio, CP	Gravedad, gr/cc
Diluyente	58 – 65	0.2 @ 160°F	0.706
Crudo Liviano	30 – 40		0.87 – 0.83
Crudo Mediano	22 – 29.9		0.92 – 0.87
Crudo Pesado	10 – 21.9 (18,94 @ 60°F)	100 cp @ 60°C	1.00 – 0.92
Crudos Extrapesados /bitúmenes	< 10 (8.6 API @ 60°F)	1'114760 Cp @ 60°C	>1.00

Fuente: Tipos de Petróleo crudo según grados API. [www.venelogia.com/archivos/](http://www.venelogia.com/archivos/)

En el proceso de tratamiento de crudo la utilización de separación gravitacional e inyección de diluyente, garantiza la obtención de crudos deshidratados de alta calidad sin necesidad de aplicar tratamientos térmicos, químicos, eléctricos ni mecánicos, así estos crudos pueden ser transportados bajo especificaciones técnicas (BS&W < 0,5% y viscosidad > 275 cst).

La Dilución se ha empleado en países como Venezuela, Canada y Colombia, permitiendo:

Manejar y transportar crudos pesados o bitúmenes a largas distancias.  
Realizar una deshidratación más efectiva.  
Un mejor manejo de los crudos pesados en los procesos de campo.

Todo esto como consecuencia de acentuar la diferencia de densidad y la viscosidad entre la mezcla y el agua.

En el proceso de transporte se observa una disminución de la viscosidad de la mezcla respecto a la viscosidad del crudo pesado o extrapesado, incrementando la tasa de flujo respecto a la correspondiente al crudo pesado, todo esto manifestado en una reducción de los requerimientos de energía cuando los efectos de la viscosidad son predominantes, alcanzando esta reducción un máximo, a partir del cual los requerimientos de energía se incrementan como una consecuencia de predominio de los efectos dinámicos.

En Colombia, la viscosidad óptima para la mezcla de crudo Castilla y Nafta (Castilla Blend) es de alrededor de 300 Cstk a 30°C para el oleoducto Apiay – Porvenir, el principal cuello de botella en el sistema de evacuación de crudos pesados de la cuenca Llanos desde los campos productores atravesando la cordillera de los Andes hasta la refinería de Barrancabermeja y el puerto de Exportación de Coveñas.<sup>5</sup>

## 1.2 FLUJO LAMINAR Y FLUJO TURBULENTO

La diferencia entre los flujos laminar y turbulento fueron establecidos por Reynolds, el cual condujo una serie de experimentos en los cuales inyectó un colorante en el agua que fluía en una tubería de vidrio.

A bajos caudales, el colorante permaneció uniforme y regular a medida que fluía corriente abajo. A caudales más elevados, la película de colorante se hacía inestable e irregular, llegando a distribuirse en toda la tubería, lo que establece la existencia de una velocidad que origina la **mezcla** entre los fluidos. Es así como los resultados de sus experimentos se representan en términos de una variable adimensional, que recibe el nombre de número de Reynolds, la cual se expresa por la relación:

---

<sup>5</sup> GARCIA, Cesar et. al. Optimización del Transporte por Oleoducto de Crudo Pesado Castilla. Revista Fuentes: El Reventón Energético. 2010, Vol. 8 No. 1, Enero – Junio, pp. 17 – 28.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (\text{Ec. 1})$$

Para situaciones de ingeniería puede considerarse:

- Régimen de flujo laminar  $Re < 2100$
- Régimen de flujo transitorio  $2100 < Re < 4000$
- Régimen de flujo turbulento  $Re > 4000^6$

Para flujo laminar, la ecuación de Hagen-Poiseulle:

$$f = \frac{16}{Re}, \quad Re \leq 2100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Puede obtenerse a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes y tiene un ajuste excelente a los datos experimentales. Puede reescribirse en términos del flujo volumétrico,  $Q = \frac{V\pi D^2}{4}$ , como

$$Q = \frac{\pi \Delta P D^4}{128 \mu L} \quad Re \leq 2100 \quad (\text{Ec. 3})$$

Para flujo turbulento en tubos lisos, se puede obtener el coeficiente de fricción con buena precisión en un amplio rango del número de Reynolds, utilizando la ecuación de Blasius:

$$f = \frac{0.079}{Re^{0.25}}, \quad 4000 < Re \leq 10^5 \quad (\text{Ec. 4})$$

La fórmula de Colebrook da una buena aproximación para la relación  $f$ - $Re$ - $(\epsilon/D)$  para tubos rugosos, en todo el rango de flujo turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left[ \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{1.256}{Re \sqrt{f}} \right] \quad Re > 4000 \quad (\text{Ec. 5})$$

---

<sup>6</sup> MOTT, Robert. Mecanica de Fluidos. Mexico, Editorial Pearson, 2006, pág. 231

La ecuación de Churchill tanto para tubos lisos como rugosos ofrece la ventaja de ser explícita en  $f$ :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left[ \frac{0.27\varepsilon}{D} + \left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} \right] \quad Re > 4000 \quad (\text{Ec. 6})$$

En flujo laminar,  $f$  es independiente de  $\varepsilon/D$ . En flujo turbulento, el coeficiente de fricción para tubos rugosos se aproxima mucho a la curva correspondiente al tubo liso para un cierto rango del número de Reynolds (flujo hidráulicamente liso).

### 1.2.1 Mezclado laminar

La mezcla en régimen laminar se alcanza a través de la división, transposición y recombinación repetida del flujo de líquido alrededor del elemento de mezcla. Los componentes a ser mezclados se propagan en un gran número de finas capas. El mezclador estático está compuesto de un número determinado de idénticos elementos de mezcla, a mayor número de éstos, más finas son las capas, y mejor la homogeneidad alcanzada.

El proceso de distribución laminar usualmente produce un efecto de mezclado por reorganización aleatoria de regiones del fluido en un proceso de flujo descontrolado. Este proceso reducirá el volumen de las regiones individuales no uniformes por reorganización continua de las secciones del mezclador, este es el principal aspecto del funcionamiento de los mezcladores estáticos.

La dispersión de corte laminar es requerida en aplicaciones de mezclado de partículas donde el tamaño final de las partículas o gotas de la fase dispersa es reducida por procesos de mezclado. En mezclado laminar el esfuerzo de corte disponible para dispersión es usualmente más grande cuando la viscosidad de la mezcla es alta.

En la selección y diseño del mezclador, los procesos de mezclado por distribución o por dispersión pueden ser requeridos a tener en cuenta. Otras variables importantes a tener en cuenta son las relaciones de viscosidad y de flujo.

El mezclado laminar normalmente es asociado a fluidos de alta viscosidad, y se espera que propiedades de fluido No-Newtoniano puedan encontrarse en un número significativo de casos.

**1.2.1.1 Índices de Mezclado.** Hay varios índices usados para describir la mezclabilidad, tales como: Varianza ( $\sigma^2$ ), varianza basada en índices de mezclabilidad, longitud de la interfase, auto-correlación. La varianza es ampliamente usada y está definida por:

$$\sigma^2 = \frac{\Sigma(C-\bar{C})^2}{n-1} \text{ (Ec. 7)}$$

Donde C es la concentración de la mezcla,  $\bar{C}$  el principal valor de la concentración y n el número de muestras.

**1.2.1.2 Rata de Mezclado.** Los mezcladores estáticos fueron desarrollados en primera instancia para operaciones de mezclado en flujo laminar, sin embargo han presentado aplicaciones prácticas en **distribución de transferencia de calor y tiempo de residencia.**

En la descripción y evaluación de las características de mezclado de los mezcladores estáticos; específicamente en la rata de mezclado, el concepto de numero de subdivisiones del flujo producido por los elementos internos, lo cual fue interpretado hipotéticamente como numero de “Estricciones” ( $n_s$ ) en un patrón de mezcla producido de iguales volúmenes de material negro y blanco segregado.

$$n_s = 2^e \text{ (Ec. 8)}$$

Donde e es el número de elementos de mezclado.

**1.2.1.3 Energía y eficiencia.** En flujo laminar las características de la rata de caída de presión del flujo de mezcladores estáticos son simples y análogos al flujo de la tubería.

Para flujo laminar el producto del factor de fricción (f) por el número de Reynolds (Re) es aproximadamente una constante: 64.

### 1.3 VISCOSIDAD

La viscosidad de la mezcla multifasica no puede ser determinada de manera exacta ya que cada una de las fases tiene un efecto sobre la viscosidad de la mezcla. La

viscosidad del flujo es utilizada en la determinación del número de Reynolds como también en otros números adimensionales usados como parámetros correlacionantes. Un método utilizado para determinar aproximadamente la viscosidad de la mezcla es tomar el promedio ponderado.

$$\mu_m = \mu_L H_L + \mu_G H_G \text{ (Ec. 9)}$$

$$\mu_m = \mu_L \lambda_L + \mu_G \lambda_G \text{ (Ec. 10)}$$

Una viscosidad baja se define como 5 Pa.s, una viscosidad media de 5 a 50 Pa.s (50 a 500 Poises), y por arriba de 50 Pa.s (500 Poises) se define como alta viscosidad. En este tipo de viscosidad es la que se usa por lo general los impulsores helicoidales o de Ancla<sup>7</sup>.

La viscosidad y la velocidad de flujo son los parámetros más importantes para el diseño del mezclador. La relación de las viscosidades de las diversas corrientes es la más significativa para la eficiencia de mezclado. El mezclador estático es ideal para un sistema con dos líquidos miscibles con la misma viscosidad, densidad, sin tensión interfacial, fluyendo a velocidades de flujo iguales y de manera continua.

### 1.3.1 Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de un fluido

Al aumentar la temperatura, la viscosidad de todo líquido disminuye, mientras que la viscosidad de los gases aumenta. Un crudo pesado o extrapesado, por lo general, es bastante difícil de deformar cuando está frío, lo cual indica que tiene una alta viscosidad. Conforme la temperatura aumenta, la viscosidad disminuye notablemente.

En el análisis del flujo de un fluido a menudo surge la relación entre la **viscosidad absoluta**  $\mu$  y la **densidad**  $\rho$ : esta relación recibe el nombre de **viscosidad cinemática**  $\nu$ , cuyas dimensiones en el sistema métrico son el Stoke ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ). Una ecuación muy usada para representar el efecto de la temperatura sobre la

---

<sup>7</sup> ENCICLOPEDIA DE TECNOLOGÍA QUÍMICA. Kirk-Othmer, Editorial Limusa S.A. de C.V Mexico, 1998. Pp 934

viscosidad cinemática es la ecuación basada en el método ASTM D-341 “ Standard Viscosity-temperature Charts for Liquid Petroleum Products“.

$$\text{Log}(\log(v + 0.7)) = A + B \text{Log}T \quad (\text{Ec. 11})$$

Existen modelos correlacionales empleados en la determinación del efecto de la temperatura sobre la viscosidad del petróleo, tales como:

- Correlación de Beal.
- Correlación de Beggs-Robinson
- Correlación de Glasso
- Correlación de Kartoatmodjo-Schmidt
- Correlación de McCain
- Correlación de De Ghetto

### 1.3.2 Efecto de la presión sobre la viscosidad de un fluido

El efecto de la presión sobre la viscosidad de un fluido se puede estimar a partir de la ecuación:

$$\text{Log} \left( \frac{\mu}{\mu_a} \right) = \frac{P}{1000} (0.0239 + 0.01638\mu_a^{0.278}) \quad (\text{Ec. 12})$$

## 1.4 DENSIDAD

Densidad es la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia<sup>8</sup>:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Ec. 13})$$

El peso específico es la cantidad de peso por unidad de volumen de una sustancia, donde V es el volumen de una sustancia que tiene peso w:

---

<sup>8</sup> MOTT. Op. cit.,

$$\gamma = \frac{w}{V} \quad (\text{Ec. 14})$$

La gravedad específica es la razón del peso específico de una sustancia al peso específico del agua a 4 °C:

$$sg = \frac{\gamma_s}{\gamma_w@4^{\circ}C} = \frac{\rho_s}{\rho_w@4^{\circ}C} \quad (\text{Ec. 15})$$

La relación para hallar el peso específico está dado por:

$$\gamma = \rho g \quad (\text{Ec. 16})$$

La temperatura de referencia para medición de gravedad específica en la escala Baumé o del American Petroleum Institute (API), es de 60°F. Para líquidos más ligeros que el agua, el API desarrolló una escala un poco diferente a partir de la escala Baumé. Las formulas son:

$$sg = \frac{141.5}{131.5 + \text{grados API}} \quad (\text{Ec. 17})$$

#### 1.4.1 Efecto de la temperatura sobre la densidad.

Chirinos y colaboradores de los resultados experimentales realizados sobre crudo pesado producido en la Faja Petrolífera del Orinoco en Venezuela “Rheological properties of crude oils from the Orinoco oil belt and their mixture with diluents” concluyeron en que la variación de la densidad con la temperatura viene dada por la relación<sup>9</sup>:

$$\rho = -3.433 * 10^{-4}(T - 60) + 141.5/(131.5 + ^{\circ}API) \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde la temperatura T se expresa en °F y la densidad en gr/cc.

---

<sup>9</sup> GONZALEZ, Julio. Manejo de Crudos Pesados y Extrapesados en Facilidades de Producción. ACE INTERNATIONAL. Noviembre 19 al 23 de 2007.

## 1.5 DISTRIBUIDORES DE FLUJO

La distribución uniforme del fluido es esencial para la operación eficiente de los equipos de mezclado, deben tomarse las consideraciones adecuadas respecto del comportamiento del flujo en el distribuidor, aguas arriba/aguas abajo del distribuidor y respecto de los requerimientos del equipo de distribución. Muchas veces estos distribuidores no se tienen en cuenta por los diseñadores de equipos y una fracción del equipo del proceso sufre una mala distribución de forma innecesaria. Existen varios tipos de distribuidores, entre otros:

**Distribuidores de tubería Perforada.** Si los agujeros de salida son uniformes en tamaño y espaciado, el flujo de descarga ira creciendo hacia la parte cerrada terminal.

Cuando existen irregularidades aguas arriba del distribuidor (codos) causan variaciones en el flujo de los primeros agujeros del distribuidor.

Cuando la caída de presión por fricción domina sobre la recuperación inercial de presión, el flujo de descarga será mayor hacia el extremo de alimentación del distribuidor.<sup>10</sup>

## 1.6 MEZCLADORES ESTÁTICOS

Los mezcladores estáticos son aparatos diseñados para operar en procesos continuos, sin emplear partes móviles, lo cual permite la homogeneización de la mezcla de materiales fluidos. Por lo general, los fluidos son líquidos, sin embargo, los mezcladores estáticos también se utilizan para mezclar corrientes de gas, dispersar un gas en un líquido, o dispersar líquidos inmiscibles entre sí<sup>11</sup>.

Estos equipos han sido usados en el mezclado/dispersión, reacción, calentamiento/enfriamiento de líquidos de alta/baja viscosidad, lechadas, sólidos, gases, y mezcla de sólidos, gases y líquidos permitiendo la mezcla de fluidos con igual o diferentes viscosidades y/o ratas volumétricas.

---

<sup>10</sup> PERRY, Robert H, et al., Manual del Ingeniero Químico. Editorial Mc Graw Hill, España. Volumen I, 7ª Edición. pp6.12 a 6.15 y 6.45 a 6.46

<sup>11</sup> N, Harnby, et Al. Mixing in the process industries. 2nd. Edición. Oxford. Butterworth-Heinemann. 1997.

Dentro de las aplicaciones más típicas en la industria del petróleo y del gas los mezcladores estáticos se emplean en:

- ✓ Desalinización de petróleo, extracción – lavado con agua.
- ✓ Limpieza de gases, scrubbers.
- ✓ Desulfuración de corrientes gaseosas – unidades Claus.
- ✓ Recalentamiento de LNG – en plantas regasificadoras.
- ✓ Mezclas de gasolinas, lubricantes, etc.
- ✓ Aditivación de gasolinas, biodiesel, etc.
- ✓ Homogeneización para toma de muestras en tuberías de petróleo.

De manera general los mezcladores pueden emplearse para cubrir el siguiente rango de unidades de proceso:

**Mezcla:** Mezcla de productos miscibles entre ellos independientemente del volumen, densidad, viscosidad o propiedades de los medios.

**Dispersión y contacto:** Dispersar dos o más fases para procesos de lavado, extracción, transferencia de materia o reacción. Poner en contacto gases y líquidos para crear la máxima superficie de transferencia de materia y altas velocidades de absorción, reacción, evaporación y condensación.

**Acondicionamiento:** En los flujos de proceso aguas arriba de reactores e intercambiadores de calor o lechos de catalizador para aumentar eficiencia de operación.

**Intercambio de calor y reacción:** intercambiadores de calor para procesos de reacción bajo control, con altas conversiones y temperatura homogénea. Un tiempo medio de residencia homogéneo, un flujo pistón ideal y el control de temperatura, permitiendo máximas conversiones.

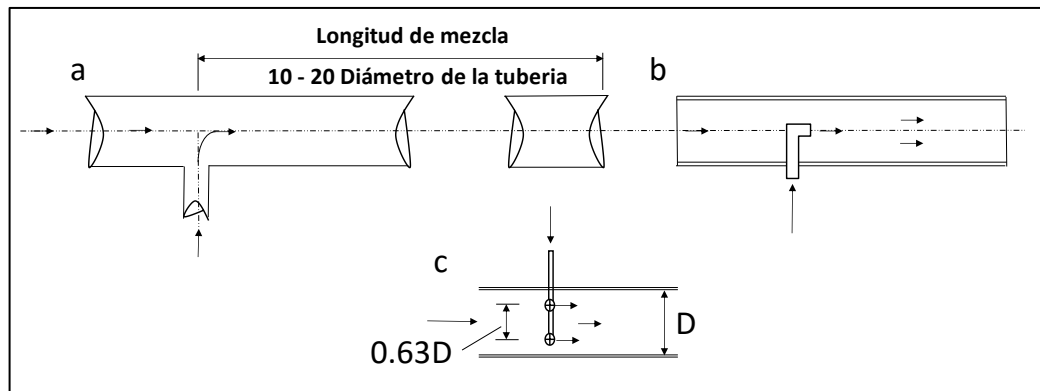
**1.6.1 Principios de operación.** Los mezcladores estáticos constan de elementos de mezcla instalados en secciones tubulares (de sección circular o cuadrada). Sus tamaños pueden variar desde 3/16” para aplicaciones en laboratorio, o en tuberías de proceso desde 1/4” sch. 40, hasta 120” de diámetro.

En la Figura 1, se muestran algunos diseños típicos de mezcladores en línea. Para la mezcla de fluidos de baja viscosidad es adecuada una simple “T” para la mezcla seguida de una longitud de tubería entre 10 hasta 20 veces el diámetro de la tubería,

siempre y cuando la circulación sea turbulenta, y las densidades y caudales de los fluidos sean similares.

En los mezcladores por inyección (Figura 1-b y 1-c), en los que se introduce uno de los fluidos dentro de la corriente por la que circula el otro mediante una tubería concéntrica o en una serie de chorros dispuestos anularmente, la mezcla se llevará a cabo por arrastre y difusión turbulenta. Tales dispositivos se deben usar cuando un caudal sea mucho menor que el otro, y se obtendrá una mezcla satisfactoria en una longitud de tubería de aproximadamente 80 veces el diámetro de tubería. La inclusión de deflectores u otras restricciones a la circulación disminuirá la longitud requerida para la mezcla.<sup>12</sup>

**Figura 1. Tipos de Mezcladores en línea: (a) T, (b) Inyección (c) Anular.**



**Fuente:** MC CASE, Warren, Operaciones unitarias en ingeniería química.

Para el caso de gases o fluidos de baja viscosidad con frecuencia se mezclan satisfactoriamente, haciéndolos circular juntos a través de una determinada longitud de tubería de conducción abierta o de una tubería que contiene placas con orificios o placas deflectoras segmentadas. En condiciones adecuadas, la longitud de la tubería puede ser tan corta como 5 a 10 diámetros de tubería, aunque se recomiendan tuberías de 50 a 100 diámetros.

El rango de aplicación de los mezcladores estáticos es bastante amplio cubriendo procesos en flujo laminar o turbulento. Los procesos de mezclado en flujo laminar son producidos por una combinación del flujo que es dividido y reorientado, mientras que en flujo turbulento los elementos causan un nivel más alto de turbulencia comparado con el que se logra en la tubería sin el uso de estos elementos.

<sup>12</sup> OPERACIONES UNITARIAS EN INGENIERIA QUIMICA. Mc Case, Warren. Editorial Mc Graw-Hill, Mexico 2007. 7ª Edicion. pp 647

**El numero recomendado de elementos helicoidales es de 6 para  $1000 > Re > 100$ , de 12 para  $100 > Re > 10$ , y de 18 para  $Re < 10$ .** Se requieren muchos elementos para los líquidos muy viscosos debido a la baja difusividad molecular. La caída de presión por unidad de longitud es aproximadamente seis veces más que en las tuberías vacías cuando  $Re < 10$ , pero aumenta hasta aproximadamente 50 a 100 veces más que en las tuberías vacías cuando  $Re = 2000$ .

Los mezcladores estáticos pueden además utilizarse para hacer dispersiones líquido-Líquido, y aproximadamente de 10 a 20 elementos en serie producen una buena dispersión en equilibrio, De manera general se puede afirmar que el número de elementos requerido para cualquier aplicación depende del grado de dificultad del mezclado, siendo necesario el uso de más elementos para tareas mas difíciles.

Considerando la energía de superficie de una gota y la energía disruptiva debida a las fluctuaciones de la velocidad turbulenta,  $D_s$  se predice para variar con una potencia fraccional del número de Weber y el factor de fricción.

$$\frac{D_s}{D} = CWe^{-0.6}f^{-0.4} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde  $We = \frac{\rho c V^2 D}{\sigma}$

D = diámetro de la tubería

V = velocidad promedio

F = factor de fricción =  $\frac{D\Delta P}{2\rho c V^2 L}$

Un mezclador estático consiste de elementos individuales de mezclado organizados uno tras de otro. Cada elemento de mezclado está orientado  $90^\circ$  con respecto al elemento de mezclado adyacente logrando así mezclado en ambas direcciones horizontal y vertical. Los elementos estáticos de mezclado dividen, recombinan, aceleran/desaceleran, esparcen, arremolinan, o forman capas de fluido obligando a los componentes de la mezcla a estar en constante contacto tal que la corriente existente en el mezclador estático sea homogénea con respecto a la temperatura, concentración y velocidad, los cuales son igualados a través de toda la sección transversal. Por esta razón los mezcladores estáticos no son solo utilizados para cubrir necesidades de mezclado, sino que también en procesos de reacción.

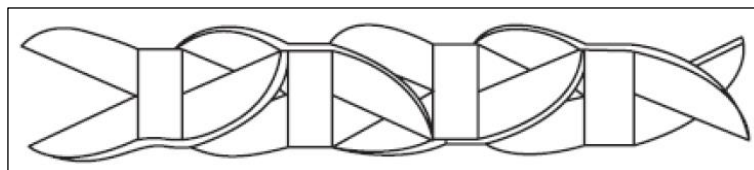
Existen diferentes tipos de diseños de mezcladores, los cuales por lo general están formados por elementos (serie de placas ó baffles desviadores) hechos de metal o de diversos tipos de plástico que son ubicados en un ángulo preciso con el propósito de direccionar el flujo, incrementar la turbulencia y lograr así el mezclado. Estos baffles pueden consistir de espirales de metal, hojas corrugadas, barras paralelas, orificios de diámetro pequeño, etc, los cuales en un pequeño grado obstruyen el flujo con algún grado de remezclado dependiendo del tipo de diseño. Del mismo modo, la carcasa del mezclador (housing o la misma tubería) puede estar hecha de metal o de plástico. Los materiales típicamente empleados en la construcción de los componentes del mezclador estático son acero inoxidable, polipropileno, teflón, kynar y poliacetal.

El diseño general del sistema incorpora un método para la introducción de dos corrientes de líquidos en el mezclador estático. Mientras las corrientes atraviesan el mezclador, las placas/baffles permanecen en reposo pero mueven y mezclan continuamente los materiales. La mezcla completa depende de muchas variables, incluyendo las propiedades del fluido, el diámetro del tubo interno, el número de elementos desviadores, y su diseño.

**1.6.2 Elementos de mezclado.** La mayoría de las aplicaciones de flujo turbulento pueden satisfacerse con 2, 3 o 4 elementos de mezclado, y pueden configurarse en 1, 2 ó 3 formas (ver Figuras 2, 3 y 4). En la Figura 5 se presenta una instalación típica de un mezclador estático.

**Estándar:** Es el elemento más común

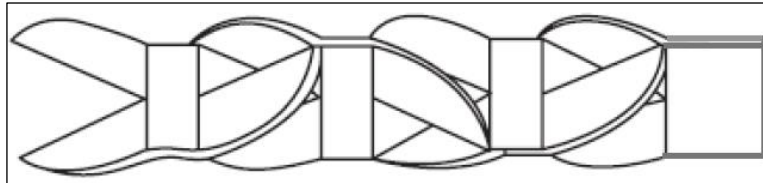
**Figura 2. Elemento de mezclado estándar**



**Fuente:** Kestrel Static Mixers. Installation, operating and maintenance manual. 2009

**Monomix:** Esta configuración se usa cuando se mezcla dos materiales que tienen gran diferencia en sus gravedades específicas.

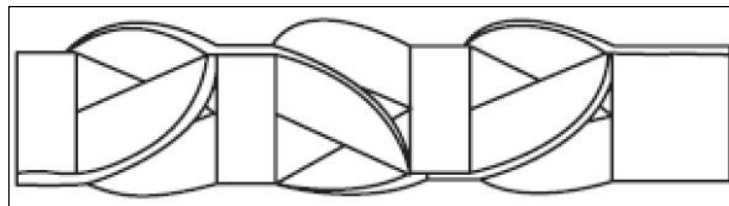
**Figura 3. Elemento de mezclado Monomix**



**Fuente:** Kestrel Static Mixers. Installation, operating and maintenance manual. 2009

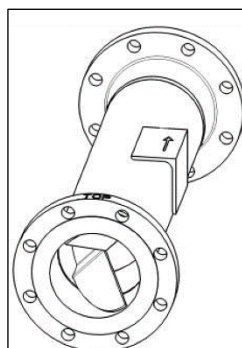
**Duomix:** Esta configuración es usada cuando se requieren cortas longitudes de mezclado. A altas velocidades solo dos elementos de mezclado en este arreglo permiten un completo mezclado de múltiples corrientes de entrada.<sup>13</sup>

**Figura 4. Elemento de mezclado Duomix**



**Fuente:** Kestrel Static Mixers. Installation, operating and maintenance manual. 2009

**Figura 5. Instalación Típica de los Mezcladores estáticos.**



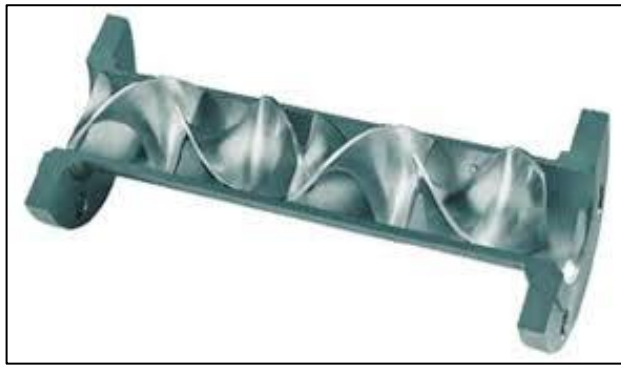
**Fuente:** Kestrel Static Mixers. Installation, operating and maintenance manual. 2009

---

<sup>13</sup> PHILADELPHIA MIXING SOLUTIONS. Kestrel Static Mixers. Installation, Operating, and Maintenance Manual. Rev A, Sept 2007, pp 7 – 9.

Otro de los principales tipos de mezclador es el de elemento helicoidal (Figura 6) que se utiliza principalmente con líquidos viscosos. Cada uno de los elementos, ocupa de 1 a 1.5 diámetros de longitud de tubería, divide la corriente en dos, al hacerlo girar un ángulo de 180° y lo descarga en el elemento siguiente, el cual está colocado formando un ángulo de 90° con el borde anterior del primer elemento. El segundo elemento divide de nuevo la corriente ya dividida y la gira 180° en sentido contrario. Sucesivamente los otros elementos subdividen la corriente hasta las estriaciones más delgadas que el proceso de mezcla puede realizar por difusión molecular.

**Figura 6. Mezclador Helicoidal**

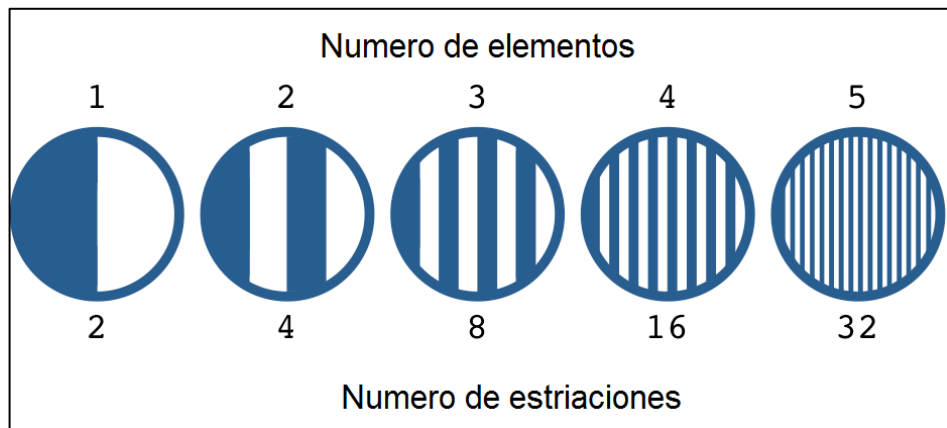


Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/chemineer/product-14821-240845.html>

Otro tipo de mezclador estático, usado para gases y líquidos de baja viscosidad, es el mezclador de vórtice turbulento

Como puede observarse en la Figura 6, los elementos fijos helicoidales se ubican dentro de una carcasa tubular. El diseño geométrico fijo de la unidad puede producir al mismo tiempo patrones de división de flujo y de mezcla radial (ver figura 7).

**Figura 7. División del flujo en un mezclador estático como función del número de elementos de mezclado.**

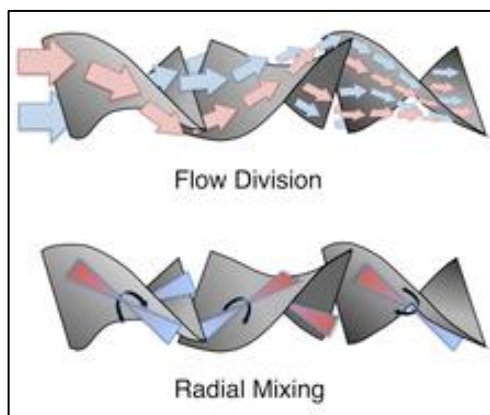


Fuente: Static Mixer. Wikipedia

**Flujo de División:** En el flujo laminar, un material procesado se divide en el borde de ataque de cada elemento del mezclador y sigue los canales creados por la forma del elemento. En cada elemento adicional, los dos canales se dividen de nuevo, dando lugar a un aumento exponencial en la estratificación. El número de estrías producidas es  $2^n$  donde  $n$  es el número de elementos en el mezclador estático.

**Mezclado Radial:** Tanto con flujo turbulento como laminar, la circulación rotacional de un material alrededor de su propio centro hidráulico en cada canal del mezclador produce una rápida mezcla radial. Los materiales procesados se entremezclan para reducir o eliminar los gradientes radiales de temperatura, velocidad y composición del material (ver Figura 8).

**Figura 8. Diagrama del modo de funcionamiento de la División del flujo y del mezclado Radial en un mezclador estático**



Fuente: Static Mixer. Wikipedia

En estos elementos se emplean piezas de platos corrugados, tal que se obtengan muchos caminos de flujo paralelos y por lo tanto dividen y recombinan los fluidos a mezclar al momento de pasar a través del mezclador. En la Figura 9 pueden observarse algunos diseños para elementos de mezclado.

**Figura 9. Tipos de Elementos en mezcladores estáticos.**



Tipo H. Giro helicoidal de 180° con elementos de mezclado adyacentes de sentido opuesto.



Tipo V. Platos corrugados a 45° o 30° del eje de la tubería con elementos de mezclado adyacentes a 90°.



Tipo GXR.



Tipo GX. Estructura de malla a 45° respecto del eje de la tubería.



Tipo GX-L



Tipo GX-LR

Fuente: STAMIXCO. Boletín GX static mixer product.

Las capas alternadas de corrugaciones son perpendiculares unas a otras de modo que los fluidos deben pasar a través de una serie de pequeñas cavidades. El mezclador rompe las gotas de agua en pequeñas gotas, estos mezcladores producen un rango de tamaños de gota de agua, como resultado de dos fenómenos opuestos. Las gotas grandes son convertidas en gotas pequeñas por acción del mezclado, mientras al mismo tiempo, estos mezcladores suministran grandes áreas superficiales donde las gotas pequeñas pueden almacenarse y coalescer.

Los mezcladores estáticos se diseñan para que suministren un tamaño de gota promedio, por medio de ecuaciones empíricas basadas en datos de laboratorio. *La desventaja más grande de los mezcladores estáticos es que ellos no se pueden*

*ajustar cuando la tasa de crudo cambia. Por lo tanto, si la tasa de crudo varía en un rango de 3 a 1, o más, los mezcladores estáticos no deberían ser usados como los únicos equipos de mezclado.*

## **1.7 MEZCLADORES ESTÁTICOS EN FLUJO LAMINAR.**

Cuando el flujo es laminar, ya sea monofásico o multifásico, sólo hay una opción de diseño: mezcladores estáticos o mezcladores sin movimiento. Los mezcladores estáticos están probados en una amplia gama de procesos de flujo laminar que implican fluidos newtonianos y de cizalladura. Algunos procesos son más complicados que otros. Muy a menudo, las instalaciones comerciales siguen a las evaluaciones de laboratorio o escala piloto, y el éxito depende del adecuado escalado. La metodología del escalado está bien establecida para los diseños de mezcladores estáticos principalmente utilizados en régimen de flujo laminar. Además de las aplicaciones de mezcla hay un valor en el armado del mezclador estático, y es el mejoramiento de la transferencia de calor de flujo laminar y para la creación de flujo pistón en reactores tubulares laminares. (ver Figura 10).

El mezclador está diseñado para lograr el grado deseado de homogeneidad y el tiempo necesario para la difusión. El mezclador estático óptimo desde el punto de vista de diseño del equipo sería el más compacto y operativamente el que causa la caída de presión más baja. El óptimo diseño del mezclador será el que genere más eficiente la superficie del fluido, o el dispositivo que genere la más alta tasa de división.

Cuando el mezclado laminar distributivo es complicado por diferencias de viscosidad, las opciones de diseño del mezclador estático son limitadas. Mezcladores estáticos de flujo elongado son requeridos. Cuando hay una resistencia en la interfaz, el mezclador estático debe ser tal que funcione a un esfuerzo de cizallamiento uniforme. Además, cuando hay algún grado de inmiscibilidad y una diferencia significativa en la viscosidad, la cizalladura elongacional se ha demostrado ser más eficiente que la cizalladura de rotación o simple.<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup> EDWAR L., Paul et al. Handbook of Industrial Mixing. Science & Practice. Wiley, Interscience, 2004.

La eficiencia del mezclado depende en gran medida de los flujos elongados dentro de la estructura del mezclador. Mezclado de materiales de alta viscosidad en una corriente de flujo laminar y de menor viscosidad, no es tan común, pero es igualmente difícil, lo cual requiere de flujos elongados controlados. Esfuerzo de corte del gas o líquido adicionado resulta ser extendido hasta el punto en que se vuelve inestable y se rompe al tamaño más pequeño.

Este proceso continúa hasta que la gota o burbuja se reduce a un tamaño que es estable bajo las condiciones de flujo del mezclador. Además para la creación de esta dispersión, el mezclador también debe distribuir la fase aditivo uniformemente sobre la sección transversal de la tubería. El diseño en X o barra transversal es el único diseño significativamente disponible en el mercado para este tipo de aplicación.

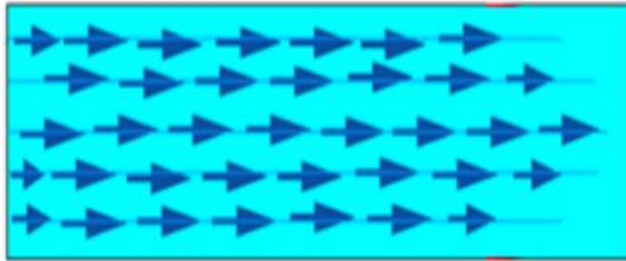
En la tabla 2 puede observarse un análisis comparativo entre las dimensiones y características físicas para varios tipos de mezcladores en flujo laminar.

**Tabla 2. Comparacion de mezcladores estaticos para homogeneidad equivalente en flujo Laminar.**

Mixing unit	Measured values		Comparison				
	L/D (CoV=0.05)	Ne.Re <sub>D</sub>	Volume	Holdup	Diameter	Length	Pressure drop
SMX	9	1237	1	1	1	1	1
SMXL	26	245	1.8	1.8	0.84	2.4	0.6
SMV	18	1430	4.6	4.5	1.3	2.7	2.3
General	29	220	1.9	1.8	0.84	2.7	0.6
HV	32	190	2	2	0.84	2.7	0.6
K	38	620	8.9	8.2	1.3	5.4	2.1
L	100	290	29	27	1.4	15.3	2.6
PMR	320	500	511	460	2.4	86	14.5
T	13	1150	1.94	0.88	1.1	1.5	1.35
N	29	544	4.5	3.8	1.1	3.6	1.40
ISG	10	9600	9.6	3.4	2.1	2.3	8.6

**Fuente:** JAVA, Aprilia. Static mixer (Engineering Desing Guideline). 2014, Karl Kolmetz, April 2014.

**Figura 10. Regimen de flujo Laminar en 2D.**



**Fuente:** JAVA, Aprilia. Static mixer (Engineering Desing Guideline). 2014, Karl Kolmetz, April 2014.

### **1.8 MEZCLADORES ESTÁTICOS EN FLUJO TRANSITORIO.**

La transición a la turbulencia es un proceso por el cual un flujo pasa de un habitual (laminar) a un régimen irregular (turbulento) a medida que aumenta el número de Reynolds. La comprensión de la transición a la turbulencia es importante para el control de flujo y la optimización del diseño.

La transición entre estos regímenes de flujo se establece por el número de Reynolds basado en el diámetro del tubo. Para un tubo el número tradicional es 2,100, pero hay un gran intervalo de transición. Para mezcladores estáticos el número de Reynolds es por lo general mucho más bajo basado en la caída de presión. Esto se debe a las tasas más altas de disipación de energía debido a los componentes internos. El valor exacto depende del diseño del mezclador, pero está en el intervalo 500 para muchos. Sin embargo, esta transición se basa en el cambio por caída de presión. La calidad de la mezcla turbulenta es más pobre en el bajo número de Reynolds, debido a estos cambios de turbulencia. Se debe tener cuidado en esta región.

El mezclador general HEV, que consta de pestañas, muestra una transición en el rendimiento de mezclado a un muy alto número de Reynolds. Esto se cree debido a la modificación de la estructura de vórtice de las pestañas en un número específico de Reynolds. Puesto que la relación pestaña / diámetro se mantiene constante, esto ocurre en un tubo de número de Reynolds más alto

## 1.9 MEZCLADORES ESTÁTICOS EN FLUJO TURBULENTO

Los mezcladores estáticos presentan aplicaciones en flujo turbulento multifásico cumpliendo con los requerimientos esperados en los procesos de absorción, reacción, extracción, transferencia de calor y cambio de fase, con mínimos gastos de dinero y energía, presentando una ventaja adicional como es su tamaño compacto, en relación a otras aplicaciones, ver Figura 11.

Se recomiendan mezcladores estáticos para las aplicaciones de flujo multifásico con una fase líquida continua y una fase gaseosa dispersa / fase líquida inmiscible. Cizallamiento turbulento se aplica de manera eficiente para el líquido ó gas adicionado para crear una dispersión/gotas /burbujas. El tamaño medio de gota depende del gasto de energía. También es importante la distribución del tamaño de gota o burbuja. Los mezcladores estáticos están diseñados específicamente para crear distribuciones uniformes de tamaño de gota con la superficie interfacial requerida para la reacción o extracción. La distribución de tamaño uniforme también facilita la separación aguas abajo de las fases en algún tipo de separador gravitacional ó inercial. Además de crear el área de superficie interfacial, en el mezclador estático se realiza la homogeneización a gran volumen, asegurando que todos los componentes del flujo son distribuidos de manera uniforme en la sección transversal y se expongan a niveles similares de disipación de energía turbulenta en el fluido que rodea la gota o burbuja.

La caída de presión del mezclador o energía de disipación requerida dependen de la cantidad de área interfacial necesaria para las aplicaciones limitadas de transferencia de masa y de rata de reacción, así como el tiempo de residencia requerido cuando la velocidad de reacción es limitada. La generación de área superficial varía con la cantidad de energía a la entrada por unidad de masa, y por lo tanto, existen limitaciones que deben ser consideradas en el diseño de los procesos del mezclador estático para aplicaciones multifásicas. Existen Criterios de dimensionamiento que se utilizan en flujos multifásicos turbulentos. Esta es una consideración muy importante, ya que muchos procesos son probados a escala piloto o de laboratorio, antes de su comercialización.

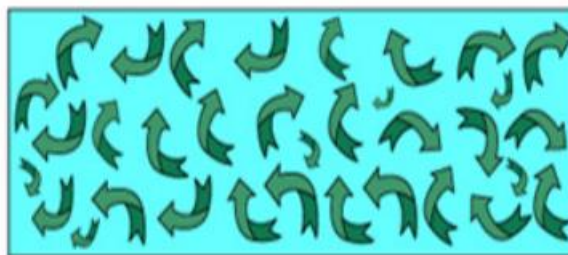
Los mezcladores estáticos en aplicaciones multifásicas donde el gas es continuo suelen ser diseños muy estructurados que proporcionan gran área superficial por unidad de volumen. Se necesita área superficial para la absorción de componentes de la fase de gas, separación de los componentes del líquido, condensación o vaporización. El mezclador adecuadamente seleccionado es un contactor de fases

compacta, altamente eficiente. La energía de flujo turbulento se utiliza para romper la alimentación líquida, logrando un cierto tamaño de gota en equilibrio y correspondiente superficie total. La turbulencia del flujo se mantiene uniformemente sobre la sección transversal de la tubería en canales de flujo individuales e interconectados. El líquido que moja la superficie del mezclador es continuamente despojado y re-dispersado en la corriente de gas.

La estabilidad de flujo se mantiene en una amplia gama de flujo gas-líquido frente a lo que ocurriría en la tubería vacía, un factor importante considera que los caudales de flujo másico y volumétrico del líquido y del gas podrían cambiar significativamente durante el proceso como resultado del cambio de fase de la totalidad o parte de las corrientes. Al igual que con todos los procesos multifásicos la caída del tamaño inicial (o análogo a las burbujas en el líquido continuo) es un importante factor de diseño. Boquillas de pulverización (con o sin la atomización de fluido) son utilizados a menudo para crear la distribución inicial del tamaño de gota utilizando energía adicional a la corriente y diseñando para una relativamente baja caída de presión del mezclador.

En condiciones turbulentas, el mezclado completo se lleva a cabo normalmente en tan sólo 4 o 6 elementos con pérdidas de presión relativamente menores. Para bajo flujo y / o requisitos de alta viscosidad, sin embargo, el número de elementos de mezclado estáticos que se requieren para lograr un mezclado homogéneo incrementa significativamente. Si la configuración del proceso es limitada en longitud.<sup>15</sup>

**Figura 11. Regimen de flujo turbulento 2D.**



Fuente: JAVA, Aprilia. Static mixer (Engineering Desing Guideline). 2014, Karl Kolmetz, April 2014.

---

<sup>15</sup> JAVA, Aprilia. Static mixer (Engineering Desing Guideline). 2014, Karl Kolmetz, April 2014.

El mezclado turbulento se logra incluso en una tubería sin elementos internos. Mediante la instalación de un mezclador estático la distancia para alcanzar una buena homogeneidad puede verse reducida en un factor de 10 a 30, y además de una forma controlada. El mezclador estático deberá tener uno o varios elementos creando vórtices de mezcla en el flujo.

Para fluidos de baja viscosidad puede emplearse flujo turbulento logrando un mezclado más rápido y fácil que para flujo laminar en fluidos viscosos. En flujo turbulento el mezclado radial es más fuerte y las características turbulentas llevan a una rápida reducción en las incrustaciones en cualquier heterogeneidad presente.

Las características del flujo turbulento pueden aplicarse a procesos multifásicos (contacto gas/líquido y líquido/líquido), teniendo un mayor coeficiente de transferencia de calor y de masa en flujo turbulento.

#### **1.10 MEZCLADOR DE PLATOS DE MÚLTIPLES ORIFICIOS**

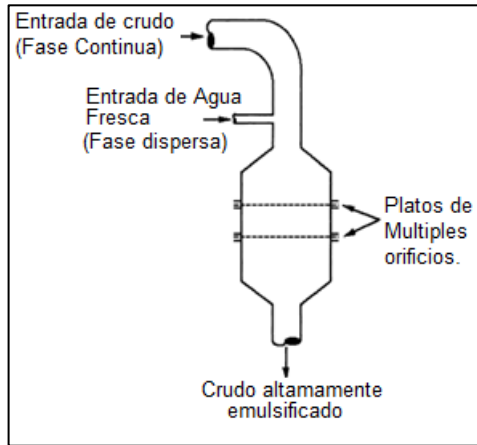
El grado de mezclado puede mejorarse si el área interfacial generada durante el mezclado es incrementada. Un dispositivo útil para tal propósito es el mezclador de platos de múltiples orificios (Multiple Orifice Plate Mixers, MOMs) mostrado en la Figura 12. Es importante señalar que aunque la teoría de dilución del agua remanente con agua fresca es acertada, puede ser imposible de implementar en una aplicación real. Todo depende del grado de mezclado del agua remanente con el agua de dilución<sup>16 17</sup>.

---

<sup>16</sup> SANTOS SANTOS, Nicolas. Especialización en Producción de Hidrocarburos. Modulo Operaciones de Tratamiento de Crudo. 2012, pp. 3-14 – 3-16.

<sup>17</sup> ELHADDAD, Elnori. New model to eliminate salts from sarir crude oil: a case study. International Journal of engineering research and science & technology Producción de Hidrocarburos. Modulo Operaciones de Tratamiento de Crudo. 2012, pp. 3-14 – 3-16.

**Figura 12. Mezclador de platos de múltiples orificios.**



Fuente: New model to eliminate salts from sarir crude oil: a case study. Internacional Journal of Engineering research and science & technology. Vol. 2, No. 4, Noviembre 2013.

### **1.11 MEZCLADORES ESTÁTICOS SULZER.**

Elementos de mezclado multicanal de baja caída de presión fueron desarrollados por los hermanos Sulzer. Estos accesorios buscan dividir el flujo en corrientes individuales que posteriormente se encuentran unas con otras así como fluyen transversalmente a través de los elementos. Cada elemento se mezcla principalmente en dos dimensiones, estando los elementos alineados  $90^\circ$  a sus elementos vecinos originando así un mezclado en tres dimensiones. Estos elementos cubren un amplio rango de mezclado desde laminar hasta turbulento ver Ilustraciones 13 y 14.

**Figura 13. Elementos de mezclado multicanal de baja caída de presión.**

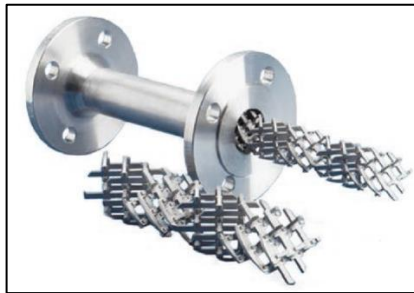


Fuente: Mixing and reaction technology. Sulzer.

**Figura 14. Elementos de mezclado Sulzer para varias aplicaciones**



(a) Sulzer: SMV, para uso en régimen de flujo turbulento o transicional.



(b) Sulzer: Elementos de mezclado SMX plus instalado en una camisa bridada. Para flujo laminar. El diseño SMX plus reduce la caída de presión un 50% con los mismos resultados de mezclado.

Fuente: Mixing and reaction technology. Sulzer.

**General Tipo G:** Está construido de paneles corrugados con la ondulación en un ángulo de  $45^\circ$  con respecto al eje lineal. Paneles separados, todos de un diámetro de longitud, están soldados a lo largo entre sí, cada panel tiene las ondulaciones en una dirección perpendicular a su vecino. Este conjunto de paneles, definido como un elemento, causa un patrón de mezcla de dos dimensiones. Elementos sucesivos se hacen girar  $90^\circ$  formando una unidad de largo, así como un tercer mezclado.

**SMV:** Varias hojas apiladas de metal corrugado a  $30^\circ$  o  $45^\circ$  con respecto al eje de la tubería. Cada elemento es de 0.5 a 1.0 diámetro en longitud y los elementos adyacentes se hacen girar  $90^\circ$  respecto uno al otro. El diámetro hidráulico de mezclado está dado por la altura de la corrugación o el número de hojas corrugadas apiladas.

**SMX:** Paletas guía están intersectando barras a  $45^\circ$  respecto al eje de la tubería. Cada elemento de mezclado tiene una longitud de 1.0 diámetro. Los elementos adyacentes se rotan  $90^\circ$ .

**SMXL:** Similar a la SMX, pero con barras intersectando a 30° respecto al eje de la tubería. Por lo general, el número de barras por elemento, y la longitud del elemento es variable, dependiendo de la aplicación.

**SMR:** Las paletas guía son tubos huecos a través de los cuales circula el fluido de transferencia de calor. El haz tubular está dispuesto similar a la forma del diseño SMX.

**KVM:** Consta de una pestaña inclinada. Axialmente, las pestañas están alrededor de 2,5 diámetros de distancia.

**KHT:** Cinta trenzada con la alternancia de giros izquierdos y derechos.

**SMF:** Este es un diseño especial para aplicaciones de alto taponamiento. La longitud del elemento es de aproximadamente 1.0 de diámetro.

**KFBE:** Diseño SMX/SMXL con barras guía para aplicaciones exclusivas en fluidización de gas en partículas sólidas.

- Mezcla en régimen laminar.
- Mejor equipo para trabajar con grandes diferencias en viscosidades.
- Homogeneización y dispersión de líquidos con alta viscosidad.
- Mezcla y homogeneización de fibras y polímeros fundidos.
- Introducción de agentes expandibles – diseño especial para poliols y poliuretanos.

**SMXTM:** mezcla de productos viscosos eficientes y no agresivos, reducidas fuerzas de cizalla.

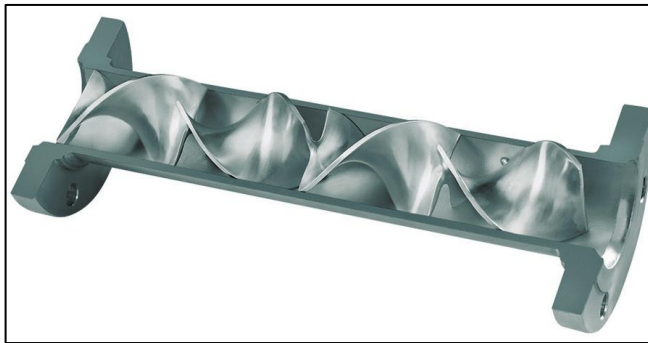
**SMXTM:** mejor grado de mezcla con menor longitud y mínima pérdida de carga a igual homogeneidad.

**SMXS:** extrema resistencia mecánica (diferenciales de presión superiores a 100bar).

## 1.12 MEZCLADORES ESTÁTICOS KENICS

Presentan un diseño de baja caída de presión, consistente en una serie de elementos de mezclado alineados a 90°, cada elemento es como una pequeña hélice que tiene entre 1 a 0.5 diámetros de longitud. Cada elemento tiene un giro de 180° a mano derecha e izquierda alternativamente en la tubería (Figura 15) Esta división del flujo, flujo en reversa y mezclado radial contribuyen al funcionamiento de este tipo de mezcladores.

**Figura 15. Ensamblaje de elementos de mezclado Kenics.**



Fuente: N, Harby, et Al. Mixing in the process industries. 2nd. Edición. Oxford. Butterworth-Heinemann. 1997.

**El mezclador general K:** Se compone de una serie de elementos de alternancia derecha e izquierda a 180°. Los elementos están colocados de tal manera que el borde de ataque de cada elemento es perpendicular al borde de salida del elemento precedente. La longitud de los elementos es típicamente uno y medio diámetros. Este tipo de mezclador estático se utiliza para la mezcla bajo condiciones de flujo laminar.

En el general K, un conjunto de elementos trenzados con giros izquierda - derecha hacen que el material se mueva de centro a centro. El flujo en cada elemento circula alrededor de su propio centro hidráulico causando mezcla radial. Después de viajar a través de un número de estos elementos, el fluido es homogeneizado con respecto al tiempo, y a la composición.

**KMS:** Trenzado de la cinta o un arco tipo lazo, con alternancia de giros izquierda y derecha. Cada elemento es 1.5 o 1.0 diámetro de longitud.

**KMX:** Una serie de varillas curvas inclinadas formando un enrejado tipo X; alternando en la dirección de cada diámetro de un elemento es una diámetro de longitud.

**HEV:** Una serie de cuatro pestañas espaciadas alrededor de la tubería. Un elemento consta de cuatro pestañas colocados simétricamente. Axialmente, las pestañas son alrededor de 1.5 diámetros de diferencia. El elemento mezclador helicoidal tradicional se utiliza sobre todo para una mezcla en línea bajo condiciones de flujo laminar y de transición. El mezclador de vórtice de alta eficiencia (HEV) se utiliza para la mezcla turbulenta de gases o líquidos miscibles.

### 1.13 OTROS TIPOS DE MEZCLADORES

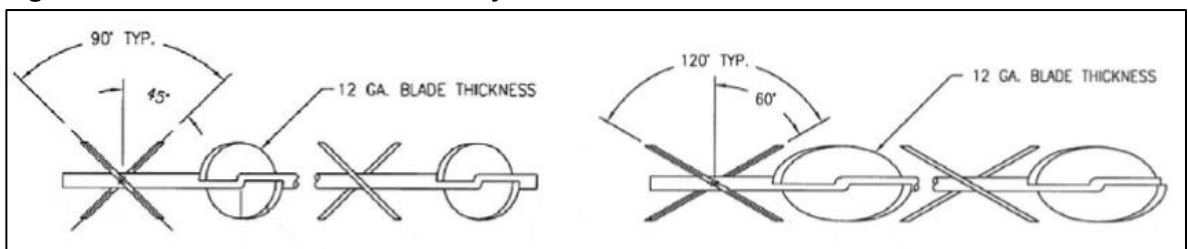
Existen otros tipos de mezcladores con diseños que causan una baja caída de presión:

Wymbs Engineering ofrecen diseños para flujo laminar (HV) y flujo turbulento (LV).

General R Charles Ross & Son tienen dos diseños para flujo turbulento: LPD (Low Pressure Drop) and LLPD (Ver figura 16). LPD: Consiste de una serie de platos semi – elípticos discriminatoriamente posicionados en serie, conforme el producto se mueve a través de los elementos el flujo es continuamente fraccionado en capas y rotado 90° alternantemente en el sentido de las manecillas del reloj y en sentido contrario.

El mezclador LLPD es construido con paneles semi – elípticos. Dos paneles están conectados en el medio a un ángulo de 120° (un elemento). Cada elemento es ajustado en la tubería con cada elemento vecino anterior y rotado 90° a lo largo del eje lineal.

**Figura 16. Mezcladores Estáticos LPD y LLPD.**



Mezclador LPD

Mezclador LLPD



Mezclador LPD



Mezclador LLPD

**Fuente:** Static Mixer Design and Applications. Charles Ross and Son Company.

Los mezcladores estáticos LPD and LLPD son usados en muchos procesos incluyendo:

- Mezclado de distintos grados de aceites o gasolina.
- Mezclado de dos o más resinas líquidas.
- Dilución de soluciones concentradas.
- Tratamiento de aguas
- Dispersiones Gas-líquido.
- Reacciones en líneas de tuberías.
- Emulsificación de Aceite/Agua y Agua/Aceite.
- Producción de Biodiesel.
- Mezclado de antioxidantes y otros aditivos.
- Adición de Floculantes en línea.
- Homogeneización de corrientes de proceso para muestreo.
- Ajuste de viscosidad.
- Suspensiones químicas.
- Control de pH.

Mezcladores Lighthin presentan el diseño de un elemento que permite una variedad de ensamblajes para una variedad de aplicaciones.

## 2. DILUYENTES Y RELACIONES VOLUMÉTRICAS

La selección del tipo de diluyente, entre otros aditivos, depende de su grado de compatibilidad con los asfaltenos y parafinas presentes en el crudo; una selección inadecuada puede ocasionar la precipitación de las parafinas y/o asfaltenos, y por tanto a la aparición de problemas adicionales. Otros factores a tener en cuenta son la disponibilidad en las cantidades requeridas del producto.

### 2.1 TIPOS DE DILUYENTES.

En el campo de la deshidratación de crudos pesados y extrapesados con dilución, se usa un diluyente con punto de ebullición entre  $-12^{\circ}\text{C}$  –  $82^{\circ}\text{C}$  para mejorar la producción de crudo pesado; este tipo de diluyente puede ser<sup>18</sup>:

- Hidrocarburos desde C3 hasta C6
- Crudos ligeros (35 – 42 °API)
- Naftas (C<sub>6</sub> – C<sub>12</sub>).
- Destilados aromáticos
- Gasolina obtenida en cabeza de pozo
- Productos refinados (Gas Oil, Kerosina)
- Dióxido de carbono.
- Alcoholes (Alcohol etílico)
- Compuestos aromáticos como el benceno y el tolueno (De uso restringido)
- Metil-Ter-butyl-Eter (MTBE), Ter-Amil-metil-Eter (TAME) y Dimetil-eter (DME)

En la tabla 3, se presentan estos tipos de diluyentes y sus principales propiedades.

La mezcla puede someterse a calentamiento y posteriormente a una etapa de separación para obtener componentes livianos libres de asfaltenos. Posteriormente se realiza una segunda adición de diluyente para precipitar asfaltenos y retirarlos del crudo.

---

<sup>18</sup> KULKARNI, A.D y WANI, K. Reducing Crude Oil Viscosity Using Diluents. <http://www.ijettjournal.org>, ISSN: 2231-538.

La viscosidad de la mezcla crudo/diluyente debe presentar un valor menor de 0,05 Pa.s, preferiblemente entre 0,001 a 0,005 Pa.s y el porcentaje de diluyente utilizado debe estar entre el 5 y el 35% en volumen de crudo; preferiblemente entre 10 y 20 %.

**Tabla 3. Propiedades de algunos Diluyentes**

Tipo Diluyente	API	Punto de ebullición, °F	Gravedad específica / densidad	Viscosidad,	Presion de vapor Reid, psia
Hidrocarburos desde C3 hasta C6, Hexano.		69 °C	0.66 (a 20 °C) gr/cc		(a 15.8 °C): 100 mm de Hg
Crudos ligeros	35 - 42			2.1 – 7.7 Cs @ 21 °C	
Naftas (C <sub>6</sub> – C <sub>12</sub> ). Eter del petroleo		60 - 80 °C	0.716 – 0.78 @ 40°C	0.12 - 7 cst @ 40°C	350 hPa (20 °C)
Benceno		80.1 °C	0.8736 (25 °C)	0.601 cP @ 25 °C	100 mm de Hg
Gasolina obtenida en cabeza de pozo	50-120		0.68–0.74	1 cSt @ 40°C	(38°C) 620–1340 mmHg
Productos refinados / Gas Oil	28.03	PE (65%): 250 °C mín. PE (95%): 360 °C máx.	0.820 - 0.845 g/cm <sup>3</sup> a 15 o C	7.9 Cs @ 40°C	0.004 atm
Productos refinados / Kerosina	40.22	150°C (inicial)	770 - 840 kg/m <sup>3</sup> a 15°	3.3 Cs @ 10°C	Menor 0.1 kPa a 40°C
Dioxido de carbono.		(-88.11 °C) @ 101.325 kPa	1.9770 kg/m <sup>3</sup> @ 101.325 kPa ; 0 °C		5824 kPa @ 294.25 K (21.1 °C)
Alcoholes (Alcohol etílico)		78 – 79 °C	0.7893 / 20°C		
Metil-Ter-butil-Eter (MTBE),		55.3 °C	0,74 gr/cc		
Ter-Amil-metil-Eter (TAME)		86.3°C	3.52 (vapor)		
Dimetil-eter (DME)		-24.80 °C	0.73 (liquido)		5.1 bar @ 20°C

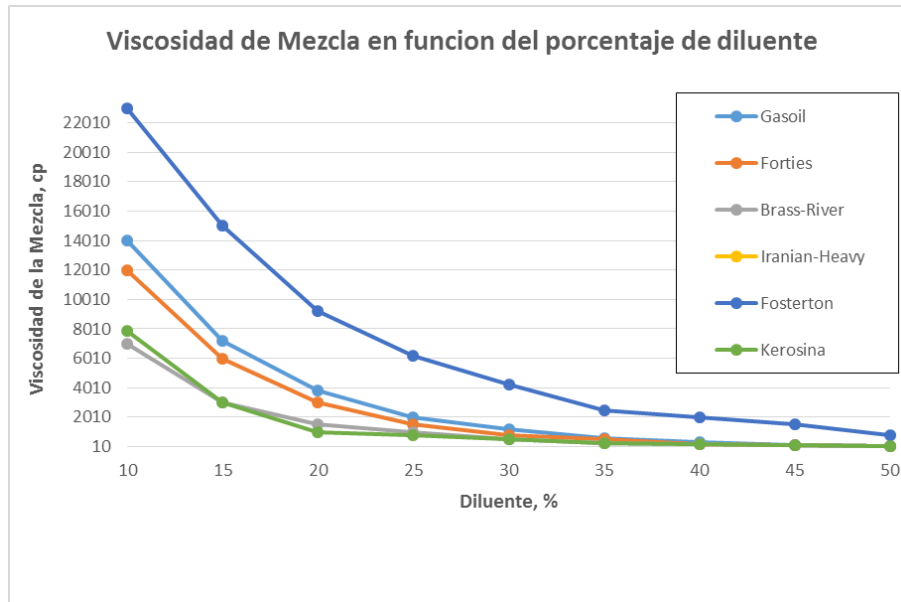
**Fuente:** Hojas de datos de seguridad.

## 2.2. IMPACTO DE LA DILUCIÓN SOBRE LA VISCOSIDAD Y LA DENSIDAD DE LA MEZCLA.

A medida que se incrementa el porcentaje de diluyente el °API de la mezcla se incrementa mientras que su viscosidad disminuye. Por un porcentaje de diluyente dado, la gravedad API es directamente proporcional a la gravedad API del diluyente, esto a mayor API de diluyente, mayor gravedad API de la mezcla.

La diferencia entre las densidades de mezcla obtenidas para un porcentaje de diluyente dado es cada vez mayor a medida que se incrementa el porcentaje de diluyente. Para un porcentaje de un 10%, la diferencia entre las densidades está en un orden de una unidad, mientras que para un porcentaje de 50%, la diferencia de las densidades está en un orden de 10 unidades aproximadamente.

**Figura 17. Viscosidad de Mezcla en función del porcentaje de diluyente.**



**Fuente:** ACE INTERNATIONAL. Manejo de crudo pesado y extrapesado en facilidades de superficie. 2007

La viscosidad de la mezcla presenta un comportamiento exponencial, que a medida que se incrementa el porcentaje de diluyente, la viscosidad de la mezcla disminuye independientemente de la calidad de diluyente, así mismo a mayor gravedad API del diluyente menor viscosidad de la mezcla.

El impacto de la dilución sobre la viscosidad es una función de cierto grado de complejidad para un porcentaje dado de diluyente fijo. Por lo general, a mayor gravedad API de diluyente menor viscosidad de la mezcla, mientras que para una viscosidad fija de la mezcla le corresponde un mayor porcentaje del diluyente de menor gravedad API.

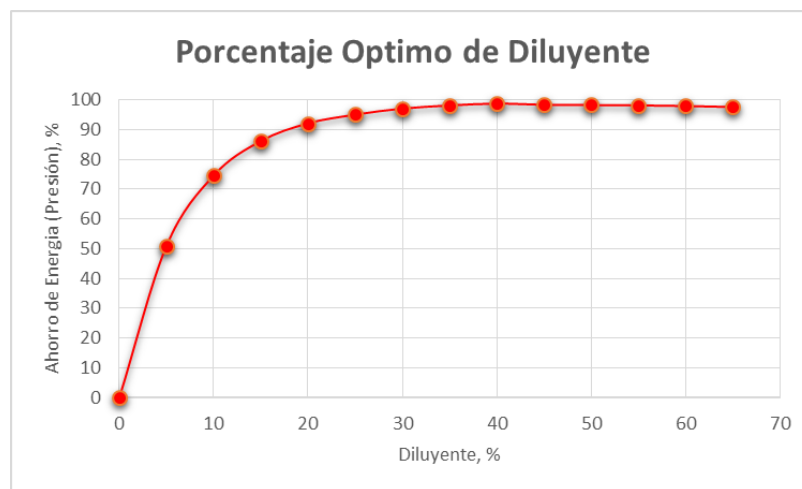
Otro factor que impacta la dilución sobre la viscosidad de la mezcla es la calidad del diluyente. La viscosidad de la mezcla es menor cuando se utiliza como diluyente un producto refinado (Ej. Gas Oil ó Diesel, Kerosina) a la situación de emplear petróleo liviano, resultando así en un menor requerimiento de presión.

### 2.3 IMPÁCTO DE LA DILUCIÓN SOBRE EL REQUERIMIENTO DE ENERGÍA.

Cuando se incrementa el grado de dilución, la gravedad API de la mezcla se incrementa y como consecuencia de esta la viscosidad disminuye, lo que a su vez produce un incremento en el número de Reynolds como consecuencia del incremento de la tasa de flujo y la disminución de la viscosidad de la mezcla.

Los requerimientos de energía representados por la presión a la entrada del sistema disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de dilución (predominio del efecto viscoso) llegando a un valor mínimo para luego aumentar a pesar que se incremente el grado de dilución, como consecuencia del dominio del efecto dinámico sobre el efecto viscoso<sup>19</sup>.

Figura 18. Porcentaje óptimo de diluyente.



**Fuente:** ACE INTERNATIONAL. Manejo de crudo pesado y extrapesado en facilidades de superficie. 2007

<sup>19</sup> GONZALEZ. Op.cit., Cap. 5, pp. 4 -14.

## 2.4 LEYES DE MEZCLA

El resultado de la mezcla de varios componentes viene dada por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$C_1P_1 + C_2P_2 + \dots C_nP_n = C_p \text{ (Ec. 20)}$$

$$C_1 + C_2 + \dots + C_n = C \text{ (Ec. 21)}$$

Siendo  $C_i$  la fracción en masa (o volumen) de cada uno de los componentes de la mezcla y  $P_i$  la propiedad considerada de cada componente. Estas ecuaciones son funciones lineales y por lo tanto las propiedades deben permitir su adición lineal. Cuando esto no ocurre así deben utilizarse funciones no lineales o bien utilizar determinados índices de mezcla representativos de la propiedad a calcular que permitan ser adicionados linealmente.

Los índices de mezcla son expresiones empíricas calculadas a partir del tratamiento de cientos de datos y que pueden no ser únicos para una misma propiedad. En cualquier caso es necesario utilizar índices homogéneos para cada uno de los componentes.

Son aditivas en peso o en volumen todas aquellas características medidas en unidades de masa o de volumen como densidad, azufre, contenido en metales, composición hidrocarbonada (aromáticos, olefinas, naftenos, parafinas), curva TBP, etc. Otras propiedades como viscosidad, características de frío (punto de niebla, cristalización, congelación, etc), índices de octano y cetano, presión de vapor, punto de Inflamación, etc necesitan ser transformadas en índices de mezcla lineales para el cálculo de su mezcla.

## 2.5 FACTOR DE ENCOGIMIENTO

El encogimiento volumétrico es un fenómeno que se presenta cuando se mezclan sustancias químicas con diferentes densidades y el resultado es una mezcla cuyo volumen no representa la suma aritmética de los volúmenes de cada uno de los componentes.

Debido a la alta viscosidad de los crudos pesados y extrapesados se hace necesario que se mezclen con diluyentes de gravedad API > 35 para que puedan ser bombeados y transportados a través de las tuberías sin taponamientos.

El comportamiento del encogimiento volumétrico se puede ilustrar mediante una mezcla de canicas y arena. Si se toma un litro de canicas y un litro de arena y se vierten los dos en un recipiente de dos litros, la arena llenará inicialmente los vacíos dejados por la geometría de las canicas. Por lo tanto resulta en menos de dos litros de mezcla en el recipiente de dos litros.

Dada la dificultad de modelar el fenómeno por medio de leyes termodinámicas, se recurre a estudios experimentales y desarrollo de correlaciones empíricas para cálculo de encogimiento volumétrico<sup>20</sup>.

Según el API MPMS 12.3 (Reducción volumétrica resultante de mezclar hidrocarburos ligeros con petróleo crudo) se han desarrollado dos (2) formulas:

Para el Sistema Metrico Internacional:

$$S = 2.69 \times 10^4 C (100 - C)^{0.819} \left( \frac{1}{dL} - \frac{1}{dH} \right)^{2.28} \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde:

S: Encogimiento volumétrico, como porcentaje del volumen ideal total de la mezcla.  
C: Concentración en porcentaje del volumen de liquido del componente ligero  
dL: Densidad del Componente ligero.  
dH: Densidad del Componente Pesado.

Para unidades inglesas:

$$S = 4.86 \times 10^{-8} C (100 - C)^{0.819} G^{2.28} \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde:

S: Encogimiento volumétrico, como porcentaje del volumen ideal total de la mezcla.  
C: Concentración en porcentaje del volumen de liquido del componente ligero.

---

<sup>20</sup> GARCIA, Cristian. Encogimiento volumétrico de mezclas de hidrocarburos.  
<http://myslide.es/download/link/encogimiento-volumetrico-de-mezclas-hernando-valencia>

G: Diferencia en grados API del componente ligero y pesado.

- Unidades Acostumbradas (°API, bbl, °F, etc)
- Unidades Sistema Internacional para las cuales, los términos corresponden a:

Las ecuaciones anteriores son de carácter empírico, por lo tanto se define el rango de aplicación para cada una de las variables empleadas:

**Tabla 4. Rangos de densidad y °API de aplicación.**

	Componentes Pesados		Componentes Ligeros	
	kg/m3 (15°C, 101.325 kPa)	°API (60°F, 14.7 psia)	kg/m3 (15°C, 101.325 kPa)	°API (60°F, 14.7 psia)
<b>Todos los datos</b>	644 - 979	88.2 - 13.0	581 - 889	112.0 - 27.6

**Fuente:** GARCIA, Cristian. Encogimiento volumétrico de mezclas de hidrocarburos.

### 3. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE MEZCLADORES

Los mezcladores pueden emplearse para mezclar dos o más corrientes, por lo general la línea sobre la que están instalados proveen la energía (presión) necesaria para el mezclado mientras que los elementos (internos) del equipo direccionan el flujo radialmente hacia las paredes de la tubería para luego pasar al centro de la misma, y así sucesivamente. La eficiencia de mezclado es obtenida por velocidades contrarias adicionales y división del flujo causada por elementos alternantes.

Es importante tener presente que la rata de flujo a la entrada debe corresponder con las relaciones de descarga requeridas en la mezcla (la adición de los fluidos debe ser continua si no se quiere descargas por batch). Materiales de baja viscosidad pueden manejarse con bombas centrífugas, mientras que materiales de altas viscosidades requerirán bombas de desplazamiento positivo, es decir, que la energía de presión necesaria para la operación de los mezcladores es superior a la requerida normalmente para la operación de la línea.

El flujo en la tubería sin ningún tipo de elemento produce algo de mezclado radial pero en la mayoría de los casos, para lograr un adecuado mezclado puede lograrse solo después de recorrer una longitud considerable de tubería, cuando se emplea un mezclador se acelera significativamente el mezclado o reacción en la línea. Esta técnica es deseable donde se requiera un proceso continuo, económico y de rápida operación.

En la selección del equipo de mezclado de líquidos en línea se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- a. Naturaleza del proceso: Líquidos miscibles, etc.
- b. Grado de mezcla requerido.
- c. Propiedades físicas de los líquidos, particularmente la viscosidad.
- d. Si la mezcla está asociada con otras operaciones.

En la actualidad el flujo de fluidos en todo tipo de mezcladores es difícil de describir cuantitativamente por lo que desde el punto de vista científico (la rata de mezclado, el consumo de potencia y la eficiencia) , y de aplicación (diseño y dimensionamiento)

son complejos e inexactos por lo que muchas instalaciones son optimizadas por ensayo y error.

Por lo general para constatar el funcionamiento de la homogeneización en la mezcla crudo-gas, se recomienda realizar una prueba de campo utilizando modelos de mezcladores. Para esto inicialmente debe efectuarse una corrida sin elementos para observar el comportamiento del fluido antes de la instalación de los mezcladores de prueba verificándose el comportamiento de la densidad del fluido a través de un medidor de flujo másico lo cual muestra las características del flujo de fluido en la tubería.

Los resultados así obtenidos servirán de guía para la evaluación, dado que es difícil caracterizar flujo multifásico en tuberías (densidad, viscosidad, etc).

En corrientes con alto contenido de gas, otro de los beneficios obtenidos con el uso del mezclador es que se logra mantener el °API de la mezcla con un menor consumo de diluyente, esto debido a la homogeneización eficiente de las corrientes de crudo y gas.

En el dimensionamiento de mezcladores se determina el diámetro, longitud, velocidad media y caída de presión a través de estos equipos, buscando siempre seleccionar el elemento que permita obtener la calidad de mezclado deseada, con la menor caída de presión, los menores costos de instalación y que se ajuste al espacio disponible. Como la caída de presión es producto del tipo de mezclador seleccionado, es en algunas ocasiones un factor limitante para la selección del tipo y número de elementos de mezclado. El diseño puede verse afectado por requerimientos de seguridad, economía y del mismo proceso.

### **3.1 CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO.**

Con los años un gran número de compañías han producido mezcladores estáticos basados en el principio de movimiento radial con base en una serie de deflectores de metal. Estos baffles pueden consistir de espirales de metal, hojas corrugadas, barras paralelas, orificios de diámetro pequeño, etc. Hay esencialmente elementos de flujo Piston con algún grado de remezclado dependiendo del tipo de diseño. La tabla 5 proporciona una guía para aplicaciones en regímenes laminar y turbulento.

**Tabla 5. Guía para aplicaciones en regímenes laminar y turbulento.**

Regimen de Flujo	DISEÑO DE MEZCLADORES ESTATICOS									
	KMS	KMX	HEV	SMV	SMX	SMXL	SMR	KVM	SMF	ISG
<b>Laminar</b>										
Mezclado	c	a			c	c			a	a
Viscosidad alta-baja		a			c	a				a
Dispersion.	a	a			c	a				a
Transferencia de calor	c				b	c	c			
Flujo tapon	b				c	b	c*			
<b>Turbulento</b>										
Mezclado										
Alta turbulencia	a		c	c'				c		
Baja turbulencia	c			c	a	a			a	
<b>Dispersion</b>										
Liquido-Liquido	c			c	c''	a	c*		a	
Gas en liquido	c			c	a	a	a*		a	
Liquido en gas	a			c	a					
Lechos fluidizados					c''					

(a) Aplicable; (b), típicamente aplicado; (c), mejor selección de diseño

(\*) Cuando se requiere control de la temperatura;

(') Especialmente para diámetros muy grandes y no secciones transversales redondas;

('') Partículas sólidas de gas fluidizado, diseño especializado

**Fuente:** Paul & Friends. 2004. Handbook of Industrial Mixing Science & Practice.

### 3.2 SELECCIÓN DE MEZCLADORES ESTÁTICOS STAMIXCO.

El número de elementos de mezclado para una aplicación específica es función del tipo de proceso y requerimientos del sistema, en consideración al grado de homogeneización buscado (CoV - Coeficiente de Variación), limitaciones de caída de presión y propiedades del fluido como caudal, viscosidad, densidad, etc.

**El Coeficiente de Variación (CoV)** es una medida de la desviación estándar respecto de un valor dado de temperatura, concentración, conductividad eléctrica, color, etc, lo cual ha llegado a ser la base en la comprensión del funcionamiento de los mezcladores estáticos. Este coeficiente toma un valor de 1.0 a la entrada del equipo, es decir cuando los fluidos a mezclarse están totalmente diferenciados y no hay mezcla entre ellos, a medida que los fluidos pasan a través de los elementos







de mezclado los fluidos se van mezclando gradualmente, disminuyendo así el valor de CoV hasta alcanzar su menor valor a la salida del equipo de mezclado.

Cada proceso requiere de la selección de geometrías de mezclado específicas, sin que exista una que sea aplicable a todas las situaciones. En la tabla 6 se presenta una guía para la selección del mezclador estático más adecuado de acuerdo al fabricante Stamixco.

**Tabla 6. Selección de mezcladores estáticos.**

**Rating System of Products:** **10:** Best-Available Technology **5:** Acceptable for the Application **0:** Not Suitable for the Application  
**-:** Not Applicable **★:** Equipment size not available

**General Purpose Static Mixers**

STATIC MIXER SCOPE OF SUPPLY		DIAMETER OF STATIC MIXER	LAMINAR FLOW (high viscosity materials)							TURBULENT FLOW (low viscosity materials)						
PHOTOGRAPH OF STATIC MIXER STRUCTURE	PRODUCT MODEL DESIGNATION  CHARACTERISTIC FEATURE OF STATIC MIXER DESIGN		Extrusion	Injection Molding	Similar Viscosity Mixing	High – Low Viscosity Mixing	Large Volumetric Ratio of Materials	Heating – Cooling	Plug Flow Reactors	Liquids Blending	Low – High Viscosity Mixing	Immiscible Liquids Dispersion	Gas Mixing	Gas-Liquid Contacting	Solid-Gas Contacting	Solid – Liquid Contacting
	<b>Type H</b> Helical Twist of 180° with adjacent Mixing Elements of Opposite Twist	< 1"	5	0	5	0	2	10	2	10	2	8	8	8	10	10
		1"–6"	3	0	4	0	1	3	0	8	0	6	6	6	6	6
		6"–18"	1	0	2	0	0	0	0	6	0	5	5	3	0	0
		> 18"	0	0	0	0	0	0	0	3	0	4	2	1	0	0
	<b>Type V</b> Corrugated Plates at 45° or 30° to pipe axis with adjacent Mixing Elements at 90°	< 1"	0	0	0	0	0	0	0	3	8	10	6	6	0	0
		1"–6"	0	0	0	0	0	0	0	10	6	10	10	10	6	2
		6"–18"	0	0	0	0	0	0	0	10	6	10	10	10	6	5
		> 18"	0	0	0	0	0	0	0	10	6	10	10	10	6	6
	<b>Type GXR</b> Double Roof Disk with 45° Crossing-Bar Grid Structure and very high strength	< 1"	10	10	8	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0
		1"–6"	10	10	8	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0
		6"–18"	10	-	8	6	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0
		> 18"	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	<b>Type GX</b> Crossing-Bar Grid Structure at 45° to pipe axis	< 1"	4	3	10	10	10	5	10	5	5	3	0	0	0	0
		1"–6"	6	4	10	10	10	10	10	6	6	4	4	3	4	4
		6"–18"	7	0	10	10	10	2	10	7	7	4	9	4	6	6
		> 18"	10	-	10	10	10	0	10	8	8	5	10	8	10	10
	<b>Type GX-L</b> Crossing Bar Grid Structure at 30° to pipe axis	< 1"	0	0	5	0	4	8	5	0	0	0	0	0	0	0
		1"–6"	0	0	4	0	3	6	4	0	0	0	0	0	0	0
		6"–18"	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
		> 18"	0	*	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>Type GX-LR</b> Crossing Bar Grid Structure at 30° to pipe axis with each ellipse at 90°.	< 1"	0	0	0	0	0	0	0	5	2	0	0	0	0	0
		1"–6"	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	5	0	5	5
		6"–18"	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	4	0	4	4
		> 18"	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	3	0	3	3

**Fuente:** Stamixco. Static mixing, reaction, heat transfer & fluid Dynamics technology.

Es de tener en cuenta que un crudo de alta viscosidad fluye en régimen laminar bajo las mismas condiciones de caída de presión y caudal que un fluido de baja

viscosidad en régimen de flujo turbulento optimizando así el consumo de Nafta diluyente.<sup>21</sup>

Con el fin de realizar un ejemplo de aplicación, en la tabla 7, se presentan las bases de cálculo para el dimensionamiento de un mezclador de crudo pesado con nafta.

**Tabla 7. Bases de Cálculo. Ejemplo de aplicación.**

Compuesto A: Crudo Pesado

Propiedad	Condiciones Estándar(60°F, 14,7 psi)	Condiciones Operación (122° F,)
Caudal, bopd		80000
Gravedad API	8 ° API @ 60°F	11° API @ 122 °F
Densidad	1.0143 gr/cc	
Viscosidad Cinematica		9090 Cst

Compuesto B: Nafta.

Propiedad	Condiciones Estándar(60°F, 14,7 psi)	Condiciones Operación (122° F)
Caudal, bnpd		20000
Gravedad API	69 ° API @ 60°F	68° API @ 122 °F
Densidad	0.706 gr/cc	
Viscosidad Cinematica		2 Cst <sup>(1)</sup>

Otros

Propiedad	Valor
Diametro tubería, OD	12 inch.
Diametro tubería, ID	11.938 inch / 0.3 m.
Schedule tubería	Sch. 40

(1) MSDS Nafta. Dow Chemicals / Chemical Check GmbH Gefahvstoffberatung.

**Fuente:** El Autor.

*Aplicando la formula de cálculo del factor de encogimiento (S), para esta mezcla se tiene:*

Volumen ideal:      100000 bls de mezcla

S:                      0.599%

Volumen final:      99400 bls de mezcla

<sup>21</sup> GARCIA. Op. Cit., p.27.

*Empleando la ley de mezclas, en proporción 4:1 de los compuestos A:B la gravedad específica de la mezcla resultante a condiciones de operación, se estima en: 0.9362 (19.64° API).*

*Así tenemos:*

<u>Caudal de flujo volumétrico</u>	: 99400 bfpd (0.184 m <sup>3</sup> /seg).
<u>Velocidad promedio del flujo</u>	: 2.53 m/seg.
<u>Densidad de la mezcla</u>	: 936.2 kg/m <sup>3</sup>
<u>Viscosidad cinemática mezcla (Ec. Refutas)<sup>22</sup></u>	: 361.71 cst
<u>Viscosidad dinámica mezcla:</u>	: 0.3386 Pa.s (338.6 cP)

*El número de reynolds así calculado es de 2123, por lo que en condiciones normales de flujo (sin mezclador) el régimen de flujo es tipo: Laminar.*

*De acuerdo a la tabla 6, para fluidos con viscosidad alta a media, en flujo laminar se recomienda el mezclador tipo GX ya que presenta la mejor tecnología aplicable: este mezclador consta de una estructura en forma de malla con elementos a 45° con respecto al eje de la tubería, encontrándose disponible en diámetros menores a 1" hasta mayores a 18".<sup>23</sup>*

Este tipo de mezcladores han sido exitosamente utilizados en la mezcla y/o dispersión de fluidos viscosos, siendo capaz de mezclar fluidos con igual o diferentes viscosidades o caudales volumétricos.

El número de elementos de mezclado y diámetros de tubería requeridos para una aplicación específica es función del tipo de proceso y requerimientos del sistema según el grado de homogeneización, limitaciones de caída de presión, y propiedades de los fluidos: caudal de flujo, viscosidades, densidades, etc.

Los elementos de mezclado GX son construidos en metal (desde 9,8 mm de diámetro en adelante) o en plástico (Nylon, PA66, Polipropileno, etc.). La configuración de elementos se logra soldando las distintas unidades de mezclado, orientando las partes adyacentes 90° con respecto a los otros, para luego ser insertados en el housing (camisa) que los contendrá.

---

<sup>22</sup> GARCIA, Op. Cit., p. 21

<sup>23</sup> GX STATIC MIXER PRODUCT BULLETIN. StaMixCo. 2007

Este tipo de elementos crean un alto grado de mezclado en corta longitud. Cada elemento presenta una relación diámetro:longitud aproximada de 1.0. Un ensamblaje típico puede variar entre 2 elementos para aplicaciones simples, hasta 20 para aplicaciones complejas. Empleando la tabla 7, se puede determinar el número de elementos requeridos para una aplicación específica en flujo laminar:

Para el ejemplo, nuestro diluyente presenta una viscosidad de 2 cstk a 50°C, lo cual representa una relación de viscosidades (Compuesto A:B) de **4545:1** y una relación volumétrica de **4:1**.

**Tabla 8. Número de elementos de mezclado requeridos para condiciones de flujo laminar (relaciones de viscosidad 100:1)**

Relacion volumetrica de los componentes a ser mezclados A : B	Relacion de viscosidad de los componentes a ser mezclados A : B	NUMERO DE ELEMENTOS DE MEZCLADO REQUERIDOS*		
		"Calidad de Pre-Mezclado" Grado de Homoneización logrado del 80% (CoV**=0,2)	"Buena calidad" Grado de Homoneización logrado del 95% (CoV**=0,05)	"Muy Buena calidad" Grado de Homoneización logrado del 99% (CoV**=0,01)
1 : 1	1 : 1 - 100 : 1	4	6 - 7	9 - 10
9 : 1	1 : 1 - 100 : 1	6	9	12
99 : 1	1 : 1 - 100 : 1	9	12	15
999 : 1	1 : 1 - 100 : 1	11	14	17

Notas:

(\*) El número de elementos de mezclado GX requerido es aproximado y puede variar dependiendo del comportamiento de la viscosidad del medio a ser mezclado.

La tabla es limitada a materiales que a las condiciones de operación son solubles el uno en el otro en todas las relaciones de mezclado.

(\*\*) CoV: Coeficiente de variación de mezclado.

**Fuente:** Stamixco. GX Static mixer product Bulletin.

En el ejemplo, para efectos de la tabla 7 se toma una relación volumétrica de mezcla de (9:1), una relación de viscosidades en el rango entre 1:1 - 100:1, y fijando un CoV = 0.01 lo cual representa "muy buena calidad de mezclado, con un grado de homogeneización del 99%", el número de elementos de mezclado requeridos para condiciones de flujo laminar es de: 12 elementos.

Si la relación de viscosidad del componente A (mayor componente) al componente B (menor componente) es superior a 100:1 el número de elementos de mezclado debe incrementarse de acuerdo a la tabla 8.

**Tabla 9. Número de elementos de mezclado adicionales para relaciones de viscosidad superiores a 100:1**

Relacion de viscosidad A : B	100 - 300 : 1	300 - 1000 : 1	1000 - 3000 : 1	3000 - 10000 : 1
Elementos de mezclados adicionales requeridos tipo GX	2 - 3	3	3 - 4	4

**Fuente:** Stamixco. GX Static mixer product Bulletin.

En nuestro ejemplo, se requiere del uso de 4 elementos adicionales a los 12 ya seleccionados, para un total de 16.

### **3.2.1. Caída de presión, longitud de mezclado y requerimientos de potencia.**

La caída de presión a través de una unidad de mezclado GX está dado por las bombas que suministran la corriente de flujo al mezclador. Variando el diámetro de la tubería junto con la cantidad de elementos de mezclado puede compensarse la caída de presión.

El Cálculo de la caída de presión puede ser difícil debido al régimen de flujo de dos fases. Si el sistema también está cerca del punto de ebullición o punto de saturación para el gas en el líquido, el cálculo de caída de presión puede ser complicado por el aumento del punto de ebullición o de desgasificación como el fluido pasa a través del mezclador; así la erosión por cavitación es un problema potencial.

En la práctica, una mayor caída de presión permite forzar mas fluido a través del mezclador estático, mejorando así la mezcla resultante. Esto es especialmente cierto en sistemas turbulentos donde la entrada de energía en exceso se muestra como el aumento de la turbulencia de remolinos, remolinos de reflujo, fuerzas de cizallamiento y flujo rotacional. Del mismo modo, hay una mejora en los sistemas laminares con el incremento en la caída de presión. Los efectos de la gravedad sobre los materiales con diferentes densidades son cada vez menores a medida que aumenta la caída de presión.

La difusión de las fuerzas de cizallamiento de las gotas de diferentes viscosidades ha mejorado para comenzar la generación de la capa. Como se permite mayor caída de presión, un mezclador de menor diámetro puede ser utilizado y el periodo de tiempo desde que un catalizador se inyecta en una resina hasta que esté completamente mezclado se reduce, de este modo reacciones secundarias

dependientes de la concentraciones no deseadas son suprimidas. Como la caída de presión a través del mezclador aumenta, es necesario asegurar que la rigidez estructural del mezclador estático sea la suficiente para soportar los fuerzas. Un modo de falla para algunos mezcladores estáticos es **aplastamiento**.

Es necesario especificar las presiones del sistema y/o de trabajo para diseñar la carcasa y conexiones. La operación de mezcla del mezclador estático es por si misma independiente de la presión del sistema.

Las características de diseño del sistema disponibles como complementos incluyen boquillas de inyección, calefacción y camisas de refrigeración, elementos extraíbles y no extraíbles. Aislamiento térmico puede ser importante en muchos casos. Un mezclador estático puede aumentar la velocidad de transferencia de calor de un material viscoso que fluye en flujo laminar de dos a cinco veces la del mismo material que fluye en el tubo de vacío. Si el material es exotérmico (o endotérmico) o muy caliente o frío con relación a las condiciones del entorno, el intercambio de calor a través de la chaqueta se puede utilizar para efectos de la temperatura deseada.

Las ventajas de los mezcladores estáticos sobre los mezcladores dinámicos son:

- a. Distribución reducida del tiempo de residencia
- b. Uso de una amplia gama de viscosidades (desde gases a masas fundidas de polímero), así como el uso de variadas relaciones de viscosidad de la fase dispersa ( $10^{-2}$  a  $10^6$ ).
- c. Adaptables a distintos sistemas de tuberías.
- d. Pequeños requisitos de espacio.
- e. Mantenimiento insignificante y al desgaste, debido a la ausencia de partes móviles.
- f. baja inversión de capital, costos de operación y requerimientos de energía.
- g. Disponibilidad en muchos tipos de material.

Es necesario conocer la velocidad de flujo promedio de cada componente a mezclar, la variación por arriba y por abajo de la media y el período de tiempo de la variación. Un flujo de pulsos que tiene un tiempo de ciclo más largo que el tiempo de residencia en el mezclador no se mezcla correctamente. Un dispositivo de nivelación de flujo tal como un tanque de compensación puede ser requerido para mezclar de manera efectiva un flujo por baches. Debe prestarse especial atención a la corriente menor o al momentum del flujo de la corriente principal sobre la corriente menor.

En flujo laminar con elementos de mezclado tipo GX la caída de presión ( $\Delta P_L$ ) puede ser calculada mediante la relación:

$$\Delta P_L = \sim 8.9 \times 10^{-8} (N_e Re_D) \frac{\mu M}{\rho D^3} (N) \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde:

- D: Diametro interno de la tubería (in).
- L: Longitud aproximada total de los elementos de mezclado (in).
- M: Flujo masico (lb/hr)
- N: Numero de elementos de mezclado
- NeRe<sub>D</sub>: 1200 para el tipo GX en flujo laminar, el cual es el producto del Numero de Newton (Ne) y el número de Reynolds (Re)
- P: Potencia requerida (hp)
- Q: Flujo volumétrico (gpm)
- $\Delta P_L$ : Caída de presión a través del mezclador (psi)
- $\mu$ : Viscosidad (cp)
- $\rho$ : Densidad (lb/ft<sup>3</sup>)

*Volviendo al ejemplo, con base en la Ec. 25 para el tipo de mezclador GX la caída de presión para es:*

$$\Delta P_L = \sim 8.9 \times 10^{-8} (1200) \frac{(338.6 \text{ cP}) * 1'359.193 \text{ lb/hr}}{58.45 \text{ lb/ft}^3 * (11.938 \text{ in.})^3} \quad (16)$$

$$\Delta P_L = 7.9 \text{ psi}$$

Donde:

- D: Tuberia 12" Nominal, 12.75" OD, 0.406" Espesor pared (sch. 40), 11.938" ID.
- M: Flujo masico (lb/hr), 1'359.193 lb/hr.
- N: Numero de elementos de mezclado (16)
- NeRe<sub>D</sub>: 1200 para el tipo GX en flujo laminar, el cual es el producto del Numero de Newton (Ne) y el número de Reynolds (Re)
- $\Delta P_L$ : Caída de presión a través del mezclador (psi)
- $\mu$ : Viscosidad mezcla (cp): 338.6 cP
- $\rho$ : Densidad de la mezcla (lb/ft<sup>3</sup>): 58.45 lb/ft<sup>3</sup>

La longitud requerida para el arreglo de elementos de mezclado es una función del diámetro interno de la tubería, número de elementos de mezclado, y se calcula:

$$L = \sim D \cdot N \quad (\text{Ec. 26})$$

De este modo:

$$L = \sim 11.938 \cdot 16$$

$$L = \sim 191 \text{ in.}$$

La potencia requerida para superar la caída de presión a través del mezclador estático se calcula como:

$$P = \sim 5.8 \times 10^{-4} (Q \Delta P_L) \quad (\text{Ec.27})$$

Aplicando la anterior ecuación:

$$P = \sim 5.8 \times 10^{-4} (2899.19 \text{ gpm} \cdot 7.9 \text{ psi})$$

$$P = \sim 13.29 \text{ Hp}$$

Donde:

D	:	Diámetro interno de la tubería, inch.
L	:	Longitud aproximada del ensamblaje de elementos de mezclado, inch.
N	:	Cantidad de elementos de mezclado.
M	:	Rendimiento másico (lb/hr).
$N_e \cdot Re_D$	:	$\sim 1,200$
$N_e$	:	Numero de Newton
$Re_D$	:	Numero de Reynolds
P	:	Potencia requerida, Hp.
Q	:	Rata de flujo volumétrico, gpm
$\Delta P_L$	:	Caída de presión a través del mezclador, psi
$\mu$	:	Viscosidad, cp.
P	:	Densidad, Lb/m <sup>3</sup>

En la tabla 9, se pueden determinar las dimensiones de elementos de mezclado de acuerdo al diámetro de tubería y numero de elementos de mezclado a instalar.

**Tabla 10. Elementos de mezclado metálicos.**

Modelo Numero	Tamaño nominal de la tubería (1)		Dimensiones standard de la tubería			Dimensiones de los elementos de mezclado (1)		Longitud (L TOT) del ensamble de elementos de mezclado con "n" numero de elementos de mezclado.			
	Diametro (in)	Schedule tubería	Diam. Exterior (in).	Espesor de Pared (in)	Diametro interior de la tubería (in)	DME (in)	LME (in)	4 elementos de mezclado	8 elementos de mezclado	12 elementos de mezclado	16 elementos de mezclado
GX-DN10	-	-	-	-	-	9.8 mm	9.8 mm	39.2 mm	78.4 mm	117.6 mm	157.6 mm
GX-0.375	3/8"	40	0.675"	0.091"	0.493"	0.49"	0.49"	2"	4"	6"	8"
GX-0.5	1/2"	40	0.840"	0.109"	0.622"	0.62"	0.62"	2.5"	5"	7.5"	10"
GX-0.75	3/4"	40	1.050"	0.113"	0.824"	0.81"	0.77"	3.1"	6.3"	9.5"	12.5"
GX-1.0	1"	40	1.315"	0.133"	1.049"	1.03"	1.06"	4.3"	8.7"	13"	17.3"
GX-1.5	1-1/2"	40	1.610"	0.145"	1.61"	1.59"	1.59"	6.4"	12.9"	19.4"	25.8"
GX-2.0	2"	40	2.375"	0.154"	2.067"	2.05"	2.07"	8.3"	16.7"	25"	33.4"
GX-2.5	2-1/2"	40	2.875"	0.203"	2.469"	2.4"	2.47"	9.9"	19.9"	29.9"	40"
GX-3.0	3"	40	3.500"	0.216"	3.068"	3.06"	3.07"	12.3"	24.7"	37"	49.4"
GX-4.0	4"	40	4.500"	0.237"	4.026"	3.99"	4.03"	16.2"	32.5"	48.8"	65"
GX-5.0	5"	40	5.563"	0.258"	5.047"	4.99"	5.05"	20.2"	40.5"	60.8"	81"
GX-6.0	6"	40	6.625"	0.28"	6.065"	6.02"	6.07"	24.3"	48.8"	73"	97.5"
GX-8.0	8"	40	8.625"	0.322"	7.981"	7.9"	8.00"	32.2"	64.4"	96.8"	130"
GX-10.0	10"	40	10.750"	0.365"	10.02"	9.92"	10.04"	40.2"	80.6"	120.8"	161"
GX-12.0	12"	40	12.750"	0.406"	11.938"	11.87"	11.9"	47.7"	95.4"	143"	190.6"

(1) Los elementos estandar de mezclado son contruidos en 316L S/S, para tubería sch. 40. Sin embargo pueden ser fabricados en otros materiales, para otros diametros de tubería, y otros schedule de tubería.

Fuente: Stamixco. GX Static mixer product Bulletin.

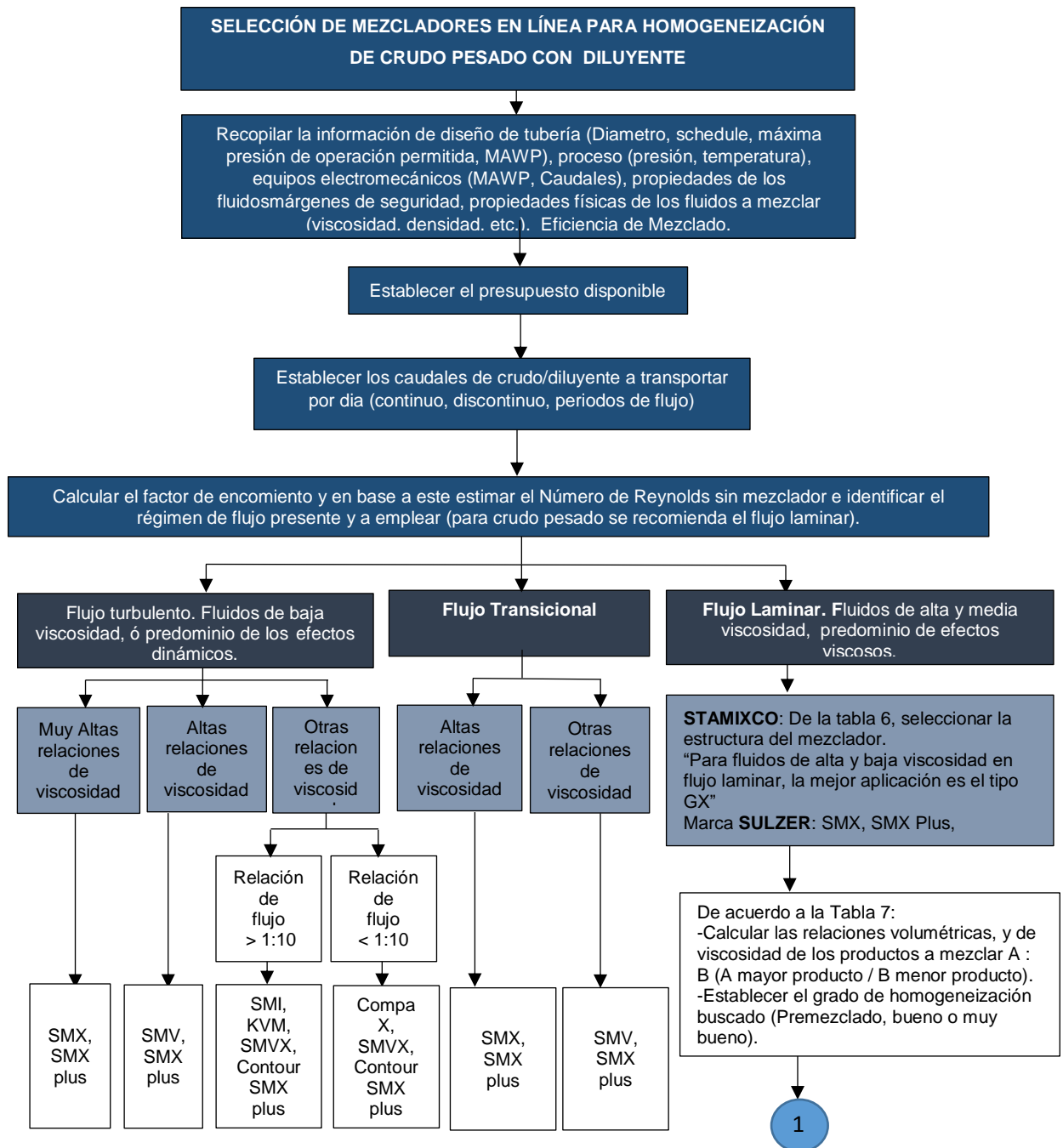
Para la retención de los elementos de mezclado dentro del housing, estos pueden soldarse, o instalarse empleando barras ó anillos de retención.

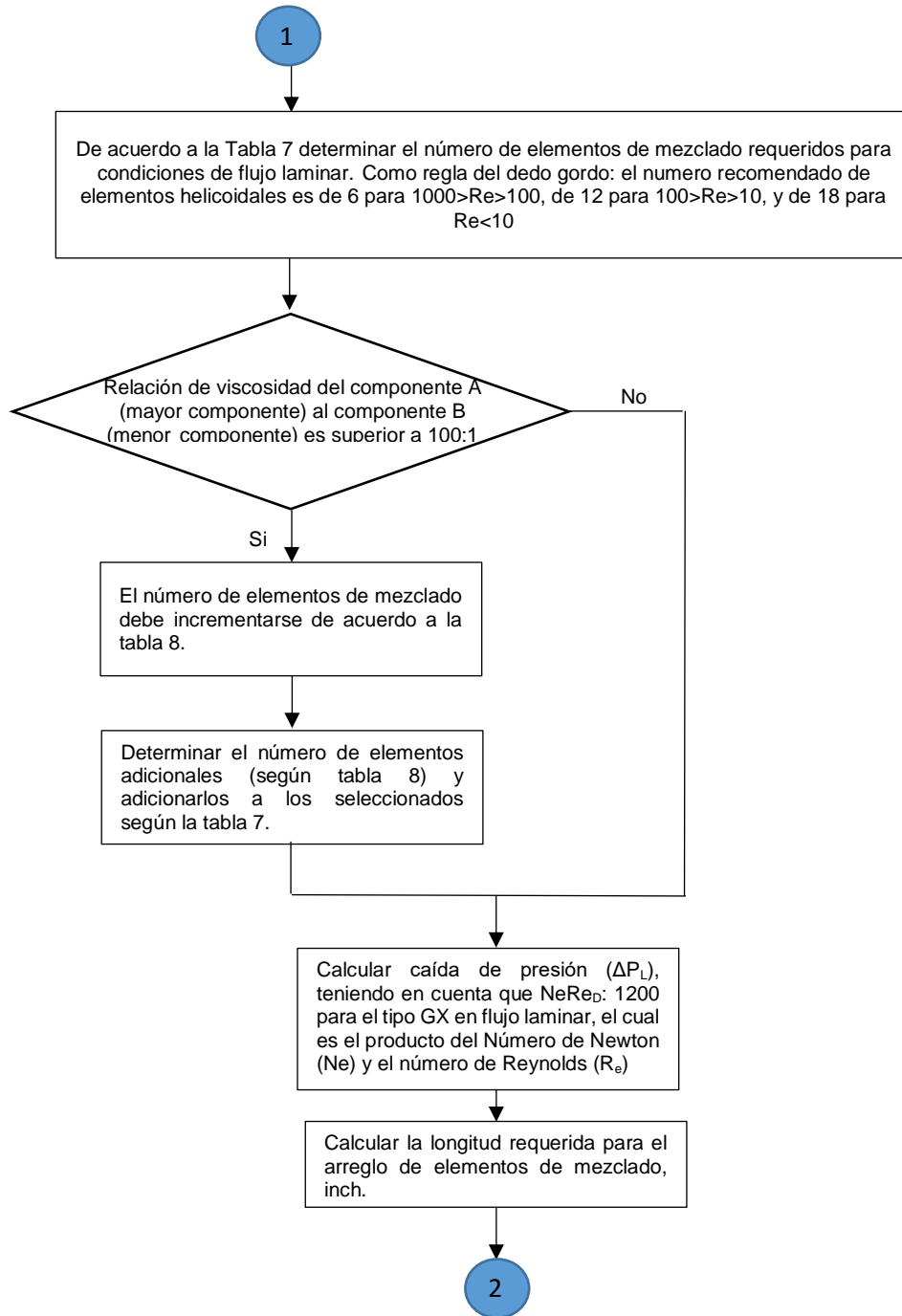
Para nuestro ejemplo, y de acuerdo con la tabla 9, como el diámetro de nuestra tubería es de 12", Sch. 40, la longitud total de los elementos de mezclado con 16 elementos es: 190.6", lo cual se ajusta con el calculo anteriormente presentado.

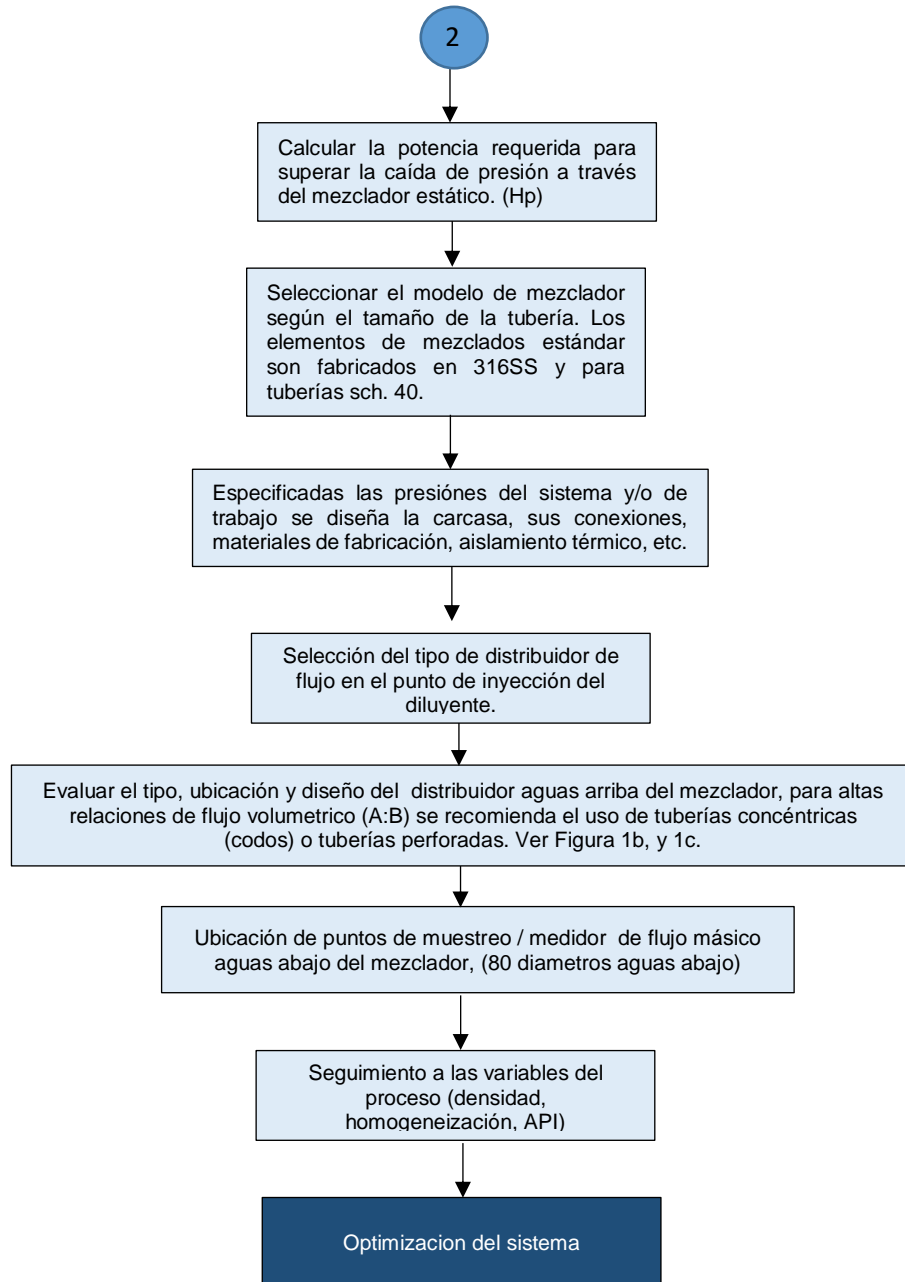
### 3.3 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE MEZCLADORES ESTÁTICOS

El anterior procedimiento, seguido para la selección y dimensionamiento de mezcladores estaticos para homogeneización de crudo pesado, en flujo laminar se presenta a continuación de manera grafica empleando su respectivo diagrama de flujo.

**Figura 19. Diagrama de flujo para selección de mezcladores estáticos para crudo pesado con diluyente.**







#### 4. ANÁLISIS TECNICO PRESUPUESTAL

Los costos de mezclado pueden dividirse en 3 componentes:

- e. Depreciación de los costos de capital.
- f. Requerimientos de potencia.
- g. Mano de obra.

Los mezcladores estáticos presentan no poseen partes móviles, por lo cual los costos de mantenimiento son casi nulos, pueden instalarse al igual que un accesorio de tubería, pero presentan un incremento en los costos de depreciación.

##### 4.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX – CAPITAL EXPENDITURE)

Conocidos como inversiones en bienes de capital, son inversiones de capital que crean beneficios. A continuación se relaciona el costo de inversión para implementar una unidad que procesa 75.000 barriles de crudo por día.

**Tabla 11. Relación de costos de inversión (USD) Mezclador Estático - Elementos**

Item	Descripcion	Und.	Cant	V/r Unitario, USD	V/r Total, USD
1	Mezclador Estatico 10", 3 elementos	Ea	6	\$4700	\$28200
2	C.S, W.N Flange, 10", 300#,	Ea	2	\$425	\$850
3	Empaques	Ea	7	\$150	\$1050
	<b>TOTAL</b>				\$30100

Fuente: El Autor

**Tabla 12. Relación de costos de inversión (USD) Mezclador Estático – Mano de obra**

Item	Descripcion	Und.	Cant	V/r Unitario, USD	V/r Total, USD
1	Cuadrilla metalmeccanica	Dia	6	\$950	\$5700
	<b>TOTAL</b>				\$5700

## 4.2 ANÁLISIS DE COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX - OPERATING EXPENSE).

Son aquellos que involucran los costos continuos en los que se deben incurrir en el día a día durante la operación, es decir que son aquellos gastos de administración, nómina de empleados, mantenimiento, entre otros.

## 4.3 OTROS COSTOS DE OPERACIÓN

También llamados costos de producción, son los costos necesarios para mantener un proyecto, o un equipo en funcionamiento. Una de las ventajas que presentan los mezcladores estáticos es que el mantenimiento es casi nulo. De acuerdo al capítulo anterior se requieren 13.29 Hp, lo que equivale a 9.9 Kw, y estos a su vez corresponden con 238 Kwh.

**Tabla 13. Relación de otros costos de operación.**

Item	Concepto	Unidad	Cantidad	V/r Unitario (USD/Kwh)	V/r Total, USD/día	V/r Total, USD/mes
1	Requerimientos de energía.	Kwh	238	\$0,142	\$33,76	\$1013

### 4.3.1 Consumo de diluyentes (Insumos)

En el análisis de costos de operación se determina el costo de la Nafta para la dilución del crudo pesado.

**Tabla 14. Costos de diluyente.**

Diluyente	Lt / bbl	Costos (USD / Lt)
Nafta	70	\$0.3047

En la siguiente tabla se muestra el volumen de crudo a tratar en cada uno de los diez (10) periodos:

**Tabla 15. Volumen de crudo a tratar.**

Periodo	Crudo a tratar, bopd	No. Dias	Volumen a tratar, bopm	USD / Bbl Crudo	V/r Venta, US\$
1	75000	30	2'250.000	45	\$101'250.000
2	75000	30	2'250.000	45	\$101'250.000
3	75000	30	2'250.000	45	\$101'250.000
4	75000	30	2'250.000	45	\$101'250.000
5	75000	30	2'250.000	45	\$101'250.000
6	75000	30	2'250.000	45	\$101'250.000
7	75000	30	2'250.000	45	\$101'250.000
8	75000	30	2'250.000	45	\$101'250.000
9	75000	30	2'250.000	45	\$101'250.000
10	75000	30	2'250.000	45	\$101'250.000
<b>TOTAL</b>			<b>22'500.000</b>		<b>\$1.012'500.000</b>

Con respecto a los costos de tratamiento se contemplan:

**Tabla 16. Costos consumo de diluyente actual.**

Periodo	Cantidad de Lt Nafta / bbl crudo	Volumen a tratar, bopm	USD / Lt nafta	Costo total
1	40	2'250.000	0,3047	\$27'423.000
2	40	2'250.000	0,3047	\$27'423.000
3	40	2'250.000	0,3047	\$27'423.000
4	40	2'250.000	0,3047	\$27'423.000
5	40	2'250.000	0,3047	\$27'423.000
6	40	2'250.000	0,3047	\$27'423.000
7	40	2'250.000	0,3047	\$27'423.000
8	40	2'250.000	0,3047	\$27'423.000
9	40	2'250.000	0,3047	\$27'423.000
10	40	2'250.000	0,3047	\$27'423.000
<b>TOTAL</b>				<b>\$274'230.000</b>

## 5. CONCLUSIONES

1. Previendo variaciones en la tasa de crudo en un rango de 3 a 1, o más, los mezcladores estáticos no deberían ser usados como los únicos equipos de mezclado.
2. Los mezcladores estáticos tienen un tamaño que requieren menos espacio que los mezcladores convencionales. Presentan mayor flexibilidad, un mismo mezclador puede ser diseñado para operar en distintos tipos de fluidos, presentan un mezclado predecible y repetible, bajos requerimientos de potencia, amplia variedad de elementos de construcción,
3. Los mezcladores estáticos son aplicables para operaciones continuas, de pequeño tamaño, no tiene partes móviles, aunque en la actualidad la única manera para su adquisición es un balance entre los costos y la marca de fabricante debido a la falta de correlaciones que describan su comportamiento.
4. En corrientes con alto contenido de gas, otro de los beneficios obtenidos con el uso de los mezcladores es que se logra mantener el °API de la mezcla con un menor consumo de diluyente, esto debido a la homogeneización eficiente de las corrientes de crudo y gas.

## 6. RECOMENDACIONES

1. Evaluar la instalación de un mezclador estático en un pozo de crudo extrapesado con una alta producción de gas, el cual servirá para corroborar los beneficios del uso de los mezcladores estáticos en crudos pesados.
2. Evaluar el uso de un mezclador estático de fondo en un pozo productor de crudo extrapesado con alta producción de gas, con la finalidad de lograr una mayor concentración de gas disperso en el crudo que permita la facilidad de desplazamiento de la fase continua, y evitar el trabajo de la bomba con altos volúmenes de gas.
3. Aplicación de un mezclador estático en un pozo productor por Gas Lift, con la finalidad de lograr un mejor mezclado a nivel de la válvula de inyección y de esta forma mejorar el sistema de levantamiento.
4. Realizar un estudio utilizando la simulación de la dinámica de fluidos en un mezclador a través del uso de un software especializado.
5. Evaluar el uso de un mezclador estatico aguas arriba de los separadores gravitacionales o inerciales lo cual garantiza la distribución del tamaño de uniforme y por tanto permitiría una mejor separación.

## BIBLIOGRAFIA

BACA, Guillermo. Ingeniería Económica. Octava edición, Fondo Educativo Panamericano, Bogotá, 2007, 397 p.

EDWAR, Paul. et al. Handbook of Industrial Mixing. Science & Practice. Wiley, Interscience, 2004.

ELHADDAD, Elnori. New model to eliminate salts from sarir crude oil: a case study. International Journal of engineering research and science & technology. Volumen 2, No. 4. Huyderabad - India, Noviembre 2013.  
[http://www.ijerst.com/ijerstadmin/upload/IJEETC\\_52954ad435242.pdf](http://www.ijerst.com/ijerstadmin/upload/IJEETC_52954ad435242.pdf)

GARCIA, Cesar et. al. Optimización del Transporte por Oleoducto de Crudo Pesado Castilla. Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol. 8 No. 1, 2010, , Enero – Junio, pp. 17 – 28.

GARCIA, Cristian. Encogimiento volumétrico de mezclas de hidrocarburos.  
<http://myslide.es/download/link/encogimiento-volumetrico-de-mezclas-hernando-valencia>

GONZALEZ, Julio. Manejo de Crudos Pesados y Extrapesados en Facilidades de Producción. ACE INTERNATIONAL. Noviembre 19 al 23 de 2007.

GX STATIC MIXER PRODUCT BULLETIN. StaMixCo. 2007, [http://www.stamixco-usa.com/files/3-content-pdf-files/pdf-07.0\)%20gx%20static%20mixer%20technical%20bulletin.pdf](http://www.stamixco-usa.com/files/3-content-pdf-files/pdf-07.0)%20gx%20static%20mixer%20technical%20bulletin.pdf)

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Compendio de tesis y otros trabajos de grado. Bogota: INCONTEC, 2006.

JAVA, Aprilia. Static mixer, Engineering Desing Guideline. Karl Kolmetz, April 2014.

KIRK, et al., Enciclopedia de tecnologia quimica. Quinta edición, Editorial Limusa, Mexico, 1998, Mexico.

KULKARNI, A.D y WANI, K. Reducing Crude Oil Viscosity Using Diluents. <http://www.ijettjournal.org>, ISSN: 2231-538.

MIXING AND REACTION TECHNOLOGY, Pace Setting Technology. 2007 [https://www.sulzer.com/en/-/media/Documents/ProductsAndServices/Mixpac Cartridges Applications Static Mixers/Static Mixers/Brochures/Mixing and Reaction Technology e 23270640.pdf](https://www.sulzer.com/en/-/media/Documents/ProductsAndServices/Mixpac_Cartridges_Applications_Static_Mixers/Static_Mixers/Brochures/Mixing_and_Reaction_Technology_e_23270640.pdf) 24 p.

MOTT, Robert L, Mecánica de fluidos. Sexta edición. Pearson Prentice Hall. México. 2006. 627 p.

N, Harby, et Al. Mixing in the process industries. 2nd. Edicion. Oxford. Butterworth-Heinemann. 1997.

PERRY, Robert H, et al., Manual del Ingeniero Quimico. 7ª Edición. Editorial Mc Graw Hill, España. Volumen I.

PHILADELPHIA MIXING SOLUTIONS. Kestrel Static Mixers. Installation, Operating, and Maintenance Manual. Rev A, Sept 2007, pp 7 – 9.

SANTOS, Nicolas. Especialización en Producción de Hidrocarburos. Modulo Operaciones de Tratamiento de Crudo. 2012, pp. 3-14 – 3-16.

STATIC MIXING, REACTION, HEAT TRANSFER & FLUID DYNAMICS TECHNOLOGY, 2007. [http://www.stamixco-usa.com/files/3-content-pdf-files/pdf-11.0\)%20general%20static%20mixing%20technical%20bulletin.pdf](http://www.stamixco-usa.com/files/3-content-pdf-files/pdf-11.0)%20general%20static%20mixing%20technical%20bulletin.pdf)

WARREN, Mc Case, Operaciones unitarias en ingeniería química. 7ª Edicion, Editorial Mc Graw-Hill, Mexico 2007. 647 p.