

	<b>OXY LA CIRA INFANTAS SIMULACIÓN EROSIÓN EN SERPENTINA 3” – 150#</b>	<b>Nº OXY</b>
		08 MAYO 2017
		ELABORÓ: H.GASCA
		REV. 0

## MEMORIA DE CÁLCULO CFD DE EROSIÓN SERPENTINA – LA CIRA INFANTAS

0	EMITIDO PARA APROBACIÓN DEL CLIENTE				15-06-2017	H.GASCA	H. GASCA
REV	DESCRIPCIÓN				FECHA	ELABORÓ	REVISÓ
AREA DE DISTRIBUCIÓN		DISTRIBUIDO POR: H.G.(CT)				ARCHIVO MAGNÉTICO	

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVO	3
3. RESUMEN Y RECOMENDACIONES	3
<b>3.1 ETAPA II MODELO PROPUESTO</b>	<b>5</b>
<b>3.2 ETAPA I MODELOS DE ANÁLISIS INICIAL</b>	<b>12</b>
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	17
<b>A. MODELOS DE EROSIÓN</b>	<b>17</b>
<b>5. MODELOS MULTIFÁSICOS</b>	<b>19</b>
6. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS UTILIZADOS	31
<b>A. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELAMIENTO</b>	<b>31</b>
7. LÍMITES DE LA SIMULACIÓN	38
8. DOCUMENTOS DE REFERENCIA	38
9. SOFTWARE	38
10. DATOS DE ENTRADA	39
11. ANEXOS	40

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene el resumen del cálculo realizado con modelos acoplados CFD y partículas para verificar niveles de erosión causada por los sólidos suspendidos en el fluido de producción.

También se modeló el comportamiento multifásico de algunos de los casos estudiados para localizar posibles zonas de cavitación.

Se estudiaron variaciones geométricas planteadas con el cliente y al final se obtuvo una configuración mejorada respecto a la erosión para la serpentina de producción original 150# conexión 3" del plano 09-07-SS-401-1 CIRA INFANTAS.

## 2. OBJETIVO

Verificar las zonas de probable falla por erosión en la serpentina y producir el plano con una alternativa para disminuir la posible incidencia de estas.

## 3. RESUMEN Y RECOMENDACIONES

A continuación, se resumen los principales hallazgos y soluciones obtenidos. En numerales posteriores profundizamos en la manera en que se obtuvieron.

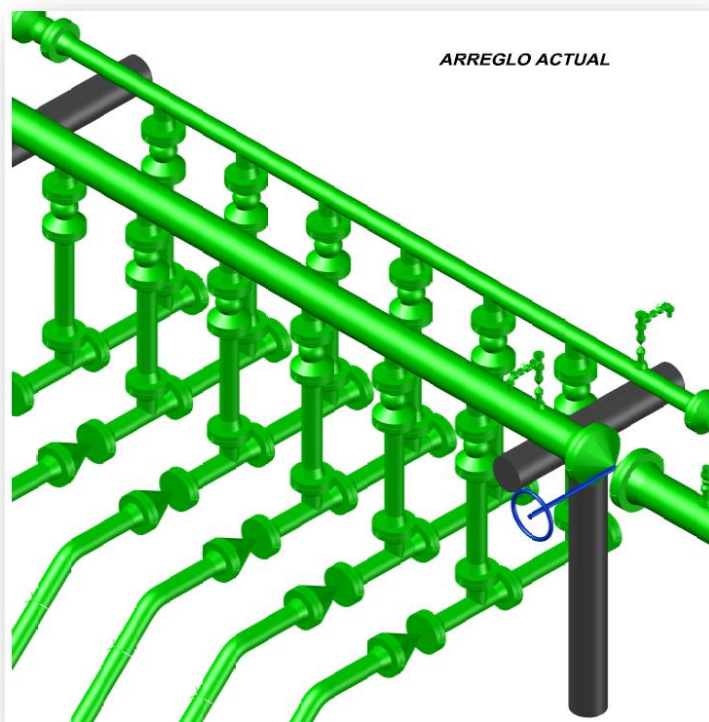


Figura 1 Serpentina Actual

Se modeló el comportamiento de diversas configuraciones geométricas para la serpentina estudiada realizando un trabajo comparativo entre estas.

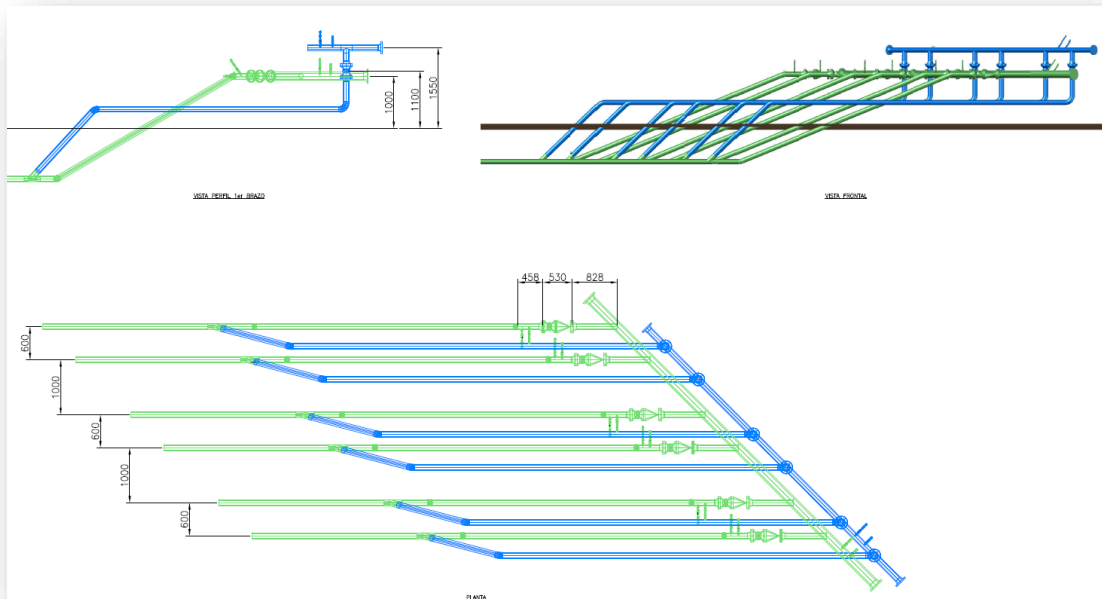
Se desarrolló el presente proyecto en 2 etapas. En orden cronológico, la primera etapa consistió en analizar configuraciones similares a la serpentina actual. Verificando así la posibilidad de mejora al realizar cambios menores a la misma (cambios de diámetro, reemplazar Tees por Yees en las derivaciones hacia los cabezales principal y de pruebas y diferentes disposiciones de las derivaciones).

La segunda etapa consistió en evaluar alternativas propuestas por el cliente, a las que además se incluyeron mejoras basadas en el análisis previo. De esta etapa resultó la alternativa propuesta en este alcance. El modelo propuesto proviene de la segunda etapa, por lo que esta se resume antes que la primera.

Se debe tener en cuenta que los modelos son comparables sólo con los de la misma etapa. La explicación de lo anterior es que la longitud total simulada de las entradas de los pozos hacia los cabezales principales es mucho mayor (del orden de 2.5 veces) en los modelos de la etapa II que en los de la etapa I, y que a mayor longitud modelada se observa un mayor asentamiento de los sólidos dentro del tubo (más cercano a la realidad) y niveles de erosión más altos. Para comparar las dos etapas, se procedió a generar un modelo puente (la misma configuración para las dos opciones) según se explica adelante.

Se pudo determinar lo siguiente:

### 3.1 ETAPA II MODELO PROPUESTO



### Figura 2 Serpentina Propuesta

Modelo	Descripción	Perdida de material por erosión* máxima (m³/s)	Zona de ocurrencia	Perdida de material por erosión* de segunda importancia (m3/s)	Zona de ocurrencia	Perdida de material por erosión* de tercera importancia (m3/s)	Zona de ocurrencia
9	Intersección 1 lateral a 45%, Ascenso al cabezal 22.5º	1.72x10 <sup>-13</sup>	1	0.2x10 <sup>-13</sup>	2	0.2x10 <sup>-13</sup>	2
10	Intersección 1 Lateral a 22.5º, ascenso a cabezal a 12º	17.2e10 <sup>-13</sup>	2	1.2 x10 <sup>-13</sup>	1		
11	Intersección 1 vertical inferior a 45º,  Ascenso a cabezal a 45º, Transición entre pozo y cabezal con Yee o Tee ascendente	26x10 <sup>-13</sup>	3	1.4 x10 <sup>-13</sup>	2	0.2 x10 <sup>-13</sup>	1

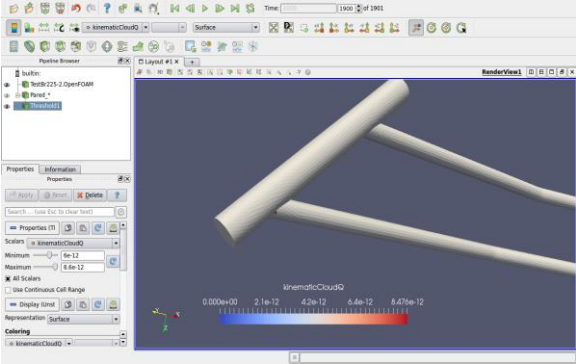
Tabla resumen Etapa II \* Se deben tener en cuenta los límites del modelo respecto a resultados numéricos.

Zonas: 1 Intersección de pozo con cabezal principal, 2 Bottom del tubo de 3", 3 Tee o Yee de manifolds de etapa I que deriva hacia cabezal principal.

En la tabla anterior se comparan los efectos de erosión en los Manifolds simulados en esta etapa. De allí se deduce la escogencia del modelo 9 cómo el recomendado por tener el menor valor en su máximo de pérdida por erosión.

Por otra parte si se compara el modelo 9 con el 10 se observa que en la zona 1 (de segunda importancia) de intersección entre las llegadas de los pozos y el cabezal principal a  $45^{\circ}$  no es la mejor opción y se podría pensar en disminuir el ángulo de entrada a  $22.5^{\circ}$  cómo en el modelo 10, o a través de una curva adicional, generar una entrada inferior como en el caso del modelo 11. Respecto a la primera de las anteriores modificaciones se debe tener en cuenta que el cordón de soldadura para hacer la transición generará nuevos efectos erosivos que se deberían verificar. La segunda opción genera una nueva curva que también requeriría verificación.

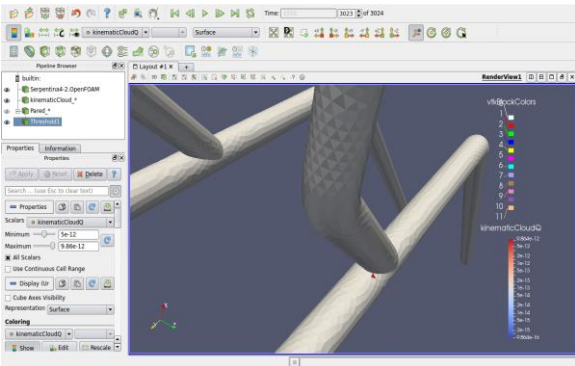
Por lo anterior y también teniendo en cuenta su facilidad constructiva se recomienda la alternativa 9 y se anexan sus planos.

No.	Caso estudiado	Observaciones	Video o imagen Hipervínculo
9	<p><b>Manifold Propuesto figura 2.</b></p> <p>Ascenso de pozos a 22.5°, válvula y cheque horizontales, entrada al cabezal principal lateral a 45°.</p> <p>Se elimina cheque de línea de pruebas (OXY verifica con operaciones).</p>	<p>Las zonas de mayor probabilidad de falla están ubicadas en:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. En las Yees de conexión entre las entradas de los pozos y el cabezal principal. La erosión máxima reportada en este punto corresponde a una pérdida de material en tubo no recubierto de <math>1.72 \times 10^{-13}</math> m<sup>3</sup>/S para la condición máxima de caudal de operación.</li> <li>2. El siguiente rango importante de nivel de esfuerzos se ubica en la parte inferior del tubo a lo largo de la bayoneta en varios puntos con valores de <math>0.2 \times 10^{-13}</math> m<sup>3</sup>/S (88% por debajo de los máximos para esta serpentina). Se anota que la pérdida de material por erosión en esta zona es 8.6 veces menor que la del punto de mayor erosión lo que indica su mayor duración respecto a este tipo de fallas.</li> <li>3. Por debajo del valor del numeral 2 anterior se encuentran valores de pérdida de material de manera uniforme en la parte inferior del resto de esta serpentina.</li> </ol> <p>La comparación con respecto a la serpentina actual (ver primera figura) se puede hacer contra el modelo de calibración 11ª de esta tabla, que es una variación poco significativa de la actual (ver análisis etapa I). El valor máximo para ese caso es de <math>26 \times 10^{-13}</math> m<sup>3</sup>/s en la zona de la Yee ascendente. La comparación muestra disminución del 93% en la erosión máxima o de manera equivalente un incremento de 15 veces en la vida útil sin falla para la zona de máxima erosión.</p> 	<p>Etapal\Mod_9a.avi, Etapal\Mod_9b.avi, Etapal\Md9_1.png, Etapal\Md9_2.png, Etapal\Md9_3.png, Etapal\Md9_4.png, Etapal\Md9_5.png, Etapal\Md9_6.png, Etapal\Md9_7.png, Etapal\Md9_8.png, Etapal\Md9_9.png, Etapal\Md9_10.png, Etapal\Md9_11.png, Etapal\Md9_12.png, Etapal\Md9_13.png, Etapal\Md9_14.png, Etapal\Md9_15.png, Etapal\Md9_16.png, Etapal\Md9_17.png, Etapal\Md9_18.png, Etapal\Md9_19.png, Etapal\Md9_20.png, Etapal\Md9_21.png, Etapal\Md9_22.png</p>





11a	<p>Similar (equivalente para efectos de este análisis) a la serpentina actual. Entrada inferior a cabezal principal a 45° en el sentido del flujo, válvula en vertical – Modelo de erosión. Longitud equivalente a los modelos de la etapa II (objetivo comparar modelos etapas I y II).</p>	<p>Las zonas de mayor probabilidad de falla por erosión están ubicadas en:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. La Tee de ascenso desde las líneas de los pozos hacia el cabezal principal. La pérdida de material por erosión calculada en esta zona es de <math>26 \times 10^{-13}</math> m<sup>3</sup>/s, 15.1 veces mayor que la calculada en el modelo 9.</li> <li>2. Ocurre pérdida de material por erosión de <math>1.4 \times 10^{-13}</math> m<sup>3</sup>/s en la serpentina en la parte inferior de los tubos de entrada de los pozos.</li> <li>3. Ocurre pérdida de material por erosión de <math>0.2 \times 10^{-13}</math> m<sup>3</sup>/s en la serpentina en la entrada al cabezal principal inferior Yee 45°. Es decir 10 veces menor que la que ocurre en la Yee horizontal del modelo 9. Esto sugiere una posible modificación a revisar respecto al modelo escogido.</li> </ol> <div data-bbox="623 716 1161 1759"> </div>	<p>Etapal\Mod11a_1.avi, Etapal\Mod11a_2.avi, Etapal\Mod11a_3.png, Etapal\Mod11a_4.png, Etapal\Mod11a_5.png, Etapal\Mod11a_6.png, Etapal\Mod11a_7.png, Etapal\Mod11a_8.png, Etapal\Mod11a_9.png, Etapal\Mod11a_10.png, Etapal\Mod11a_11.png, Etapal\Mod11a_12.png, Etapal\Mod11a_13.png, Etapal\Mod11a_14.png, Etapal\Mod11a_15.png, Etapal\Mod11a_16.png, Etapal\Mod11a_17.png, Etapal\Mod11a_18.png, Etapal\Mod11a_19.png, Etapal\Mod11a_20.png, Etapal\Mod11a_21.png, Etapal\Mod11a_22.png, Etapal\Mod11a_23.png, Etapal\Mod11a_24.png</p>
-----	--	---	--

11b	<p>Brazo modificado con entrada a 45° en el sentido del flujo – Modelo de erosión. Longitud equivalente a los modelos de la etapa I (objetivo comparar modelos etapas I y II).</p>	<p>Las zonas de mayor probabilidad de falla por erosión están ubicadas en:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>La Tee de ascenso desde las líneas de los pozos hacia el cabezal principal. La pérdida de material por erosión calculada en esta zona es de <math>1.96 \times 10^{-13}</math> 3/s, 13 veces mayor que la calculada en el modelo 11a. Ya que se trata del mismo modelo que el 11<sup>a</sup> pero con la entrada justo al pie de la serpentina, este nos da un factor de escala aproximado (13) para comparar los modelos de la etapa I y II si se quiere por parte del lector.</li> </ol> 	<p>Etapal\Mod11b_1.avi, Etapal\Mod11b_2.avi, Etapal\Mod11b_3.avi, Etapal\Mod11b_4.avi, Etapal\Mod11b_5.avi, Etapal\Mod11b_6.avi, Etapal\Mod11b_7.avi, Etapal\Mod11b_8.avi, Etapal\Mod11b_9.png, Etapal\Mod11b_10.png, Etapal\Mod11b_11.png, Etapal\Mod11b_12.png, Etapal\Mod11b_13.png, Etapal\Mod11b_14.png, Etapal\Mod11b_15.png, Etapal\Mod11b_16.png, Etapal\Mod11b_17.png, Etapal\Mod11b_18.png, Etapal\Mod11b_19.png, Etapal\Mod11b_20.png, Etapal\Mod11b_21.png, Etapal\Mod11b_22.png, Etapal\Mod11b_23.png, Etapal\Mod11b_24.png, Etapal\Mod11b_25.png, Etapal\Mod11b_26.png, Etapal\Mod11b_27.png, Etapal\Mod11b_28.png, Etapal\Mod11b_29.png, Etapal\Mod11b_30.png, Etapal\Mod11b_31.png, Etapal\Mod11b_32.png, Etapal\Mod11b_33.png, Etapal\Mod11b_34.png, Etapal\Mod11b_35.png, Etapal\Mod11b_36.png, Etapal\Mod11b_37.png, Etapal\Mod11b_38.png, Etapal\Mod11b_39.png, Etapal\Mod11b_40.png, Etapal\Mod11b_41.png, Etapal\Mod11b_42.png, Etapal\Mod11b_43.png, Etapal\Mod11b_44.png, Etapal\Mod11b_45.png, Etapal\Mod11b_46.png, Etapal\Mod11b_47.png, Etapal\Mod11b_48.png, Etapal\Mod11b_49.png, Etapal\Mod11b_50.png, Etapal\Mod11b_51.png, Etapal\Mod11b_52.png, Etapal\Mod11b_53.png, Etapal\Mod11b_54.png, Etapal\Mod11b_55.png, Etapal\Mod11b_56.png, Etapal\Mod11b_57.png, Etapal\Mod11b_58.png, Etapal\Mod11b_59.png, Etapal\Mod11b_60.png, Etapal\Mod11b_61.png, Etapal\Mod11b_62.png, Etapal\Mod11b_63.png, Etapal\Mod11b_64.png, Etapal\Mod11b_65.png, Etapal\Mod11b_66.png, Etapal\Mod11b_67.png, Etapal\Mod11b_68.png, Etapal\Mod11b_69.png, Etapal\Mod11b_70.png, Etapal\Mod11b_71.png, Etapal\Mod11b_72.png, Etapal\Mod11b_73.png, Etapal\Mod11b_74.png, Etapal\Mod11b_75.png, Etapal\Mod11b_76.png, Etapal\Mod11b_77.png, Etapal\Mod11b_78.png, Etapal\Mod11b_79.png, Etapal\Mod11b_80.png, Etapal\Mod11b_81.png, Etapal\Mod11b_82.png, Etapal\Mod11b_83.png, Etapal\Mod11b_84.png, Etapal\Mod11b_85.png, Etapal\Mod11b_86.png, Etapal\Mod11b_87.png, Etapal\Mod11b_88.png, Etapal\Mod11b_89.png, Etapal\Mod11b_90.png, Etapal\Mod11b_91.png, Etapal\Mod11b_92.png, Etapal\Mod11b_93.png, Etapal\Mod11b_94.png, Etapal\Mod11b_95.png, Etapal\Mod11b_96.png, Etapal\Mod11b_97.png, Etapal\Mod11b_98.png, Etapal\Mod11b_99.png, Etapal\Mod11b_100.png</p>
-----	--	--	---

12	<p>Manifold actual con reducción de velocidad (equivalente a aumentar el diámetro de 3" a 4" en entradas de Pozos.</p> <p>(Comparable con actual de la etapa I).</p>	<p>Las zonas de mayor probabilidad de falla por erosión están ubicadas en:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. En el ascenso a 45° de las líneas de pozos con pérdida de material del orden de <math>4 \times 10^{-13}</math> m<sup>3</sup>/S. Que es superior al máximo ocurrido a la en el modelo 1 de comparación. Esto muestra que el efecto de reducción de la velocidad es de permitir que descendan los sólidos y se acumulen en el fondo del tubo generando efectos erosivos mayores.</li> <li>2. En las Tees de ascenso desde el pozo hacia el cabezal de <math>0.2 \times 10^{-13}</math> m<sup>3</sup>/s, lo que representa una disminución considerable respecto a los del modelo 1 de referencia, e indican que respecto al cambio brusco de dirección del flujo la reducción de velocidad mejora las condiciones de erosión.</li> </ol> <div data-bbox="597 688 1172 1417"> </div> <p>No se recomienda aumentar el diámetro de la serpentina por lo indicado en el no. 1 de este aparte.</p>	<p>EtapalIMd12_1.png, EtapalIMd12_2.png, EtapalIMd12_3.png, EtapalIMd12_4.png, EtapalIMd12_5.png, EtapalIMd12_6.png, EtapalIMd12_7.png, EtapalIMd12_8.png, EtapalIMd12_9.png</p>
----	--	--	--

Tabla 2 Análisis Etapa II.

### 3.2 ETAPA I MODELOS DE ANÁLISIS INICIAL

No.	Caso estudiado	Observaciones	Video o imagen hipervínculo
1	Manifold Actual – Modelo de Erosión	<p>Las zonas de mayor probabilidad de falla están ubicadas en:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. En las Tees de conexión entre las bayonetas ascendentes de 3" y los tubos verticales de 3" en los que se ubican las válvulas de corte. La erosión máxima reportada en este punto corresponde a una pérdida de material en tubo no recubierto de <math>1.8 \times 10^{-13}</math> m<sup>3</sup>/S para las condiciones máximas de operación.</li> <li>2. En las Tees de conexión entre los tubos verticales de 3" y la línea horizontal de 6".</li> <li>3. En la parte inferior de todos los tramos de tubo horizontales e inclinados la pérdida de material calculada en estas zonas es de aproximadamente <math>0.16 \times 10^{-13}</math> m<sup>3</sup>/s.</li> </ol> <p>También se anota que en las condiciones estudiadas ocurre separación entre las fases es de menos de 1 segundo partiendo de la condición totalmente mezclada y tamaños de gota del orden de 1mm. Teniendo en cuenta lo anterior y que este es un punto lejano (en términos hidráulicos) del inicio del flujo, se puede concluir que dentro de la tubería las fases se encuentran separadas. Esto implica que los sólidos están con la fase acuosa en la parte inferior del tubo y que el gas se mantiene en la parte superior.</p>	<a href="#">Etapa\Modelo_1.avi</a>
2	Brazo modificado con entrada a 45° en el sentido del flujo – Modelo de erosión.	<p>Se construyó un modelo para verificar el comportamiento de la erosión en el punto más crítico (En las Tees de conexión entre las bayonetas ascendentes de 3" y los tubos verticales de 3" en los que se ubican las válvulas de corte), reemplazando la tee por una Yee a 45°.</p> <p>Se obtuvo una mejora en la pérdida máxima de material por erosión del 31% en comparación con la configuración actual, pasando de <math>1.8 \times 10^{-13}</math> m<sup>3</sup>/s a <math>0.124 \times 10^{-13}</math> m<sup>3</sup>/s, que es representativa.</p>	<a href="#">Etapa\Modelo_2.avi</a>

3	Brazo modificado con entrada a 45° en sentido contrario al flujo – Modelo de erosión.	<p>Se construyó un modelo para verificar el comportamiento de la erosión en el punto más crítico (En las Tees de conexión entre las bayonetas ascendentes de 3" y los tubos verticales de 3" en los que se ubican las válvulas de corte), reemplazando la tee por una Yee a 45° en sentido contrario al flujo.</p> <p>Se obtuvo una mejora en la pérdida máxima de material por erosión del 62% en comparación con la configuración actual, pasando de <math>1.8 \times 10^{-13} \text{m}^3/\text{s}</math> a <math>0.68 \times 10^{-13} \text{m}^3/\text{s}</math>, que es representativa y hace recomendable esta solución.</p> <p>Siendo la de mayor disminución en la probabilidad de erosión, se debe tener en cuenta que es la configuración que produce mayor caída de presión del flujo en la serpentina.</p>	<a href="#">Etapa\Modelo_3.avi</a>
4	Manifold Actual – Modelo multifásico	<p>Este modelo muestra la separación de las fases agua, crudo y gas después de 3 segundos e iniciando con una mezcla homogénea.</p> <p>La fase de gas dentro de fases líquidas hace posible la existencia del fenómeno de cavitación por implosión de burbujas en zonas de alta presión del líquido. Se observa en el modelo de la fase de gas (Alpha gas) que la mayor concentración de esta fase ocurre en la parte superior de la sección del tubo y es una fase relativamente uniforme.</p> <p>En el tubo ascendente de las entradas de los pozos (indicado con una flecha) se ve un punto rojo más intenso que indica alta concentración de gas. Esta zona tiene probabilidades de ser fuente de cavitación por estar encerrada en el flujo del líquido de mayor densidad (ver Alpha Water) y es recomendable realizar modificaciones que disminuyan este efecto.</p>	<a href="#">4.1 Alpha Gas: Etapa\Modelo_4_1.png</a> <a href="#">4.2 Alpha Oil: Etapa\Modelo_4_2.png</a> <a href="#">4.3 Alpha Water: Etapa\Modelo_4_3.png</a>
5	Brazo modificado con entrada a 45° en el sentido del flujo – Modelo de multifásico.	<p>Se observa un comportamiento similar al del modelo 4.</p> <p>En la Yee del tubo ascendente de las entradas de los pozos (indicado con una flecha) se ve un punto rojo más intenso. Esta zona tiene probabilidades de ser fuente de cavitación, sin embargo, a diferencia del caso del modelo 4 esta concentración de gas ocurre dentro de la fase gaseosa y rodeado de la fase líquida de aceite lo que, aunque no elimina la probabilidad de ocurrencia de cavitación, si representa una mejora respecto al modelo anterior.</p>	<a href="#">5.1 <math>\alpha</math>gas: Etapa\Modelo_5_1.png</a> <a href="#">5.2 <math>\alpha</math>Oil: Etapa\Modelo_5_2.png</a> <a href="#">5.3 <math>\alpha</math>Water: Etapa\Modelo_5_3.png</a>

6	Brazo modificado con entrada a 45° en sentido contrario al flujo – Modelo multifásico.	<p>Este modelo sui géneris presentó un muy buen resultado frente a la erosión y si las fases presentes fueran solamente líquidas sería una solución adecuada. Sin embargo, haciendo un análisis detallado del modelo multifásico se puede concluir que es un modelo con muy alto riesgo de generar efectos sumados de cavitación y erosión. Lo anterior se explica de la siguiente manera. En la figura Modelo_6_1 se indican con flechas en color negro las zonas que ocupa el gas de acuerdo con los resultados del modelo y con color rojo las que ocupa el agua. La dirección del flujo se indica con el incremento en la numeración de los puntos. De este modo para ir del punto 1 al punto 3 el gas debe cruzarse con la corriente de sólidos que proviene del punto 1' al punto 3' en este cruce existe alta probabilidad de arrastre de sólidos por la fase gaseosa. Este es el resultado menos deseable toda vez que en caso de implosión de burbujas de gas podrán disparar chorros de arena y no solamente de líquidos.</p>	<p>6.1 <math>\alpha</math> Gas: Etapa\Modelo_6_1.png</p> <p>6.2 <math>\alpha</math> Oil: Etapa\Modelo_6_2.png</p> <p>6.3 <math>\alpha</math> Water: Etapa\Modelo_6_3.png</p> <p>Etapa\Modelo_6_3.avi</p>
7	Efecto del pase de raíz de la soldadura.	<p>En estudios similares hemos encontrado una incidencia importante de los efectos erosivos en los sitios de soldadura debidos al resalto del pase de soldadura y en esos casos se recomienda reducir o suavizar los pases de raíz de las soldaduras ya que estos generan efectos turbulentos (vorticidad de alta velocidad y baja presión) que están relacionados directamente con la erosión en la soldadura y su vecindad.</p> <p>En el caso de las serpentinas de la Cira si están revestidas interiormente esta recomendación disminuye su importancia debido al revestimiento interno de la tubería que suaviza el paso de los sólidos por las zonas de soldadura.</p>	
8	Salidas para instrumentos	Se debe tener en cuenta en la selección de accesorios e instrumentos que en la localización actual de las salidas para instrumentos en el TOP del tubo se estará midiendo en zonas de presencia de gas. Si el área de procesos lo encuentra viable se podrán desplazar estas salidas 45° desde el Top del tubo cómo se presenta en los planos de la alternativa seleccionada.	

Tabla 2 Análisis Etapa I.

Basados en los resultados anteriormente explicados se producen los planos OX-IS-001 y OX-IS-001-A para análisis con el cliente.

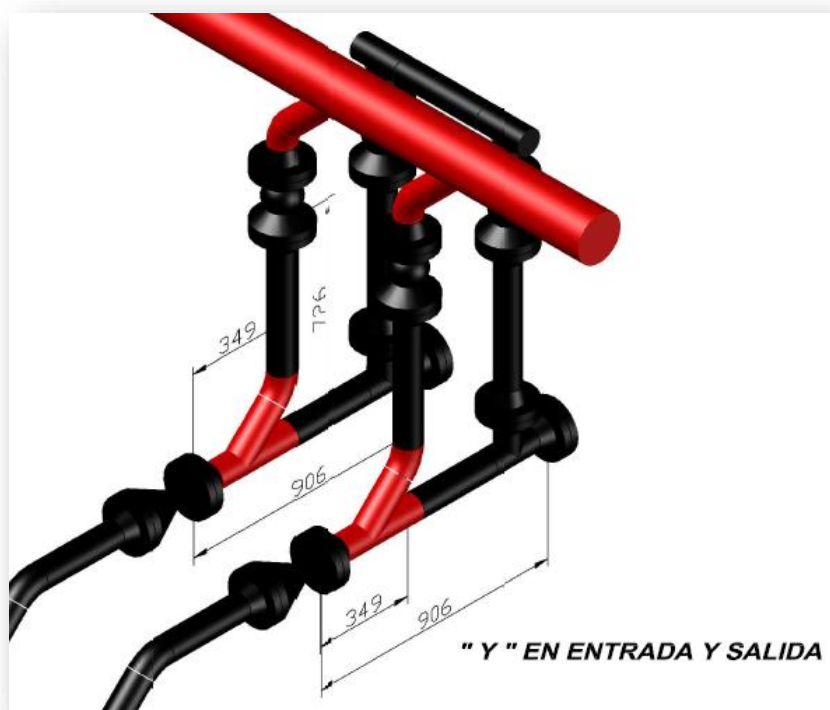


Figura 3 Modificación serpentina Alternativa 1



Figura 4 Modificación serpentina Alternativa 2

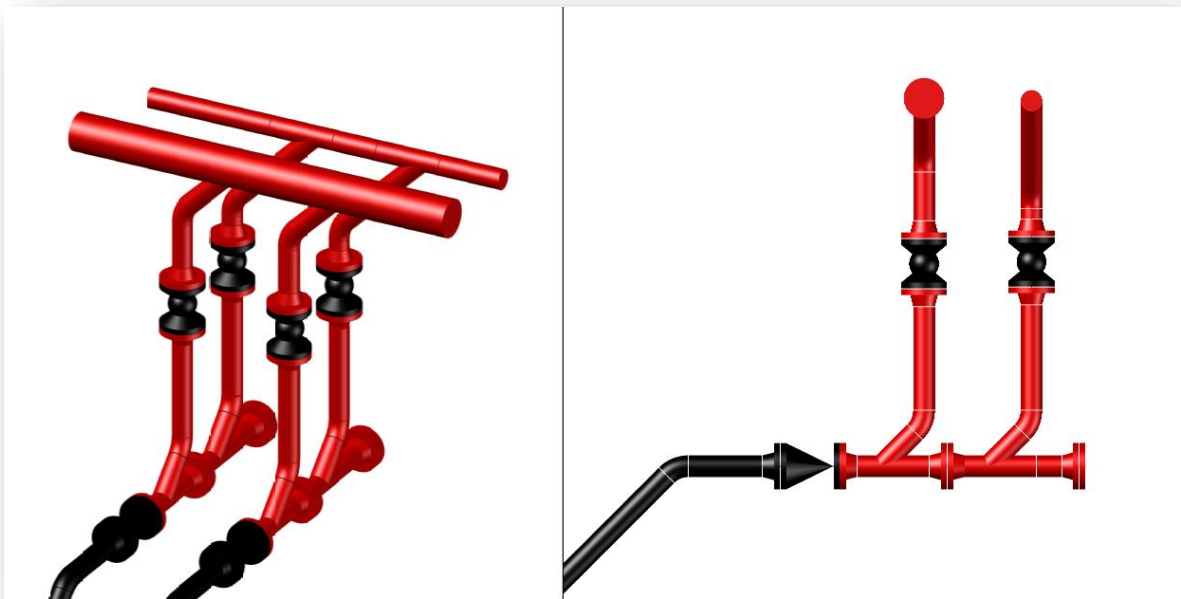


Figura 5 Modificación serpentina Alternativa 3

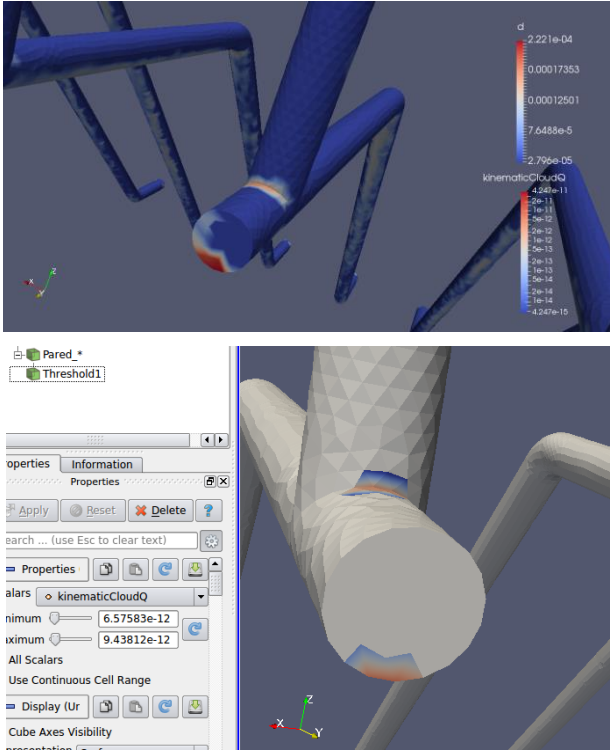
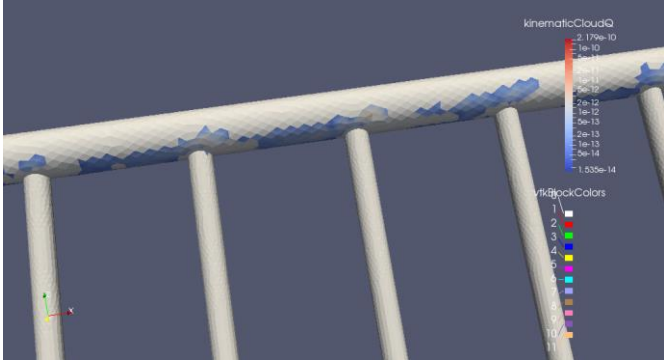


## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se muestran resultados adicionales a los presentados en el resumen, en donde ya se hizo explicación de los principales casos encontrados y las mejoras propuestas.

### A. MODELOS DE EROSIÓN

Este modelo acopla al movimiento de partículas el efecto de estas sobre el tubo a través de las ecuaciones de Finnie.

Variable	Modelo 1	Valores para análisis
Q: Volumen de material removido del tubo.		$Q = 90 \times 10^{-12} \text{ m}^3 / 50 \text{ s} = 1.8 \times 10^{-13} \text{ m}^3 / \text{s}$  Remoción de material por abrasión. (Para material del tubo sin revestir).
Q: Volumen de material removido del tubo.		$Q = 3 \times 10 \times 10^{-12} \text{ m}^3 / 50 \text{ s} = 0.6 \times 10^{-13} \text{ m}^3 / \text{s}$  Remoción de material por abrasión. (Para material del tubo sin revestir).

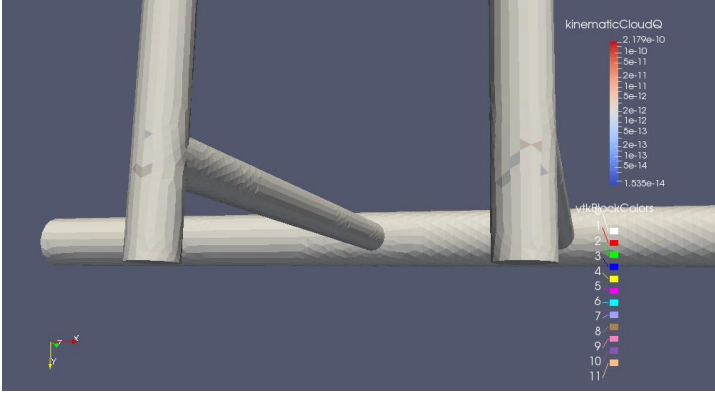
<p>Q: Volumen de material removido del tubo.</p>		<p><math>Q=2 \times 10 \times 10^{-12} \text{ m}^3/50\text{s} = 0.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}</math></p> <p>Remoción de material por abrasión. (Para material del tubo sin revestir).</p>
--	--	--

Tabla 3 Serpentina actual – Punto de máxima pérdida de material por erosión.

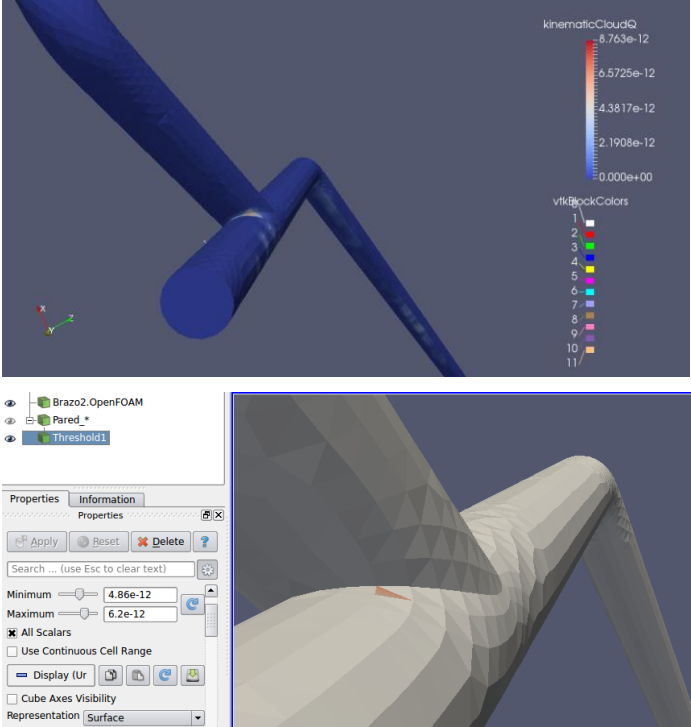
Variable	Modelo 2	Valores para análisis
<p>Q: Volumen de material removido del tubo.</p>		<p><math>Q=6 \times 10 \times 10^{-12} \text{ m}^3/50\text{s} = 1.24 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}</math></p> <p>Remoción de material por abrasión. (Para material del tubo sin revestir).</p>

Tabla 4 Serpentina modificada con entrada en Yee – Punto de máxima pérdida de material por erosión.

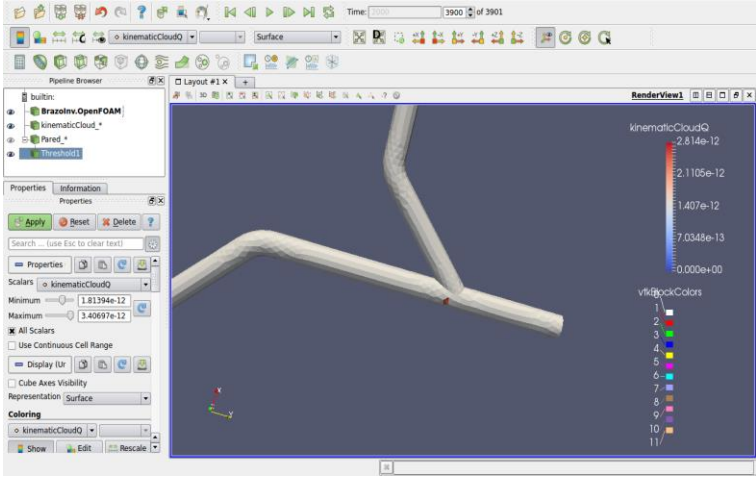
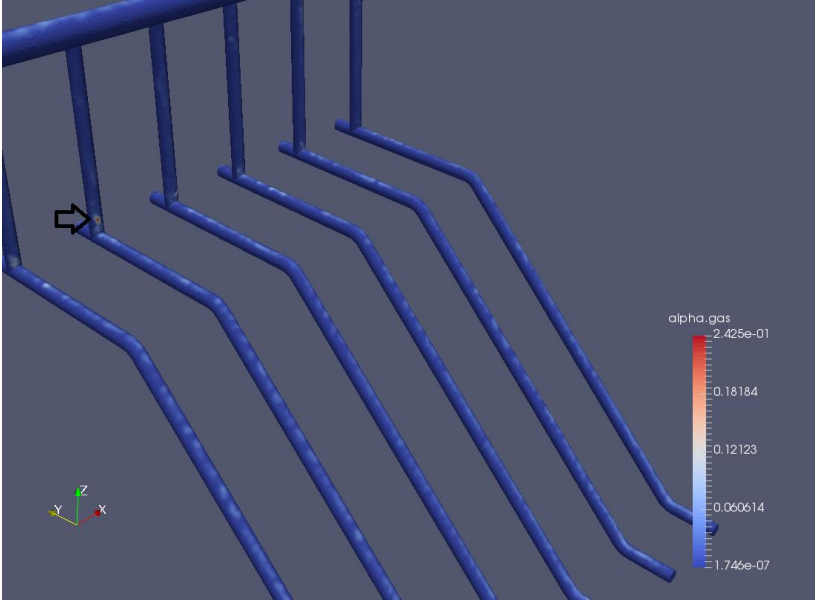
Variable	Modelo 3	Valores para análisis
Q: Volumen de material removido del tubo.		$Q=3.4 \times 10^{-12} \text{ m}^3/50\text{s}=$ $0.63 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ Remoción de material por abrasión. (Para material del tubo sin revestir).

Tabla 5 Serpentina modificada con entrada en Yee invertida – Punto de máxima pérdida de material por erosión.

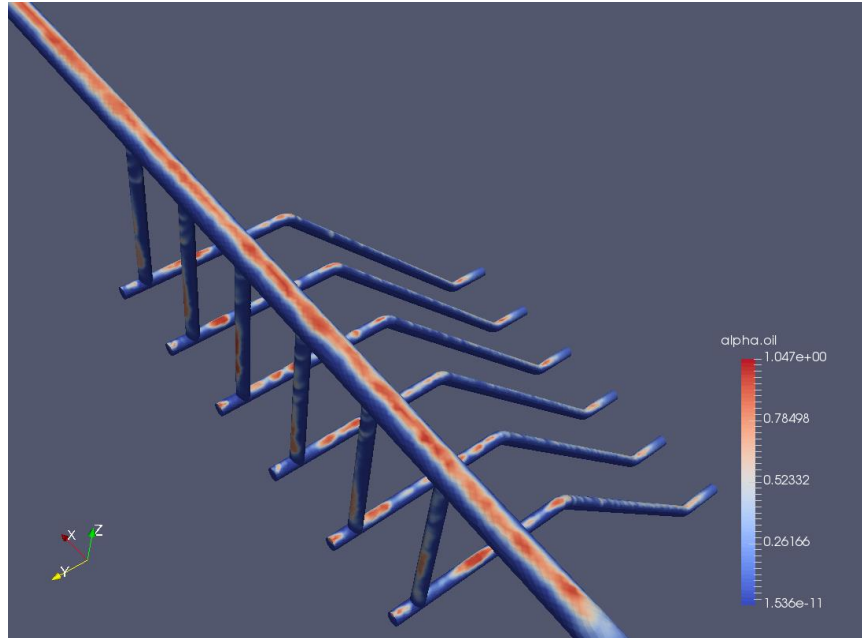
## 5. MODELOS MULTIFÁSICOS

Variable	Modelo 4
$\alpha_{\text{gas}}$ : concentración de fase gas. El color rojo indica las zonas de mayor presencia de la fase gas.	

$\alpha_{oil}$ :

concentración  
de fase crudo.

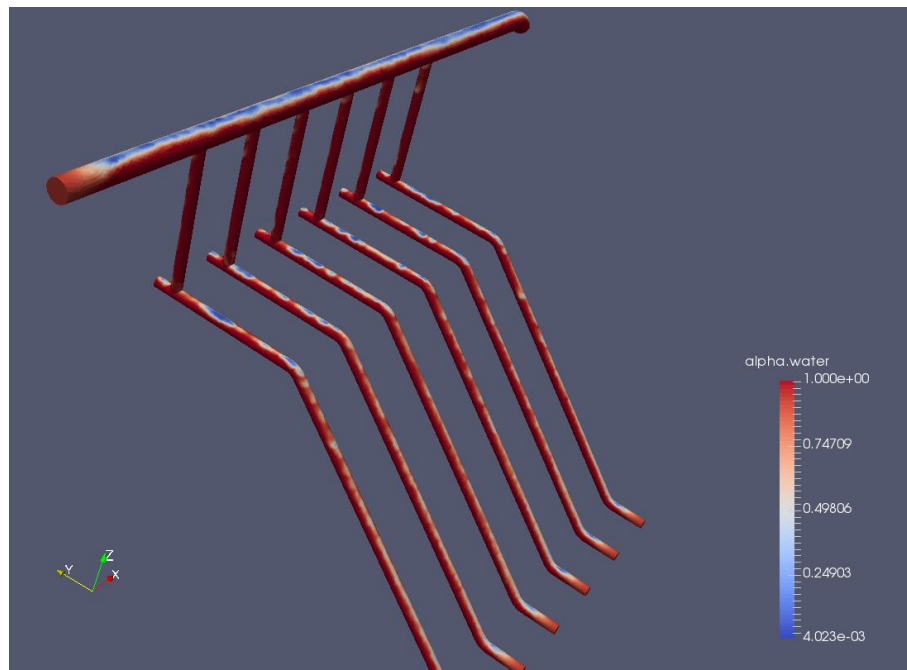
El color rojo  
indica las zonas  
de mayor  
presencia de la  
fase crudo.

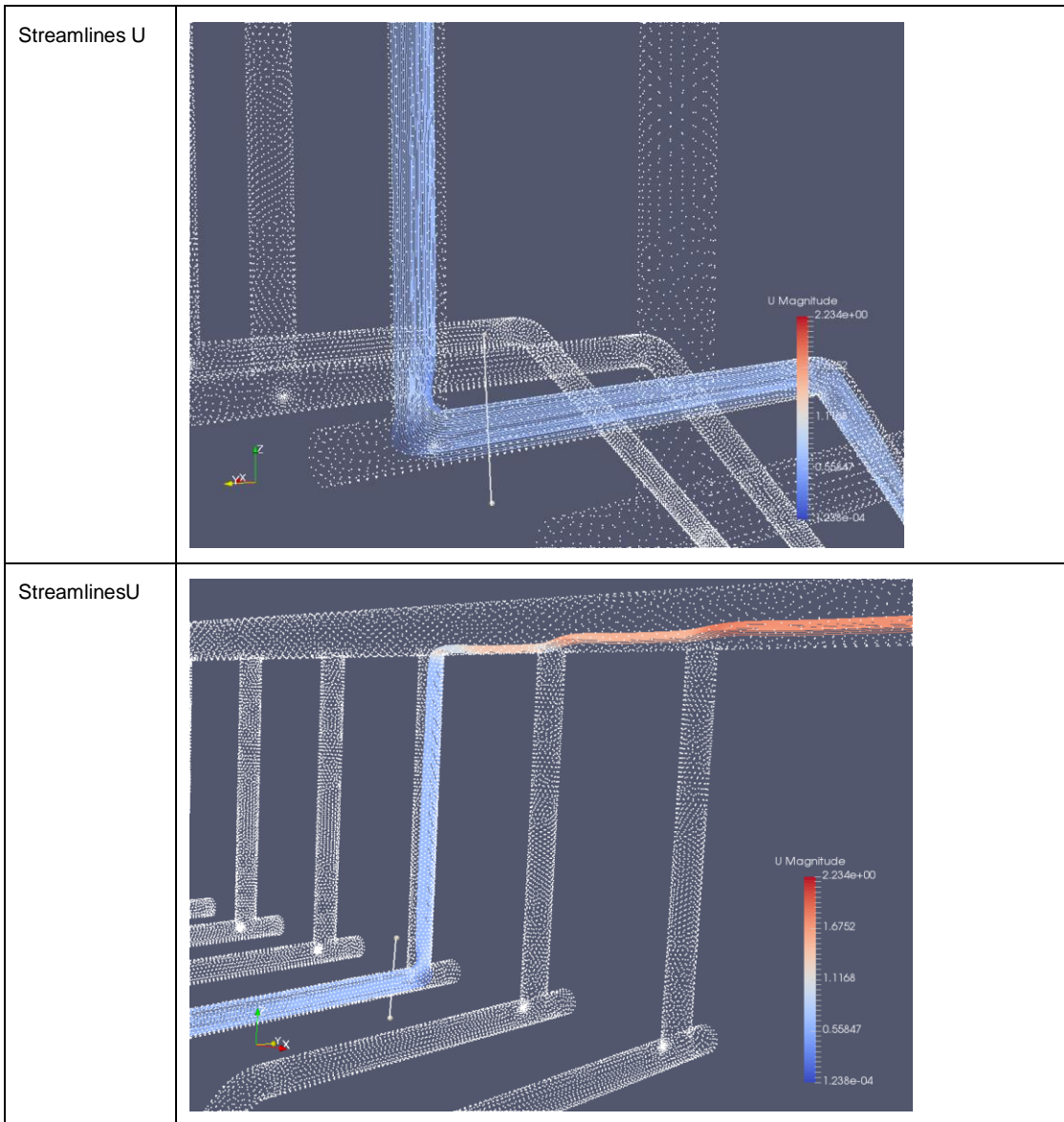


$\alpha_{H2O}$ :

concentración  
de fase agua

El color rojo  
indica las zonas  
de mayor  
presencia de la  
fase agua.





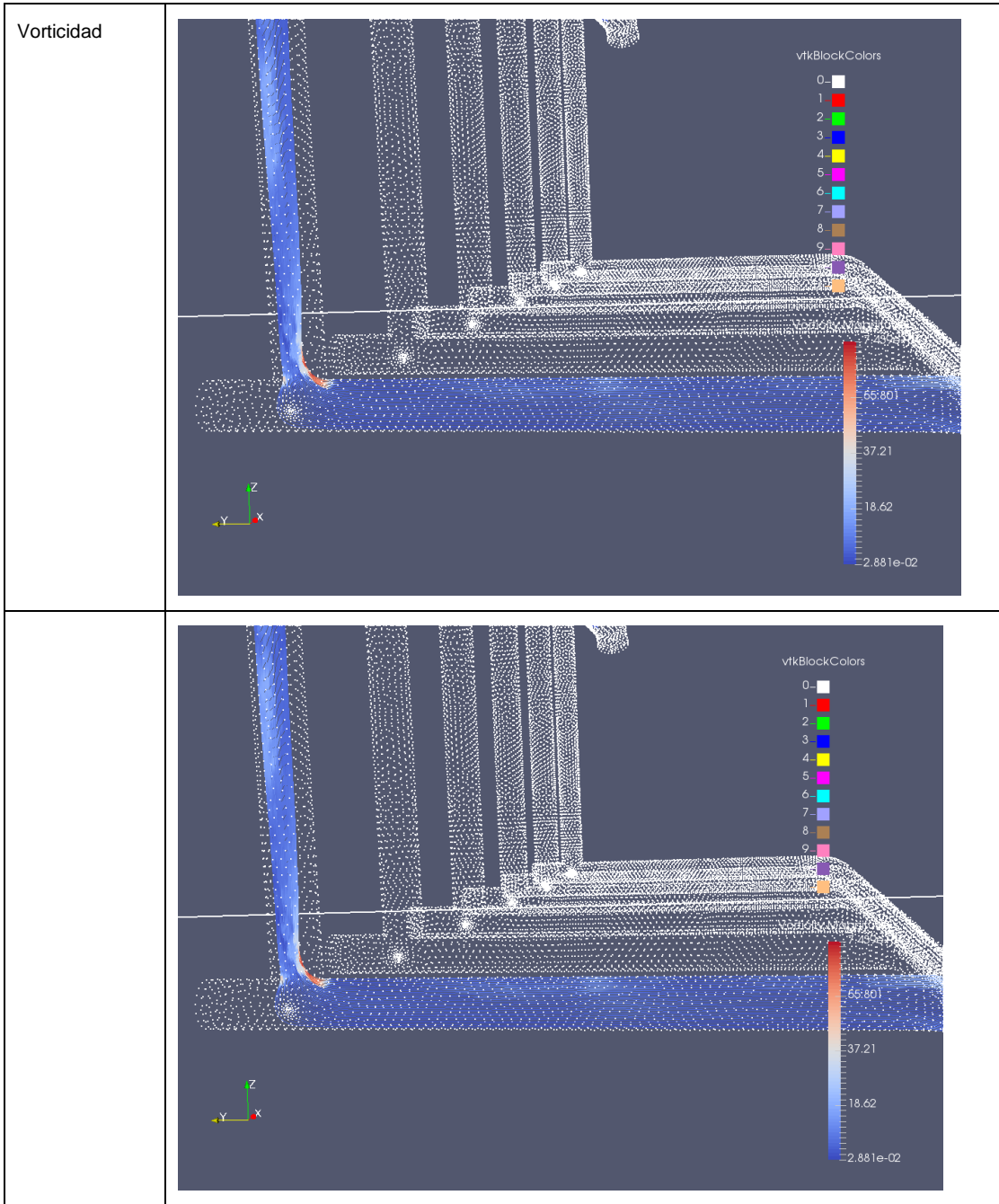
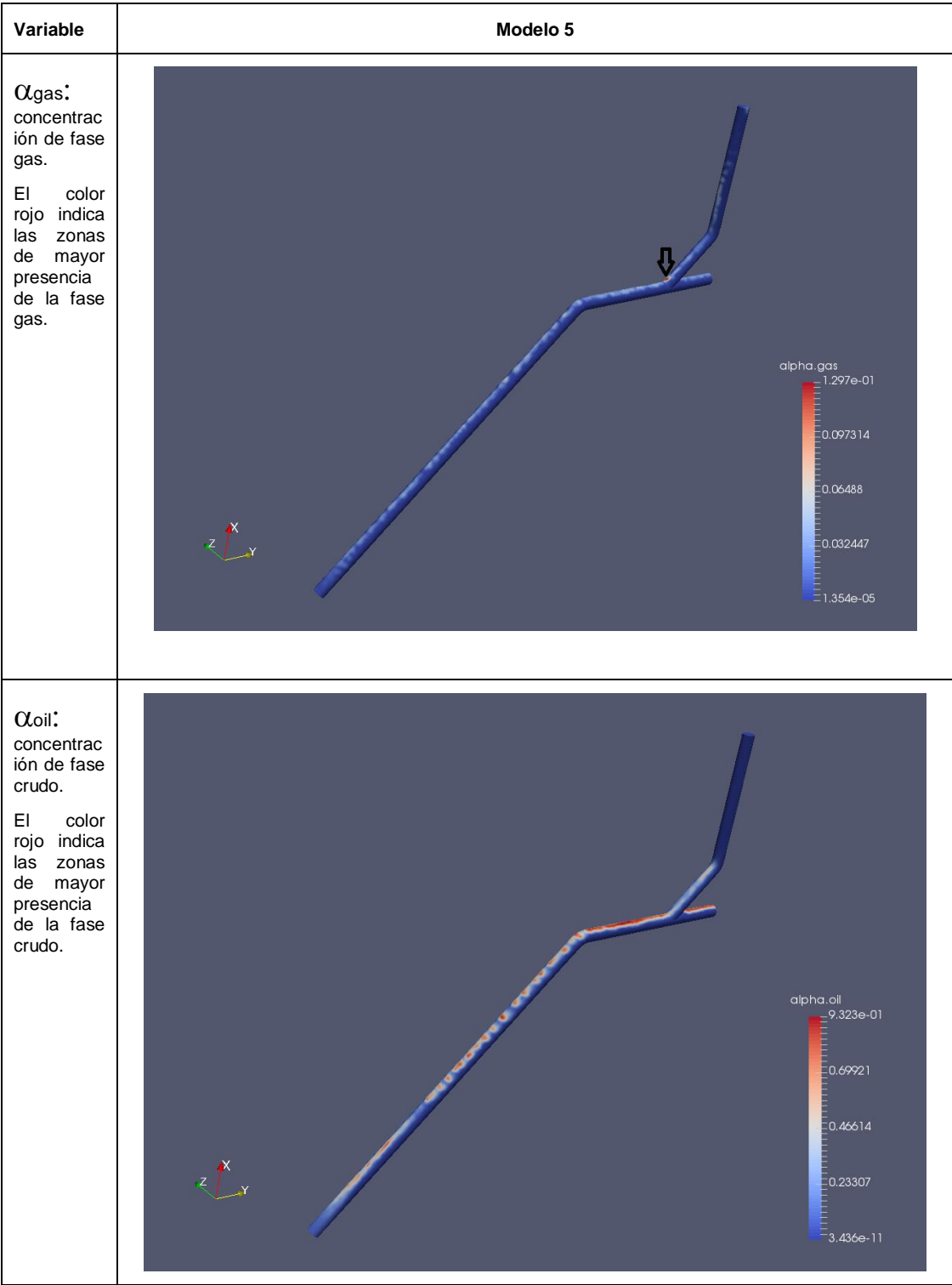
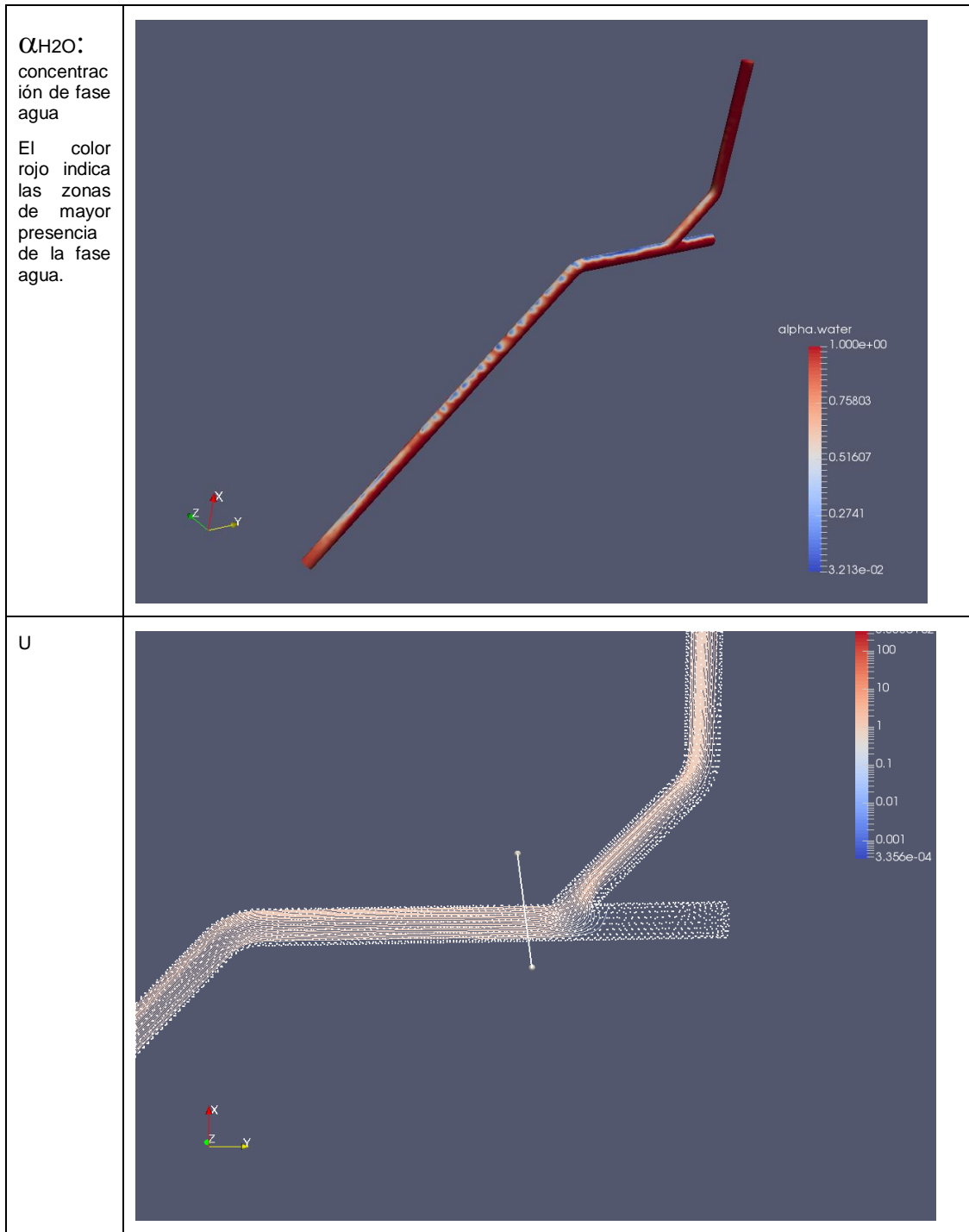


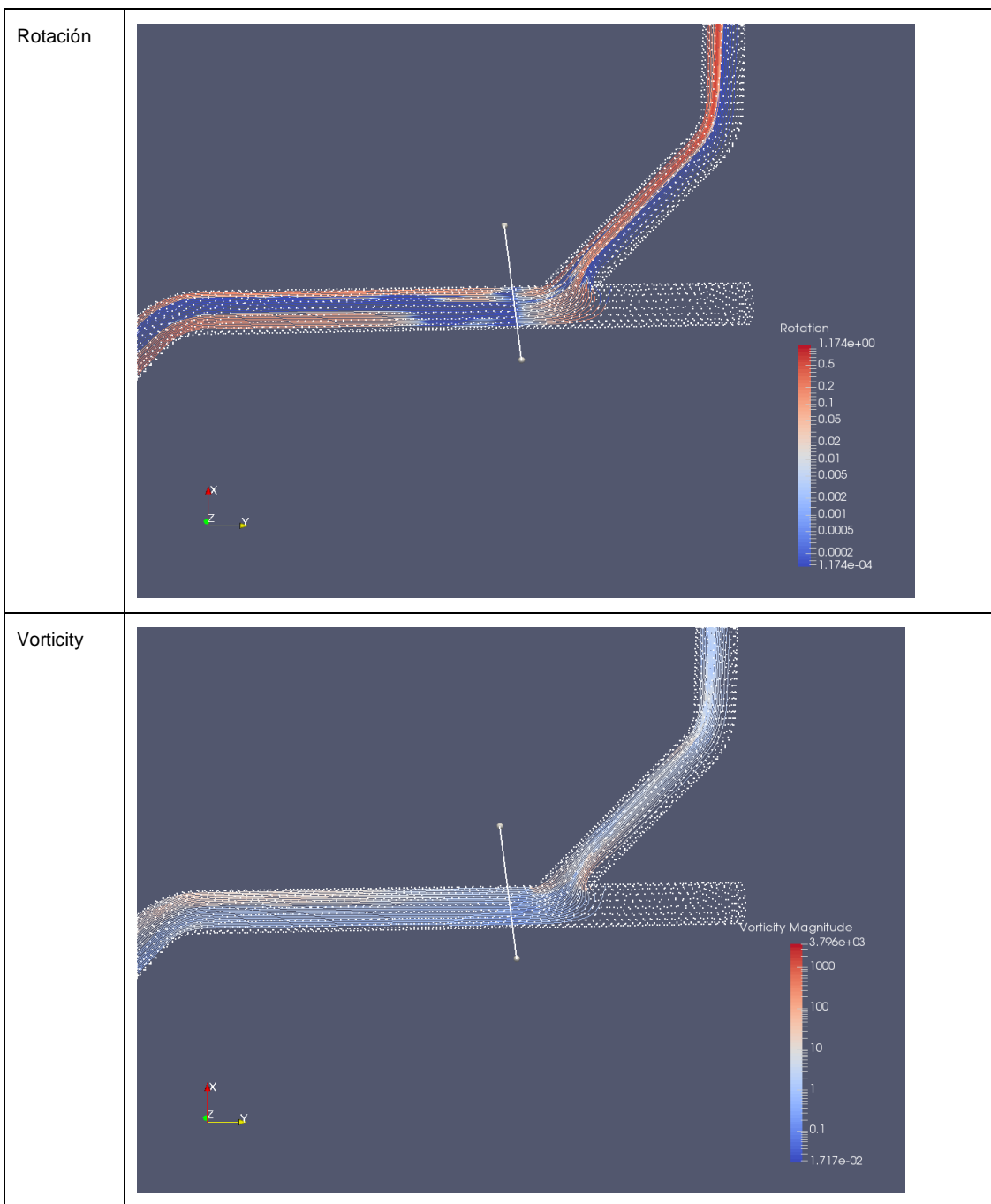
Tabla 6 Serpentina actual – Concentración de fases.











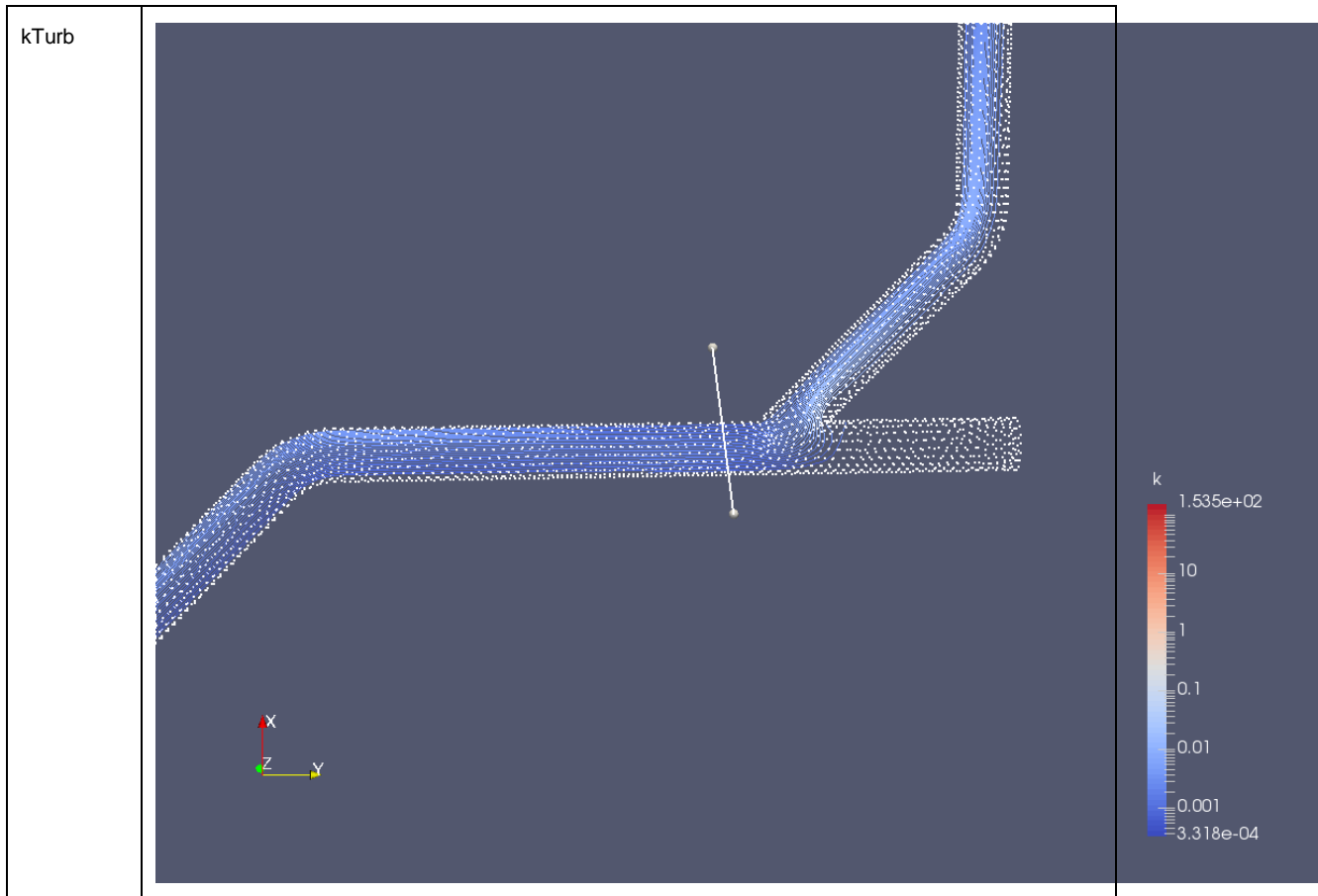
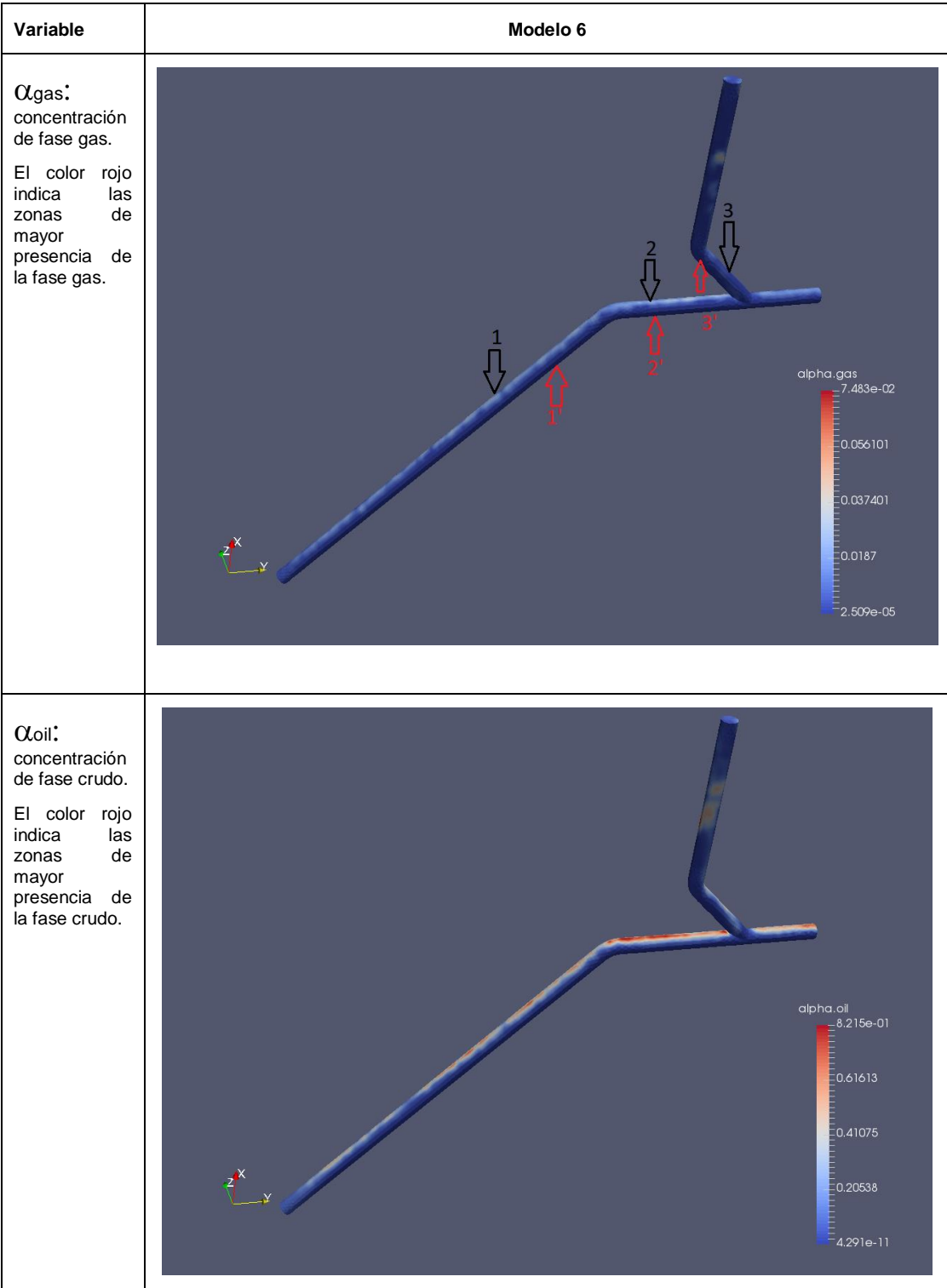


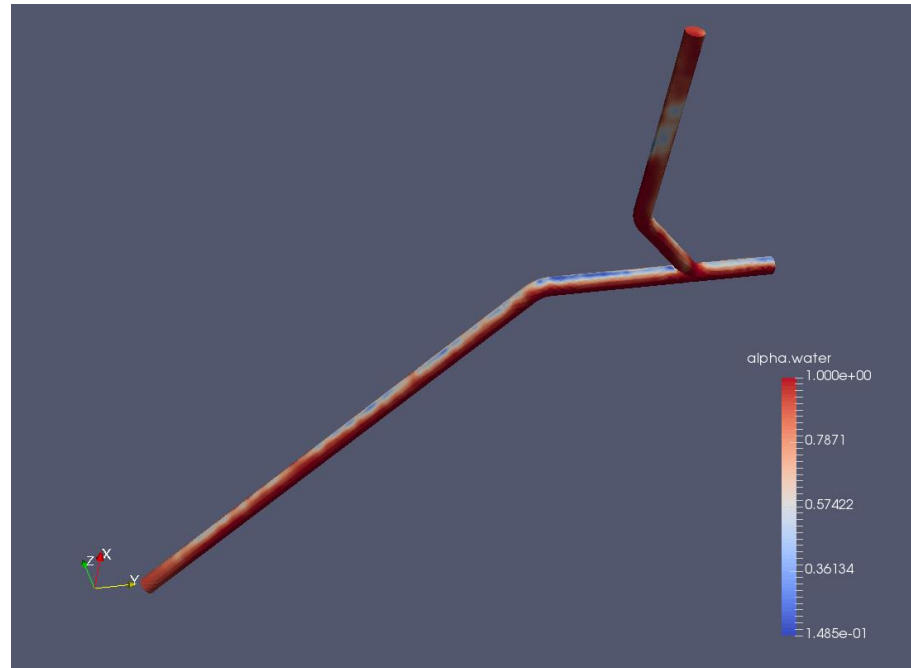
Tabla 7 Serpentina entrada modificada con Yee 45° – Concentración de fases.



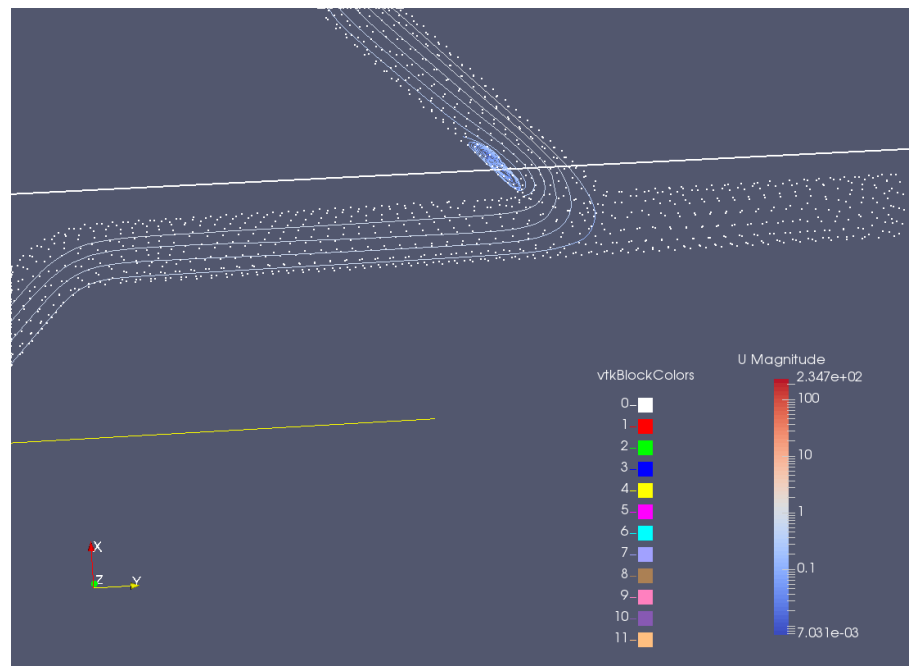
$\alpha_{H_2O}$ :

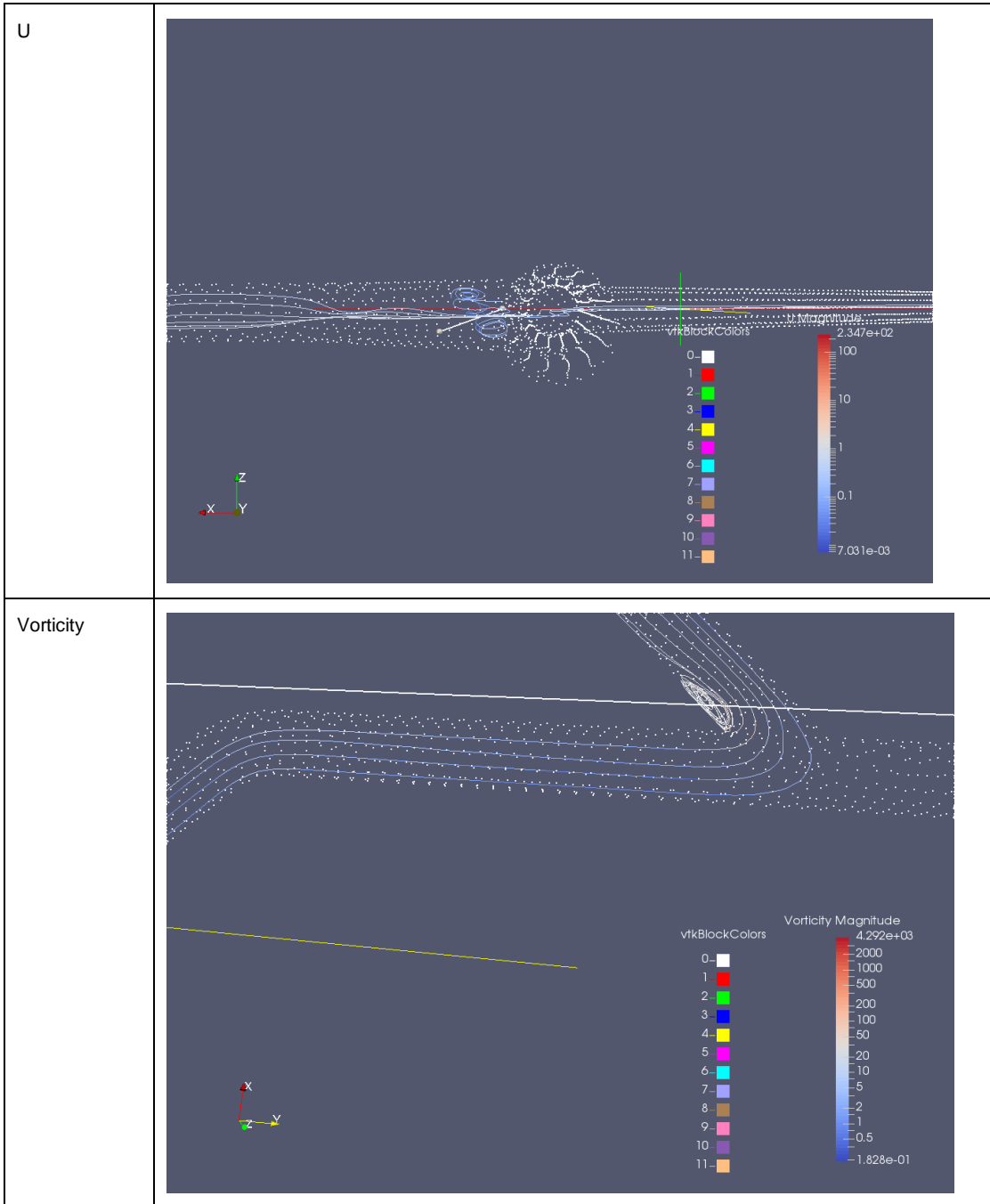
concentración  
de fase agua

El color rojo  
indica las  
zonas de  
mayor  
presencia de  
la fase agua.



U





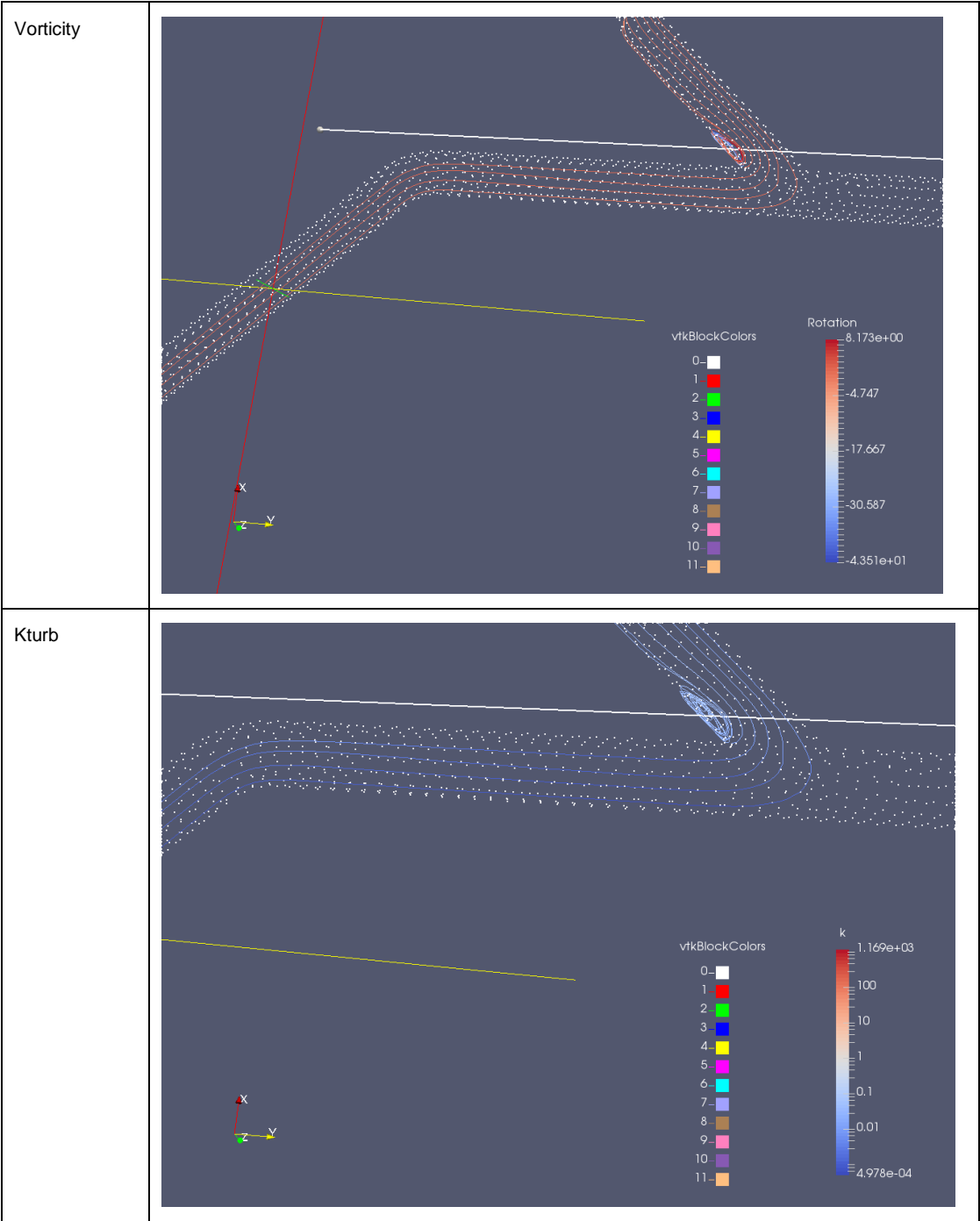


Tabla 8 Serpentina entrada modificada con Yee 45° – Concentración de fases.

## 6. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS UTILIZADOS

### A. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELAMIENTO

El modelamiento en CFD por métodos numéricos (volúmenes finitos) permite resolver ecuaciones diferenciales en geometrías irregulares a través de la discretización (división en geometrías más pequeñas que las aproximen), en dominios que puedan ser resueltos en coordenadas cartesianas que es donde se tiene el mayor número de soluciones analíticas de las ecuaciones antes mencionadas.

Con esta muy somera explicación de lo que se tratan los modelos, se entra a presentar cada una de las ecuaciones involucradas en el análisis que compete a este documento.

El software utilizado para el análisis resuelve las ecuaciones con el método de los volúmenes finitos y permite integrar diferentes conjuntos de estas.

De interés para este trabajo son:

Nombre	Ecuación	Objetivo	Modelo de solución
Continuidad	$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$	Cumplir conservación de masa	
Navier Stokes	$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \rho(\mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{U} + \rho \mathbf{g} - \sum_N \mathbf{f}_P$ <p>Incluye acoplamiento con efecto de las partículas en el flujo.</p>	Resolver las condiciones de flujo potencial, laminar o turbulento.	$\kappa$ - $\epsilon$
Lagrange	$\mathbf{f}_P = \frac{m_P}{\Delta V} \frac{(\mathbf{U}_P)_{t_{out}} - (\mathbf{U}_P)_{t_{in}}}{t_{out} - t_{in}}$ <p>Incluye: Modelo de impacto entre partículas.</p> $U_{P_i}^{n'} = \frac{m_{P_i} U_{P_i}^n + m_{P_j} U_{P_j}^n + \epsilon_P m_{P_j} (U_{P_j}^n - U_{P_i}^n)}{m_{P_i} + m_{P_j}}$ <p>Modelo de impacto con las paredes.</p> $\mathbf{U}_P' = U_P^{n'} \mathbf{n} + U_P^{t'} \mathbf{t}$ <p>Arrastre por interacción fluido partículas. Interacción partículas fluido.</p>	Movimiento de partículas en el flujo.	Lagrange

Finnie	$Q = \frac{mV^2}{p\psi K} \left( \sin 2\alpha - \frac{6}{K} \sin^2 \alpha \right) \quad \text{if } \tan \alpha \leq \frac{K}{6}$ $Q = \frac{mV^2}{p\psi K} \left( \frac{K \cos^2 \alpha}{6} \right) \quad \text{if } \tan \alpha > \frac{K}{6}$	Q: remoción de material del tubo m3	Acople
--------	---	-------------------------------------	--------

Tabla 9 Ecuaciones diferenciales del modelo

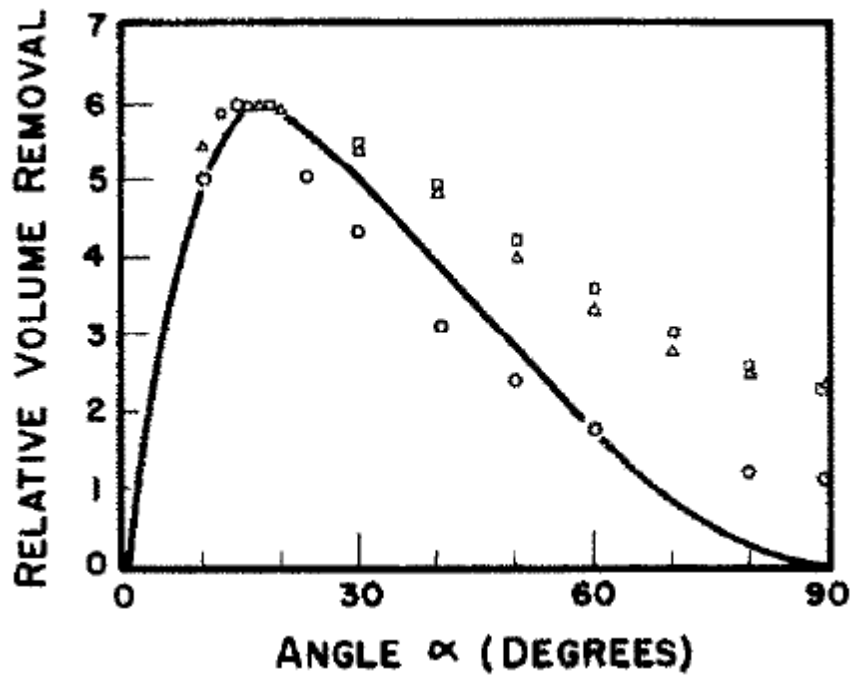


Figura 6 Ref. 8 c Predicción del volumen removido por ecuación de Finnie respecto al ángulo de impacto para un solo grano. Se grafican resultados experimentales para (4 copper, SAE 1020 steel, aluminium).

Los modelos utilizados para el análisis se resumen entonces así:

Geometría	3D Flujo Turbulento + Modelo de partículas + Erosión	3D Modelo multifásico en flujo turbulento
Serpentina	Modelo 1	Modelo 4
Modificación Yee 45° en subida de bayoneta	Modelo 2	Modelo 5
Modificación Yee 45° invertida en subida de bayoneta	Modelo 3	Modelo 6

Tabla 10 Resumen de los modelos etapa I

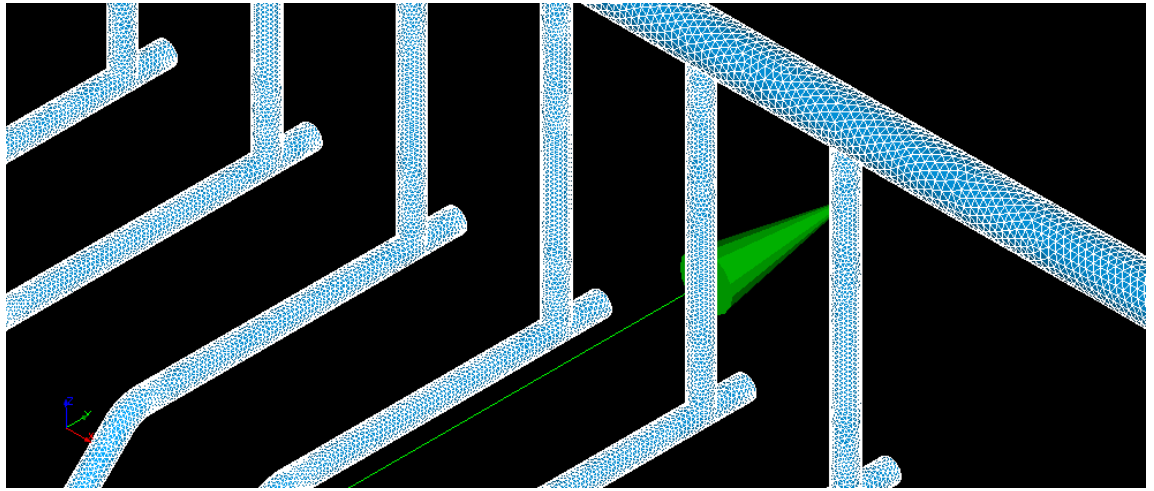


Este conjunto de modelos fue necesario para resolver interrogantes respecto a la integridad de la serpentina frente a la erosión.

El tipo de análisis realizado es el de flujo completamente desarrollado, de ahí que fueron necesarios tiempos de modelamiento lo más largos posibles de manera que permitieran predecir el comportamiento durante la operación normal.

#### i. Topología

La topología o dominio geométrico para el análisis consistió en construir modelos tridimensionales que simulan la geometría y son discretizados mediante volúmenes finitos. Para los modelos utilizados se trabajó con discretizaciones como la mostrada en las gráficas siguientes de 344.602 elementos.



Discretización Geometría 3D

**Mesh Information**

Base Info | Element Info | Additional Info | Quality Info

**Name:** Mesh\_2

**Object:** Mesh

**Nodes:** 66924

**Elements:**

	Total	Linear	Quadratic	Bi-Quadratic
	344602	344602	0	0

**0D:** 0

**Balls:** 0

**1D (edges):**

	Total	Linear	Quadratic
	7772	7772	0

**2D (faces):**

	Total	Linear	Quadratic	Bi-Quadratic
	93092	93092	0	0

Triangles: 93092    93092    0    0

Quadrangles: 0    0    0    0

Polygons: 0    0    0    0

**3D (volumes):**

	Total	Linear	Quadratic	Bi-Quadratic
	243738	243738	0	0

Tetrahedrons: 243738    243738    0

Hexahedrons: 0    0    0    0

Pyramids: 0    0    0

Prisms: 0    0    0

Hexagonal Prisms: 0

Polyhedrons: 0

Ok    Dump    Help

Discretización

## ii. Condiciones iniciales y condiciones de frontera.

Para la solución de las ecuaciones de Navier Stokes el modelo requiere de dos tipos de condiciones las iniciales y las condicones de frontera.

Dichas condiciones corresponden a las tablas siguientes de este numeral.

### 1. Densidad de la mezcla

	MIN	NORM	MAX	
$\rho_{MEAN}$	61	62	61	lb/ft3
$\rho_{MEAN}$	987	988	985	kg/m3

## 2. Flujo másico

	MIN	NORM	MAX	
$G_{H_2O}$	75,59	6670,00	17730,00	lb/H
$G_{OIL}$	11,89	661,20	1377,00	lb/H
$G_{GAS}$	0,1359	12,4000	50,8500	lb/H
$G_{H_2O}$	0,00954	0,84217	2,23864	kg/s
$G_{OIL}$	0,00150	0,08348	0,17386	kg/s
$G_{GAS}$	0,00002	0,00157	0,00642	kg/s
$G_{total}$	<b>0,01106</b>	<b>0,92722</b>	<b>2,41892</b>	<b>kg/s</b>

## 3. Densidad de la fase

	MIN	NORM	MAX	
$\rho_{H_2O}$	63	62	62	lb/ft3
$\rho_{OIL}$	55	55	55	lb/ft3
$\rho_{GAS}$	0,389	0,420	0,486	lb/ft3
$\rho_{H_2O}$	1004	1000	996	kg/m3
$\rho_{OIL}$	890	885	881	kg/m3
$\rho_{GAS}$	6,24	6,74	7,80	kg/m3

## 4. Velocidad

Asumimos cond. iniciales de Velocidad promedio igual para las fases a la entrada de la serpentina.

MIN	NORM	MAX	
0,0029	0,2451	0,6855	
0,0029	0,2451	0,6855	
0,0029	0,2451	0,6855	
<b>0,0029</b>	<b>0,2451</b>	<b>0,6855</b>	<b>m/s</b>

5. Sección del tubo                      Diam 3" SCH STD

Diametro interno =                      0,07792 m

Area sección =                      0,00476857 m<sup>2</sup>

6. Flujo másico de sólidos

MIN	NORM	MAX	
9,75871E-06	0,00081817	0,00228812	50 micrones
8,64343E-06	0,00072466	0,00202662	112 micrones
9,47989E-06	0,00079479	0,00222274	200 micrones
<b>0,0000279</b>	<b>0,0023376</b>	<b>0,0065375</b>	<b>kg/s</b>

Dato de entrada =                      2000 ppm

ó                      2 g/L

ó                      2 Kg/m<sup>3</sup>

7. Calidad volumétrica

	MIN	NORM	MAX
$\beta_{H_2O}$	0,6817349	0,7205020	0,6876997
$\beta_{OIL}$	0,1210496	0,0806689	0,0603674
$\beta_{J_{GAS}}$	0,1972155	0,1988292	0,2519328

8. Viscosidad dinámica

	MIN	NORM	MAX	
$\mu_{H_2O}$	0,0007599	0,0006795	0,0006117	pa.s
$\mu_{OIL}$	0,1802000	0,1081000	0,0707000	pa.s
$\mu_{GAS}$	0,0000117	0,0000119	0,0000121	pa.s

**Cálculo de condiciones de Mezcla de Fluidos según fórmula de REFUTAS**

**Agua**

Temperatura	100 F	100 F
Std ideal liq Flow Min	5,1 Bpd	
Std ideal liq Flow	450 Bpd	
Std ideal liq Flow Max	1196 Bpd	
Mass Density	997,8 Kg/m3	
GE	1	
Liq Mass Density @std Cond	70 API_60	
Viscosity	0,6795 cP	0,68103232 cSt
VBN		-2,60860856
xMin		0,85761604
xMed		0,90536002
xMax		0,92437809

**Mezcla**

Temperatura	100,0 F	
Std ideal liq Flow Min	6	
Std ideal liq Flow	500 Bpd	
Std ideal liq Flow Max	1300 Bpd	
Mass Density	991,8 Kg/m3	
GE	0,991843	
Liq Mass Density @std Cond	11,1637079 API_60	
VBNm	2,55133681	
Viscosity	0,951 cSt	0,94315 cP

**Crudo**

Temperatura	100 F	100 F
Std ideal liq Flow Min	0,9 Bpd	
Std ideal liq Flow	50 Bpd	
Std ideal liq Flow Max	104 Bpd	
Mass Density	938,7 Kg/m3	
GE	0,94	
Liq Mass Density @std Cond	44 API_60	
Viscosity	108,1 cP	115,161716 cSt
VBN		33,6310457
xMin		0,14238396
xMed		0,09463998
xMax		0,07562191

**iii. Solución.**

- Modelo  $\kappa-\varepsilon$ .
- Modelo de partículas MPPICFoam.
- Modelo de erosión Finnie.
- Tiempo total de simulación del modelo de erosión 100 segundos.

**iv. Post procesamiento.**

Esta etapa, consistente en la obtención de resultados de los modelos, permite de manera gráfica y numérica revisar condiciones de las variables del flujo estudiado.

El trabajo de post procesamiento permite obtener una gran variedad de resultados ya que se pueden obtener resultados, de cada una de las variables de las ecuaciones para cada uno de los puntos de interpolación en los volúmenes finitos. Es también posible encontrar variables derivadas y una multitud de vistas gráficas.

En este modelo se analizaron de manera gráfica y cuantitativa variables consideradas por el diseñador como relevantes para el análisis, a saber:

Variable	Tipos de post procesamiento utilizados
Velocidad	Diagramas de magnitud de en la geometría estudiada (Cortes para observar superficies medias, líneas de flujo).

Presión	Diagramas de magnitud de en la geometría estudiada (Cortes para observar superficies medias).
Coeficientes turbulentos $\kappa-\varepsilon$ .	Diagramas de magnitud de en la geometría estudiada (Cortes para estudiar superficies medias).
Vorticidad	Líneas de flujo.
Q Perdida de material del tubo en volumen.	Cantidad escalar.
Diámetro de partículas	Animación del movimiento

Tabla 11 Resumen de post procesamiento

Con esa información se realizaron los análisis y las conclusiones que de allí se desprendieron.

## 7. LÍMITES DE LA SIMULACIÓN

Los resultados de los modelos de erosión predicen bien los lugares de máxima pérdida de material por lo que son adecuados de manera comparativa, los datos numéricos deben tenerse en cuenta según lo indicado abajo.

Los resultados numéricos de los modelos de erosión aplican al tubo sin revestimiento, por lo tanto, se deben tener en cuenta de manera comparativa y no directa.

El modelo de erosión de Finnie está limitado en cuanto a impactos a que no predice pérdidas por impacto a  $90^\circ$  y respecto a los datos numéricos de la pérdida de material. Respecto a esto último Finnie (Ref. 8c) recomienda calibrar resultados contra datos de medición de laboratorio (Fuera de este alcance).

La densidad de los sólidos fue estimada por no tener valores suministrados por el cliente. Se estimó la densidad de arena silícea obtenida de la literatura.

El modelo de erosión se realizó con las propiedades de la mezcla crudo agua como fluido principal y el modelo de partículas para los sólidos presentes. Se realizó de manera complementaria el modelo multifásico agua-gas-crudo para obtener resultados complementarios.

## 8. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

- Manuales Openfoam
- Fundamentals of Multiphase Flows, Christopher E. Brennen, California Institute of Technology, Cambridge University Press 2005, ISBN 0521 848040.
- Iain Finnie. Erosion of surfaces by solid particles. Wear, (3):87-103, 1960.
- Planos:  
09-07-SS-401-1 CIRA INFANTAS

## 9. SOFTWARE

OPENFOAM R

## 10. DATOS DE ENTRADA

La información de entrada recibida por Prodisys de parte de OXY para el desarrollo de este proyecto es la siguiente.

### DATOS DE ENTRADA

Caudal mínimo: 6 BPD en un pozo @ 110 psig

Caudal Máximo: 1,300 BPD en un pozo @ 120

Caudal de trabajo: 500 BPD en un pozo promedio @ 140 psig

		MIN	NORM	MAX
	Temperatura, °F	90,00	100	110
	Presión, psig	110,00	120	140
Agua	BWPD	5,10	450	1196
	lb/h	75,59	6670	17730
	%w	86,30	90,8	92,5
	$\rho$ , lb/ft <sup>3</sup>	62,56	62,3	62,04
	$\mu$ , cP	0,7599	0,6795	0,6117
Crudo	BOPD	0,90	50	104
	lb/h	11,89	661,2	1377
	%w	13,60	9,00%	7,20%
	$\rho$ , lb/ft <sup>3</sup>	55,42	55,16	54,89
	$\mu$ , cP	180,20	108,1	70,7
Gas	SCFD	90,00	7500	28080
	lb/h	0,1359	12,4	50,85
	%w	0,16	0,17%	0,27
	$\rho$ , lb/ft <sup>3</sup>	0,3888	0,4197	0,4857
	$\mu$ , cP	0,01172	0,0119	0,0121
	lb/h	<b>87,62</b>	<b>7343,6</b>	<b>19157,9</b>

Granulometría y porcentaje de sólidos:

Los solidos en el caso mas critico:

2000 PPM de sólidos en el fluido de producción

35% de los solidos estan entre 25-75 micrones	Media	50 micrones
31% de los sólidos estan entre 75-150 micrones	Media	112 micrones
34% de los sólidos son mayores a 150 micrones	Media	200 micrones

Temperatura de trabajo: ambiente, 35 C.

Plano: 09-07-SS-401-1 CIRA INFANTAS

## **11. ANEXOS**

Se anexan a este informe:

- Planos de Manifolds modificados según recomendaciones.
- Presentación de resultados Powerpoint etapa I.
- Gráficas de post procesamiento.
- Vídeos de modelos.