

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**ESTUDIO NUMÉRICO DE FLUJO BIFÁSICO EN PATRÓN DE  
FLUJO ANULAR EN TUBERÍAS**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Verde R., Jesús A.  
para optar el Título  
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**ESTUDIO NUMÉRICO DE FLUJO BIFÁSICO EN PATRÓN DE  
FLUJO ANULAR EN TUBERÍAS**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Julio Segura.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Verde R., Jesús A.  
para optar el Título  
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009



Caracas, 29 de junio de 2.009

## ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller:

**JESUS VERDE**

**Titulado:**

**“ESTUDIO NUMERICO DE FLUJO BIFASICO EN PATRON DE FLUJO ANULAR EN TUBERIAS”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Titulo de Ingeniero Mecánico.

  
**Prof. Ivan Saavedra**  
Jurado



  
**Prof. Rodolfo Berrios**  
Jurado

  
**Prof. Julio Segura**  
Tutor

Dedicatoria:

A mi buen Dios y Señor que me animó a seguir a pesar de las dificultades y me enseñó a  
ver las dificultades como pruebas que superar.

A mis padres y familiares que me apoyaron y sustentaron.

A mis profesores y compañeros que ayudaron a formar la actitud de ingeniero.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor quiere expresar su agradecimiento por la colaboración brindada para la elaboración de este trabajo a:

La Universidad Central de Venezuela, por formarme como ingeniero y facilitar las instalaciones, a través de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para el desarrollo de este trabajo.

Profesor Julio Segura, por proponer el tema a desarrollar en este trabajo y por su dedicación en la tutoría del mismo.

Profesor Andrés Rosales, Profesor Iván Saavedra e Ingeniero Carlos Norha, por la bibliografía prestada.

Profesor Miguel Baritto y Profesor Johan Bracamonte por el apoyo y colaboración prestada.

**Verde R., Jesús A.**

## **ESTUDIO NUMÉRICO DE FLUJO BIFÁSICO EN PATRÓN DE FLUJO ANULAR EN TUBERÍAS**

**Tutor Académico: Julio Segura. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009, n° Pág. 57**

Flujo bifásico, patrón de flujo anular, dinámica de fluidos computacional, método de volúmenes finitos.

El trabajo realizado presenta un estudio numérico en tuberías de sección circular del flujo bifásico en patrón de flujo anular. El mismo es realizado en un modelo homogéneo mediante la aplicación de los software ANSYS ® Workbench <sup>TM</sup> para la creación de la geometría y la malla de cómputo respectiva y ANSYS ® CFX <sup>TM</sup> para simular numéricamente el fenómeno fluido-dinámico mediante el método de Volúmenes Finitos.

El objetivo general fue estudiar, mediante simulaciones computacionales, el comportamiento fluido-dinámico del flujo bifásico gas-líquido y líquido-líquido en patrón de flujo anular, de dos fluidos inmiscibles en regímenes laminar y turbulento, en tramos rectos de tubería lisa orientados vertical y horizontalmente. Poniendo el énfasis en la conformación de la interfaz.

Adicionalmente se realizó un estudio de sensibilidad de malla de cómputo, con el objeto de optimizar la creación de la misma y así la simulación.

Los resultados obtenidos se presentaron en visualizaciones, graficas y tablas, donde se observaron cualitativamente y cuantitativamente los mismos. Permitiendo tanto es estudio del fenómeno como su transición a otros patrones de flujo.

Concluyendo que el software ANSYS ® Workbench <sup>TM</sup> no es adecuado para la creación de las mallas para las simulaciones, debido a que es inestable en el sistema operativo Linux, mientras que el software ANSYS ® CFX <sup>TM</sup> sí es adecuado para simular el fenómeno de flujo bifásico, permitiendo la visualización del fenómeno y su transición a otros patrones de flujo. También se hace necesario un estudio previo que permita establecer el software más adecuado para la creación de la malla de cómputo y la forma más adecuada de la misma para el estudio del fenómeno.

**Verde R., Jesús A.**

## **NUMERICAL STUDY OF THE TWO-PHASED FLUX PATTERN OF THE ANNULAR FLUX IN PIPEWORK**

**Academic Advisor: Julio Segura. Faculty of Engineering. School of Mechanical  
Engineering. 2009, n° Pag. 57**

Two-phased flux, pattern of annular flux, dynamic of computational fluids, methodology of finite volumes.

The field work carried out presents a numerical study on the circular section of pipework pertaining to the two-phased flux pattern of annular flux. The study has been completed in a homogeneous model through the use of the following software; ANSYS ® Workbench <sup>TM</sup> for the creation of the geometrical aspect of the virtual picture as well as its respective computational net and ANSYS ® CFX <sup>TM</sup> to numerically simulate the fluid-dynamic phenomenon through the methodology of Finite Volumes.

The main objective was to study, through computed simulations, the fluid-dynamic behavior of gas-liquid and liquid-liquid two-phased flux in annular flux pattern, of two immiscible liquids en laminar and turbulent flows, in straight sections of smooth pipe which were vertically and horizontally oriented. Putting emphasis in the conformation of the interface.

Adittonally, a study of the sensitivity of the computational net was made, with the intention of optimizing the creation of the same and thus the stimulation.

The results obtained have been presented in the form of visualizations, graphs and tables, whereupon the same were observed qualitatively and quantitatively. Allowing the study of the phenomenon as well as its transition into other flux patterns.

Concluding that the ANSYS ® Workbench <sup>TM</sup> software is not adequate for the creation of the computational nets for the simulations, due to the fact that it is unstable in the Linux operating system, whereas the ANSYS ® CFX <sup>TM</sup> software is indeed adequate for the simulation of the two-phased flux phenomenon, permitting the visualization of the phenomenon and its transition into other flux patterns. Also, it becomes necessary to make a previous study which will allow the establishment of the most suitable software for the creation of the computational net and the most suitable form of the same for the study of the phenomenon.

# CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>CAPÍTULO I: MARCOTEÓRICO PARTE I.....</b>                                 | <b>3</b>  |
| FLUJO BIFÁSICO Y PATRÓN DE FLUJO ANULAR .....                                | 3         |
| <i>Flujo bifásico.....</i>   | 3         |
| <i>Patrones de flujo bifásico en tuberías.....</i>                           | 4         |
| <i>Flujo anular.....</i>   | 5         |
| <b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO PARTE II .....</b>                             | <b>9</b>  |
| GENERALIDADES DEL MODELO MATEMÁTICO Y MÉTODO DE VOLÚMENES FINITO .....       | 9         |
| <i>Modelo matemático .....</i>   | 9         |
| <i>Método de Volúmenes Finitos .....</i>                                     | 11        |
| <b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....</b>                                       | <b>14</b> |
| <i>Creación del modelo y su respectiva malla en ANSYS® Workbench™: .....</i> | 14        |
| <i>Simulación en ANSYS® CFX™: .....</i>                                      | 15        |
| <i>Características del equipo PC: .....</i>                                  | 16        |
| <i>Características de los programas usados: .....</i>                        | 16        |
| <i>Simulaciones en general: .....</i>  | 16        |
| <b>CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>                              | <b>18</b> |
| RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.....  | 18        |
| <i>Simulaciones de comparación:.....</i>                                     | 18        |
| <i>Simulaciones para el estudio de sensibilidad de malla: .....</i>          | 26        |
| <i>Simulaciones de ensayo:.....</i>  | 27        |
| ANÁLISIS DE RESULTADOS.....  | 34        |
| <i>Simulaciones de comparación:.....</i>                                     | 34        |
| <i>Simulaciones para el análisis de sensibilidad de malla:.....</i>          | 35        |
| <i>Simulaciones de ensayos: .....</i>  | 36        |
| <b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>                       | <b>37</b> |
| CONCLUSIONES .....   | 37        |
| RECOMENDACIONES.....   | 39        |



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| DESCRIPCIÓN ESQUEMÁTICA DE LA CONFIGURACIÓN DE FLUJO ANULAR. ADAPTADO DE BRAUNER, 2003.....  | 6  |
| MAPA DESARROLLADO POR BAKER EN 1954 PARA PATRONES DE FLUJO BIFÁSICO GAS – LÍQUIDO EN TUBERÍA HORIZONTAL (ADAPTADO DE SHOHAM 2006).....               | 7  |
| MAPA DESARROLLADO POR HEWITT Y ROBERTS EN 1969 PARA PATRONES DE FLUJO BIFÁSICO GAS – LÍQUIDO EN TUBERÍAS VERTICALES. (ADAPTADO DE BRENNEN, 2003) ... | 7  |
| MALLAS HÍBRIDAS GENERADAS CON ANSYS® WORKBENCH™ .....  | 15 |
| MALLA HÍBRIDA ESPACIADA EN SU SECCIÓN TRANSVERSAL DE FORMA GEOMÉTRICA. ....  | 18 |
| VISUALIZACIÓN DE LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL GAS EN EL PLANO YZ A LA ENTRADA DE LA TUBERÍA DE LA SIMULACIÓN DE COMPARACIÓN 01 .....                 | 20 |
| VISUALIZACIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DEL GAS EN EL PLANO YZ A LA ENTRADA DE LA TUBERÍA DE LA SIMULACIÓN DE COMPARACIÓN 01 .....                  | 21 |
| VISUALIZACIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DEL GAS EN EL PLANO YZ A LA SALIDA DE LA TUBERÍA DE LA SIMULACIÓN DE COMPARACIÓN 01.....                    | 21 |
| VISUALIZACIÓN DE LA GRÁFICA DE PRESIÓN EN EL EJE DE LA TUBERÍA DE LA SIMULACIÓN DE COMPARACIÓN 01 .....  | 22 |
| VISUALIZACIÓN DE LA GRÁFICA DE PRESIÓN EN EL EJE DE LA TUBERÍA DE LA SIMULACIÓN DE COMPARACIÓN 02.....   | 23 |
| VISUALIZACIÓN DE LA GRÁFICA DE PRESIÓN EN EL EJE DE LA TUBERÍA DE LA SIMULACIÓN DE COMPARACIÓN 03.....   | 25 |
| VISUALIZACIÓN DEL CAMBIO DE PATRÓN DE FLUJO ANULAR A ESTRATIFICADO DEL ENSAYO DE MUESTRA 03 - 02.....  | 32 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

### **Símbolos latinos:**

A: área

$C_D$ : coeficiente de arrastre

g: aceleración de gravedad

M: fuerzas interfaciales

n: vector normal a la inteface

r: fracción volumétrica

t: tiempo

u: vector velocidad

### **Símbolos griegos:**

$\delta$ : función delta de la interfase

$\Gamma$ : coeficiente de difusión de la ecuación general de conservación

$\rho$ : densidad

$\sigma$ : coeficiente de tensión superficial

### **Subíndices:**

g: denota la fase gaseosa

l: denota la fase líquida

p: proyectado

## INTRODUCCIÓN

En la Unidad Docente y de Investigación de Transferencia de Calor de las Escuelas de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Química, se desarrolla una línea de investigación con el propósito de formular modelos matemáticos y resolverlos con el método de volúmenes finitos para aplicarlos en simulaciones computacionales del fenómeno de convección bifásica.

En este se estudia el flujo bifásico en patrón de flujo anular, que consiste en el transporte de dos fluidos inmiscibles, uno por el núcleo y otro por el anulo (rodeando el núcleo). Lo que se estudia es el comportamiento de este fenómeno a nivel numérico, mediante simulaciones computacionales de líquido – líquido y gas – líquido, en tubería vertical y tubería horizontal, bajo régimen laminar o turbulento.

El trabajo consiste en realizar una serie de simulaciones computacionales del flujo de dos fluidos newtonianos inmiscibles (flujo bifásico gas-líquido y líquido-líquido) de diferentes viscosidades en patrón de flujo anular.

Se tiene como objetivo general el estudio, mediante simulaciones computacionales, del comportamiento fluido-dinámico del flujo bifásico gas-líquido y líquido-líquido en patrón de flujo anular, de dos fluidos inmiscibles en regímenes laminar y turbulento, en tramos rectos de tubería lisa orientados vertical y horizontalmente. Poniendo el énfasis en la conformación de la interfaz.

Y como objetivos específicos:

- 1.- Establecer los parámetros geométricos, tales como orientación y diámetro y longitud de la tubería, definidos según la bibliografía recomendada.
- 2.- Generar las mallas estructuradas a utilizar, con el software ANSYS® Workbench™.
- 3.- Definir los parámetros fluido-dinámicos, como son par de fluidos, tensión superficial, viscosidad y caudal de cada fluido.
- 4.- Imponer las condiciones de contorno y establecer parámetros físicos y numéricos a utilizar, definidos según la bibliografía recomendada.
- 5.- Ejecutar las simulaciones computacionales, con el software ANSYS® CFX™.

6.- Representar los resultados en visualizaciones, cortes transversales y longitudinales.

7.- Analizar y discutir los resultados.

8.- Concluir y recomendar.

Como objetivo adicional se hace un breve estudio de sensibilidad de malla.

En el capítulo I se estudian los factores importantes en la comprensión del fenómeno físico del transporte de fluidos en patrón bifásico.

En el capítulo II se estudian los conceptos importantes en la comprensión de los modelos matemáticos que son usados en la simulación computacional.

En el capítulo III se reportan las características de los equipos utilizados (hardware y software), la metodología usada para las simulaciones, sus parámetros generales y condiciones de frontera.

En el capítulo IV se presentan las simulaciones para comparar el modelo y las muestras de simulaciones de ensayo, es análisis de sensibilidad de malla y los análisis de los resultados de las simulaciones.

En el capítulo V se presentan las conclusiones de los resultados y las recomendaciones.

## CAPÍTULO I: MARCOTEÓRICO PARTE I

### FLUJO BIFÁSICO Y PATRÓN DE FLUJO ANULAR

#### **Flujo bifásico**

Como su nombre lo indica, es el fenómeno de transporte de dos fluidos cuyas fases entre sí son físicamente distinguibles.

Puede ser de dos líquidos (líquido – líquido) como en el caso de agua y aceite o petróleo y sus derivados. Puede ser de gas y líquido (gas – líquido) como en el caso de agua y aire.

Regularmente se presenta en la industria este tipo de fenómeno de transporte, derivado del proceso de extracción, el proceso de transporte o el proceso de producción. En algunos casos es una consecuencia del proceso, viniendo asociado al producto o materia prima y en otros casos es parte del proceso al agregarse sustancia para lograr una reacción química o evitarla.

#### *Enfoque de estudio del flujo bifásico*

El estudio del flujo monofásico es lo suficientemente complejo para hacer arduo el desarrollo y cálculo de sus ecuaciones. El estudio del flujo bifásico involucra el doble o tripe de complejidad, puesto que se han de desarrollar y calcular las ecuaciones para ambos fluidos y las respectivas ecuaciones de su interfaz.

En vista de ello se han desarrollado varios métodos de solución al mismo.

#### Enfoque experimental

Consiste en reproducir en forma física y experimental el proceso a escala, en condiciones de similitud geométrica, similitud cinemática y similitud dinámica, consiguiendo a través de formulas de correlación valores adimensionales para el caso específico. Valores que pueden representar una aproximación del proceso a otra escala.

#### Modelado

Consiste en el desarrollo de modelos matemáticos de interpretación de los fenómenos físicos involucrados en el estudio particular que se desea analizar.

La solución a estos modelos matemáticos solo puede ser encontrada analíticamente en un reducido número de condiciones (Nohra, 2008) o numéricamente con programas de simulación computacional en un número amplio de condiciones. Permitiendo además su graficación bidimensional, tridimensional o animación.

En el caso de flujo bifásico existen dos formas de modelar el estudio del fenómeno. El Modelo Homogéneo y el Modelo Heterogéneo o también llamado Modelo de Dos Fluidos.

#### Modelo Homogéneo

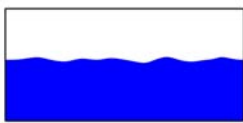
Trata a los dos fluidos involucrados como un solo fluido con característica pseudo-monofásica. Permitiendo resolver un solo conjunto de sistemas de ecuaciones con campos de velocidad, presión y mezcla compartidos.

#### Modelo Heterogéneo

Trata lo dos fluidos involucrados por separado, con sus respectivos sistemas de ecuaciones para cada uno de ellos. Permitiendo obtener una información más completa del flujo de los dos fluidos de forma individual.

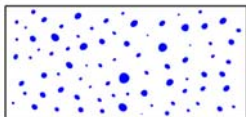
### **Patrones de flujo bifásico en tuberías**

Cuando dos fluidos inmiscibles viajan juntos adoptan formas de distribución de transporte. Entre ellos tenemos:



#### *Flujo estratificado*

Usualmente visto en el transporte líquido – líquido y gas – líquido a través de tuberías y canales horizontales. Consiste en el transporte de los fluidos en forma de estratos (un fluido sobre otro).



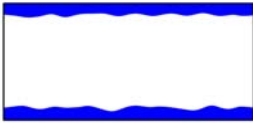
#### *Flujo burbuja*

Visto en el transporte de gas – líquido y líquido – líquido a través de tuberías verticales y horizontales. Consiste en la formación y transporte de uno de los fluidos en forma de pequeños nódulos.



*Flujo tapón*

Visto en el transporte de líquido – líquido y gas – líquido a través de tuberías tanto verticales como horizontales. Consiste en la formación y transporte de uno de los fluidos en burbujas discretas, usualmente del tamaño suficiente para tocar las paredes de la tubería.



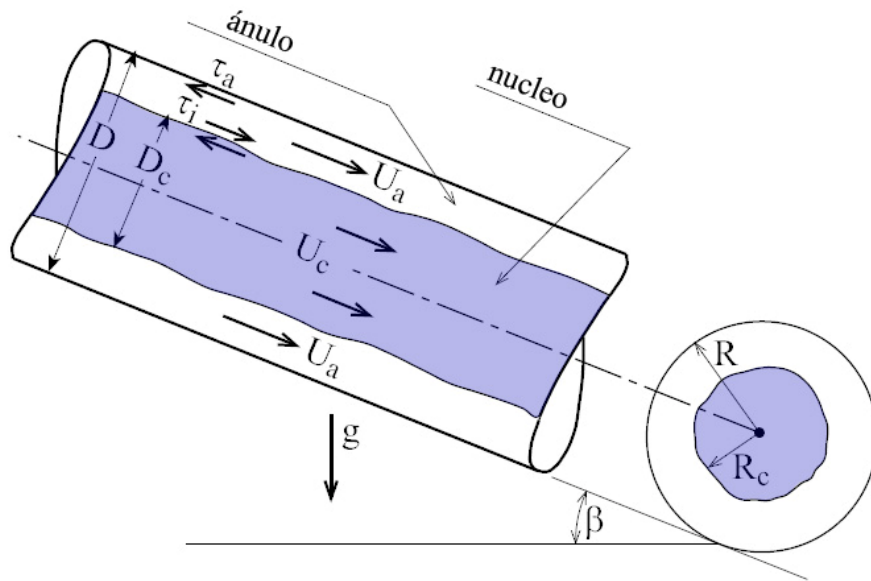
*Flujo anular*

Visto en el transporte de gas – líquido y líquido – líquido a través de tuberías verticales y horizontales. Consiste en la formación y transporte de uno de los fluidos en una fase interna en forma de cilindro rodeado del otro fluido (fase externa) alrededor de él.

### **Flujo anular**

Bajo ciertas condiciones el flujo bifásico puede estabilizarse en un patrón anular, lo que produce un efecto de lubricación por parte del fluido interno producido por el fluido externo, lo que hace que la caída de presión sea independiente de la viscosidad del fluido interno. Esto es sumamente beneficioso para la caída de presión en la tubería, el transporte del fluido interno y la potencia de bombeo. (Brauner, 2003).

En un sistema en patrón de flujo anular gas – líquido el patrón depende del caudal de líquido, de sus propiedades físicas, el diámetro del tubo y su inclinación. En el caso de líquido – líquido los efectos de la gravedad disminuyen. (Brauner, 2003)



Descripción esquemática de la configuración de flujo anular

**Descripción esquemática de la configuración de flujo anular. Adaptado de Brauner, 2003**

*El modelo laminar del patrón de flujo anular*

El desarrollo del modelo se obtiene a través de la solución de la ecuación de Navier Stokes para el patrón de flujo anular excéntrico en tubería horizontal, en términos de la Serie de Fourier en el sistema de coordenadas bipolares. (Brauner, 2003)

*Modelo de Dos fluido en patrón de flujo anular:*

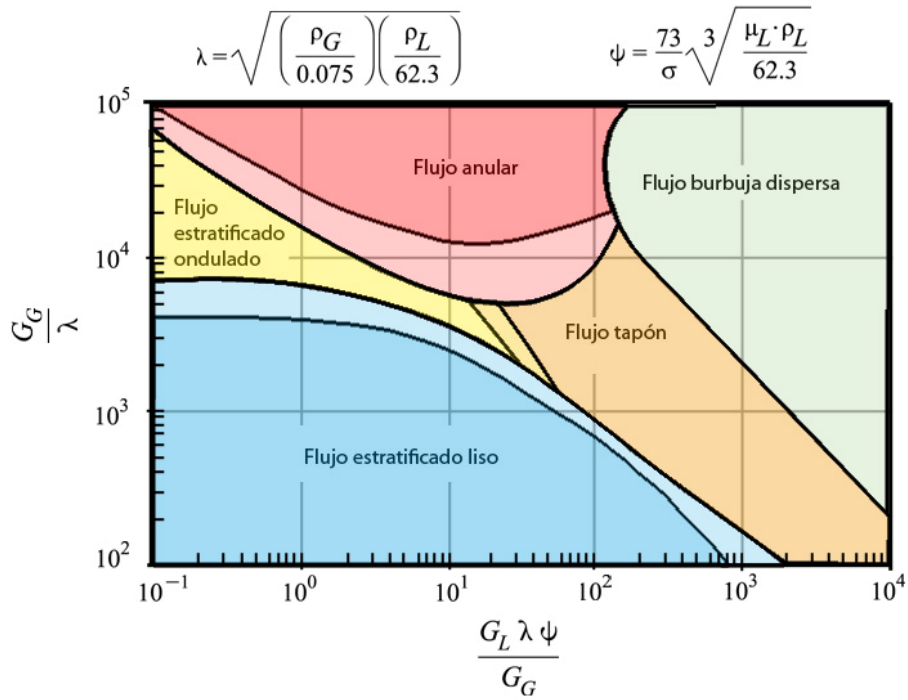
Es un modelo simple y practico de estudio del flujo bifásico líquido – líquido, cuando este no está restringido por un patrón en régimen laminar.

El modelo se obtiene al combinar la Ecuación de Momento aplicada para ambos líquidos. (Brauner 2003)

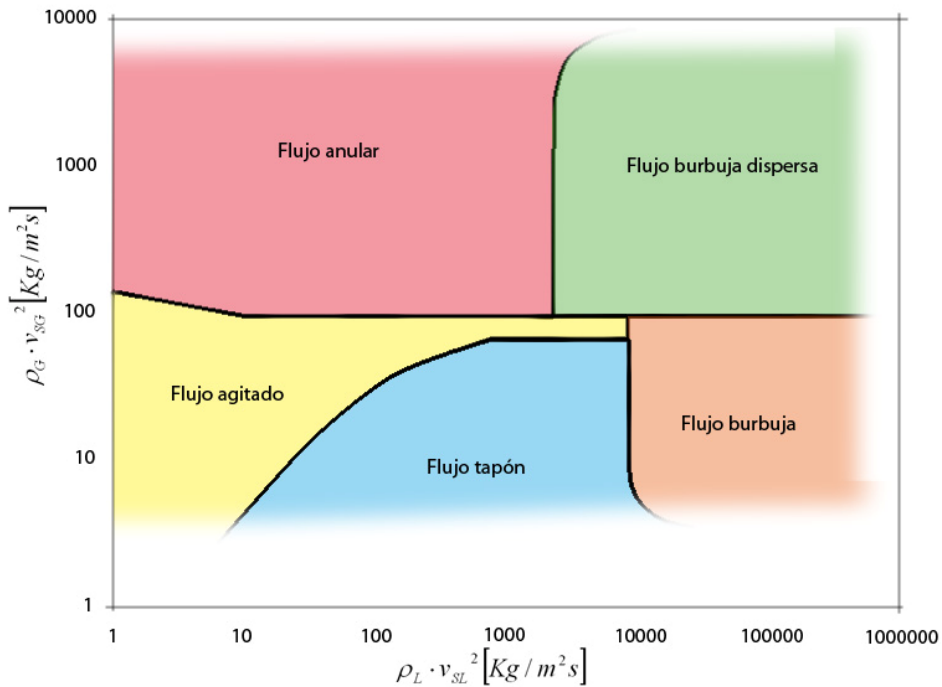
*Condiciones en las que el flujo anular es estable:*

Los estudios de los patrones de flujo bifásico gas – líquido han llevado a la realización de mapas de patrones de flujo bifásico obtenidos de forma experimental. Entre ello podemos citar el desarrollado por Baker en 1954 y el desarrollado por Hewitt y Roberts en 1969.





Mapa desarrollado por Baker en 1954 para patrones de flujo bifásico gas – líquido en tubería horizontal (adaptado de Shoham 2006)



Mapa desarrollado por Hewitt y Roberts en 1969 para patrones de flujo bifásico gas – líquido en tuberías verticales. (adaptado de Brennen, 2003)

También se han desarrollado modelos basados en los fenómenos físicos que determinan la transición entre los patrones de flujos. Podemos citar el modelo desarrollado por Taidel y Dukler en 1976 para tuberías horizontales y el desarrollado por Taidel en 1980 para tuberías verticales.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO PARTE II

### GENERALIDADES DEL MODELO MATEMÁTICO Y MÉTODO DE VOLÚMENES FINITO

#### Modelo matemático

Debido a que las ecuaciones de continuidad y momentum por las cuales se rigen los fenómenos fluidodinámicos son complejas de resolver tanto de forma analítica como numérica, se recurre a modelos matemáticos que describan bien el fenómeno.

#### *Hipótesis simplificadoras*

Para resolver el problema se implementan un modelo matemático tridimensional para flujo bifásico, considerando que:

El régimen es en permanente.

Los dos fluidos son incompresibles, newtonianos y de propiedades físicas constantes.

El proceso es isotérmico.

Se desprecia la transferencia de masa entre ambos fluidos.

La tensión interfacial permanece constante durante todo el proceso.

#### *Ecuaciones fluidodinámicas*

Esta se describe a través de un modelo Euleriano heterogéneo, compuesto por las ecuaciones de momentum y de conservación de masa en cada fluido, a demás de la ecuación de fracción volumétrica de la interfase.

#### Ecuación de Conservación de Momentum para cada fase

$$\frac{\partial(r_i \rho_i u_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_i (\rho_i u_i \otimes u_i)) = r_i \nabla p_i + \nabla \cdot (r_i \mu_i (\nabla u_i + (\nabla u_i)^T)) + \sum_{i=1}^g (\Gamma_{ii}^+ u_i - \Gamma_{ii}^- u_i) + S_i + M_i$$

Donde  $\sum_i^g (\Gamma_{ii}^+ u_i - \Gamma_{ii}^- u_i)$  representa la transferencia de momentum producto de la transferencia de masa interfacial.

Donde  $S_i$  describe fuentes de momentum producto de fuerzas volumétricas externas. En el se incluye el modelo de flotabilidad de la forma  $F_l = (\rho_l - \rho_{ref})g$ . Donde  $\rho_{ref}$  es la densidad de referencia, que por lo regular es la del de menor densidad (ANSYS® CFX™ Solver: Modeling, 2005).

La tensión interfacial también es incluida de la forma  $F_{lg} = f_{lg} \delta_{lg}$ . Donde  $f_{lg} = -\sigma_{lg} k_{lg} n_{lg} + \nabla_s \sigma$  y  $\delta_{lg} = |\nabla r_{lg}|$

Donde  $M_l$  describe las fuerzas interfaciales entre ambos fluidos. Ello considera la fuerza de arrastre de la forma

$$M_D = \frac{1}{2} C_D \rho_l A_p |u_g - u_l| (u_g - u_l)$$

Donde  $C_D$  es el coeficiente de arrastre y  $A_p$  es el área proyectada por el cuerpo en la dirección perpendicular al flujo (Baritto, 2007).

Finalmente la ecuación de momentum para uno de los fluidos se escribe de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \rho_l \frac{\partial(r_l u_l)}{\partial t} + \rho_l \nabla \cdot (r_l (u_l \otimes u_l)) = & -r_l \nabla p_l + \mu_l \nabla \cdot (r_l (\nabla u_l + (\nabla u_l)^T)) \\ & + (\rho_l - \rho_g)g - \sigma (\nabla \cdot n_{lg}) n_{lg} \delta_{lg} + \frac{1}{2} C_D \rho_l A_p |u_g - u_l| (u_g - u_l) \end{aligned}$$

Y de forma análoga para el otro fluido (Baritto, 2007)

#### Ecuación de Conservación de Masa para cada fase

$$\frac{\partial(r_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_l \rho_l u_l) = \sum_{i=1}^g \Gamma_{li} + S_{Ml}$$

Donde  $\sum_{i=1}^g \Gamma_{li}$  representa la transferencia de masa y puede despreciarse.

Donde  $S_M$  representa las fuentes de masa, debido a que los fluidos son inmiscibles el término es nulo.

Finalmente la ecuación de conservación de masa para uno de los fluidos se reduce a:

$$\frac{\partial r_i}{\partial t} + \nabla \cdot (r_i u_i) = 0$$

Y para el otro fluido es análogo (Baritto, 2007).

#### Condiciones de restricción:

Las ecuaciones de conservación de momentum y de masa son suficientes para describir el comportamiento de los fluidos, pero la interfase agrega otras incógnitas que las hacen insuficientes, para ello se involucran en ellas condiciones de restricción (ANSYS® CFX™ Solver: Theory, 2005).

La fracción volumétrica total debe sumar 1:  $\sum_{i=1}^g r_i = 1$

Ambos fluidos comparten el campo de presiones en la interfase:  $p = p_l = p_g$

### **Método de Volúmenes Finitos**

#### *Enfoque del Método de Volúmenes Finitos*

Es un método que plantea y garantiza la solución numérica de las ecuaciones fluidodinámicas conservando sus propiedades a través de todo el dominio y aproximando las ecuaciones a resolver.

Consiste en dividir el dominio físico del fenómeno en volúmenes de control finitos, en los que son integradas las ecuaciones de conservación respecto al espacio y al tiempo. Lo que produce un sistema de soluciones algebraicas que se puede resolver mediante métodos iterativos. (Baritto, 2007)

#### *Ecuaciones de conservación*

Las ecuaciones de conservación se pueden escribir de forma diferencial, de la forma:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi u) = \nabla \cdot (\Gamma^\phi \nabla(\phi)) + S^\phi$$

Donde:

| Ecuación de conservación    | $\phi$ | $\Gamma^\phi$   | $S^\phi$  |
|-----------------------------|--------|-----------------|---|
| Masa                        | 1      | 0               | 0   |
| Cantidad de movimiento en x | u      | $\mu$           | $B_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot u \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}$ |
| Cantidad de movimiento en y | v      | $\mu$           | $B_y + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot u \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y}$ |
| Cantidad de movimiento en z | w      | $\mu$           | $B_z + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot u \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z}$ |
| Energía                     | t      | $\frac{k}{C_p}$ | $\frac{1}{C_p} \frac{Dp}{Dt} + \frac{\mu}{C_p} \Phi$  |

(Tomado de Maliska, 2004)

### *Mallas de cómputo*

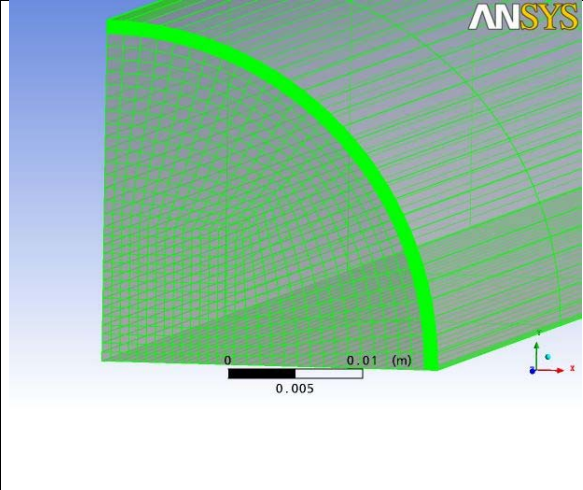
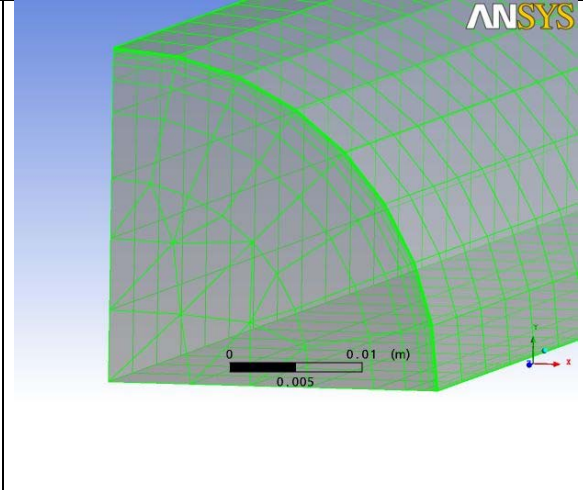
Para aplicar del método de volúmenes finitos se requiere la discretización espacial del dominio del volumen de control en subvolúmenes de control usando mallas de computo sobre las cuales se integrarán la ecuaciones. (Baritto, 2007)

La malla de cómputo es un sistema de redes nodales digitales, cuyos nodos se distancian el uno del otro según un patrón espacial.

El patrón espacial de la malla de computo puede ser estructurado o desestructurado. Cuando hablamos de una malla de cómputo desestructurada nos referimos a un patrón espacial compuesto por conexiones entre nodos de forma tetraédrica no necesariamente regulares, y cuando hablamos de mallas estructuradas nos referimos a un patrón espacial compuesto por conexiones entre nodos de forma de prismática regular de bases ortogonales o no ortogonales, que pueden ser trapezoidales o rectangulares.

Las mallas desestructuradas son más simples de construir y se amoldan con facilidad a la forma geométrica del dominio del volumen de control. Tienen en desventaja que hace más lento el proceso cómputo, debido a que el proceso de interpolación e iteración entre sus nodos es más irregular.

Las mallas estructuradas se amoldan con poca facilidad a formas complejas. Tienen en ventaja que hacen más rápido el proceso de cómputo, debido a que el proceso de interpolación e iteración entre sus nodos es más regular.

|  |   |
|--|---|
|  |  |
| <p>Malla estructurada de un cuarto de cilindro, generada en el Software GID.</p>   | <p>Malla híbrida de un cuarto de cilindro, generada en ANSYS® Workbench™</p>        |

#### *Método de volúmenes finitos basados en elementos*

En el método el subvolumen de control está definido alrededor de cada nodo uniendo el centroide de este con el punto medio de los bordes del elemento (método de la mediatriz), o uniendo las líneas perpendiculares a cada segmento de línea que une los nodos (diagrama de Voronoi).

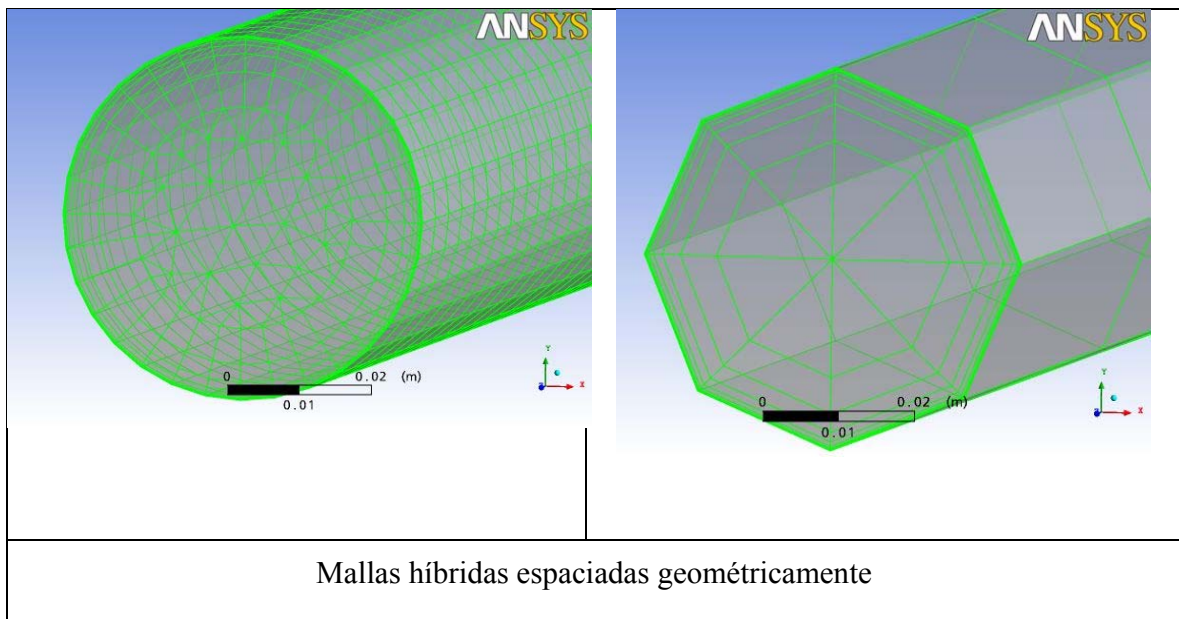
Las ecuaciones de conservación son resueltas numéricamente en los subvolúmenes de control mediante el empleo de funciones de forma, análogamente al Método de Elementos finitos.

### CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

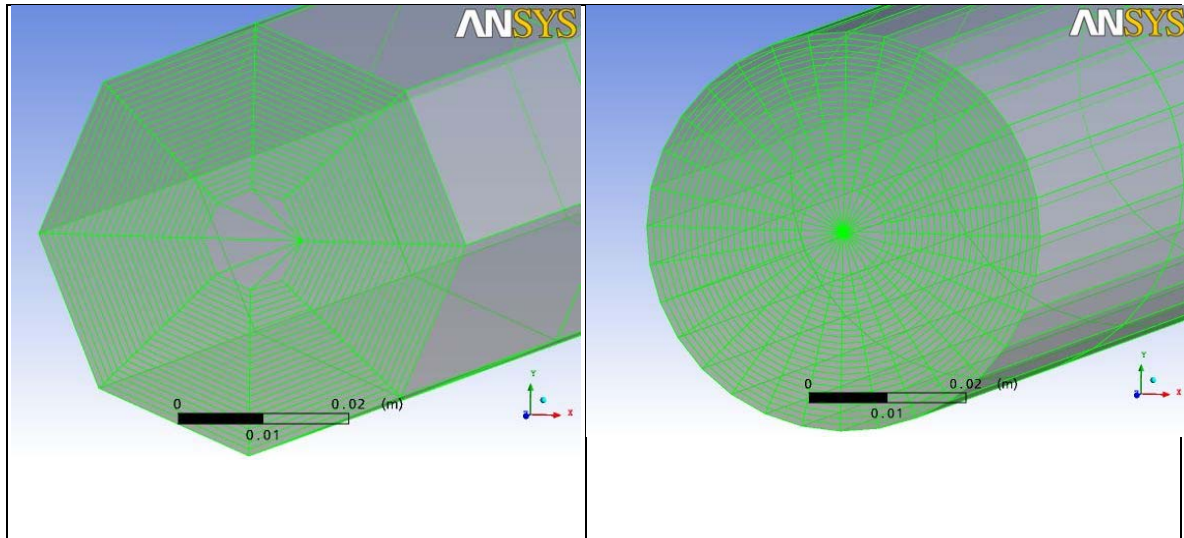
El procedimiento detallado para la construcción de la geometría y la malla de computo en ANSYS® Workbench™, así como la incorporación de las condiciones de frontera y parámetros necesarios para la simulación en ANSYS® CFX™ se hallan en el anexo A.

#### Creación del modelo y su respectiva malla en ANSYS® Workbench™:

1. Crear el Archivo de Proyecto en el ANSYS® Workbench™ con la finalidad de guardar en él la organización de la geometría y su respectiva malla.
2. Crear la geometría mediante el ANSYS® Workbench™ DesingMoldeler.
3. Crear la malla respectiva a la geometría mediante el ANSYS® Workbench™ CFX - Mesh.







Mallas híbridas espaciadas aritméticamente

**Mallas híbridas generadas con ANSYS® Workbench™**

4. Generamos una primera malla de superficie en la que podemos ver la forma de la malla que vamos a crear para ver si está acorde a lo que deseamos.
5. Si la malla de superficie no está acorde a lo que deseamos, ajustamos la dimensión de los triángulos y volvemos a generar la malla de superficie, hasta obtener la forma deseada. Si la malla de superficie está acorde a lo que deseamos generamos la malla de volumen.

**Simulación en ANSYS® CFX™:**

6. Una vez generada y guardada la malla de volumen Creamos en el ANSYS® CFX™ Pre los datos previos para armar la simulación.
7. Una vez que todos los datos necesarios para la simulación están colocados activamos el solucionador, el ANSYS® CFX™ Solver.
8. Luego de terminado el proceso de solución activamos el visualizador ANSYS® CFX™ Post.
  - 8.1. Creamos un plano de visualización en el plano XZ. Donde podemos ver la caída de presión, la velocidad superficial en la dirección z y la fracción volumétrica.

- 8.2. Creamos una isosuperficie de visualización con la variable de fracción volumétrica a 0,5. Donde podemos ver la forma de la interfase entre los dos fluidos.
- 8.3. Crear una línea a lo largo del eje, desde el punto (0,0,0) al punto (0,0,L) donde “L” es la longitud del cilindro. Tomado como referencia la misma crear la gráfica de presión a lo largo de Z.
- 8.4. Mediante la herramienta de consulta puntual vemos el valor de la presión en dos (2) puntos del eje donde el fluido ya está desarrollado. Con ello calculamos la caída de presión por metro.
- 8.5. Mediante la herramienta de consulta puntual vemos la coordenada x o y del espesor de película a la salida y con ella calculamos el espesor de película a la salida.

#### **Características del equipo PC:**

Se trabaja en una Pc desktop, Intel® Pentium® 4, CPU 1.7 Ghz, con una memoria RAM de 1 GB. Ubicada en la Sala de Simulaciones Computaciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela.

#### **Características de los programas usados:**

ANSYS® Workbench™, Versión 11.0 SP1: utilizado para crear la geometría y la malla respectiva.

ANSYS® CFX™ Launcher, Versión 11: utilizado para simular el flujo de fluidos.

#### **Simulaciones en general:**

*Generalidades en las simulaciones:*

Son parámetros que se hallan en todas las simulaciones.

El sistema de referencias es cartesiano. En los casos de flujo vertical “z” es la dirección de la altura y en los casos de flujo horizontal “z” es profundidad.

La geometría usada en todas las simulaciones es cilíndrica.

En todas las simulaciones se usan mallas híbridas.

Todas las simulaciones son realizadas en estado permanente.

En todas las simulaciones siempre hay involucrados dos fluidos, ya bien sea liquido-liquido o gas-liquido.

Todas las simulaciones son realizadas a proceso isotérmico.

En todas las simulaciones se define una entrada y una salida fijas, en dirección normal a los mismos.

En todas las simulaciones las paredes tienen condición de no deslizamiento sin rugosidad.

En todas las simulaciones la tolerancia de error entre las iteraciones es de  $10^{-4}$  o  $10^{-5}$

*Expresiones matemáticas usadas en las simulaciones:*

Para mayor detalle ver el anexo B.

Diámetro de tubería.

Ecuación de fracción volumétrica del fluido que fluye por el anulo.

Ecuación de fracción volumétrica del fluido que fluye por el núcleo.

Ecuación del perfil de velocidad.

Radio del fluido que fluye por el núcleo.

Radio de la tubería.

Tasa del fluido interno (%) o espesor de la capa que fluye por el anulo.

Velocidad media del fluido que fluye por el anulo.

Velocidad media del fluido que fluye por el núcleo.

Velocidad superficial del fluido que fluye por el anulo.

Velocidad superficial del fluido que fluye por el núcleo.

## CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

### RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

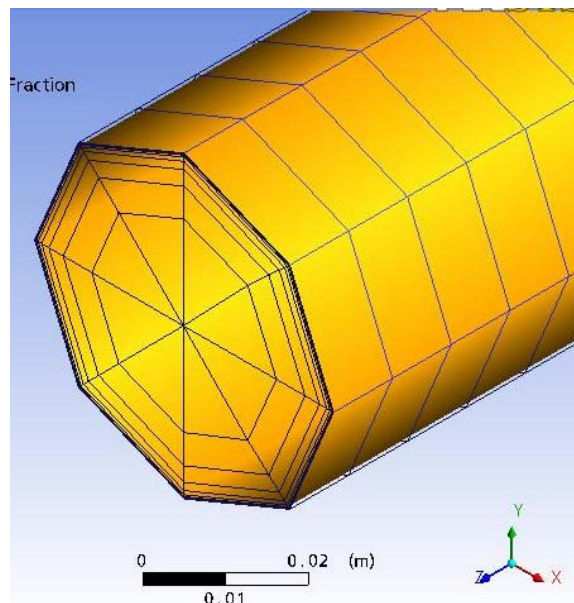
#### Simulaciones de comparación:

Las simulaciones de comparación son basadas en datos experimentales con la finalidad de probar el modelo de simulación.

Las simulaciones se basaron en la muestra de Zabarás y Dukler reportados en la tesis de Nohra.

Fluidos involucrados: aire en la región del núcleo y agua en la región anular.

Malla híbrida espaciada en su sección transversal de forma geométrica de 40459 nodos. La menor distancia de la última capa radial al extremo es  $2 \cdot 10^{-5}$  m.



**Malla híbrida espaciada en su sección transversal de forma geométrica.**

Régimen turbulento

Gravedad en z

Simulación de comparación 01:

Valores de entrada:

|   |           |
|---|-----------|
| Velocidad superficial del gas           | 19,28 m/s |
| Velocidad superficial del líquido       | 0,031 m/s |
| Espeso de la región anular a la entrada | 0.44 mm   |

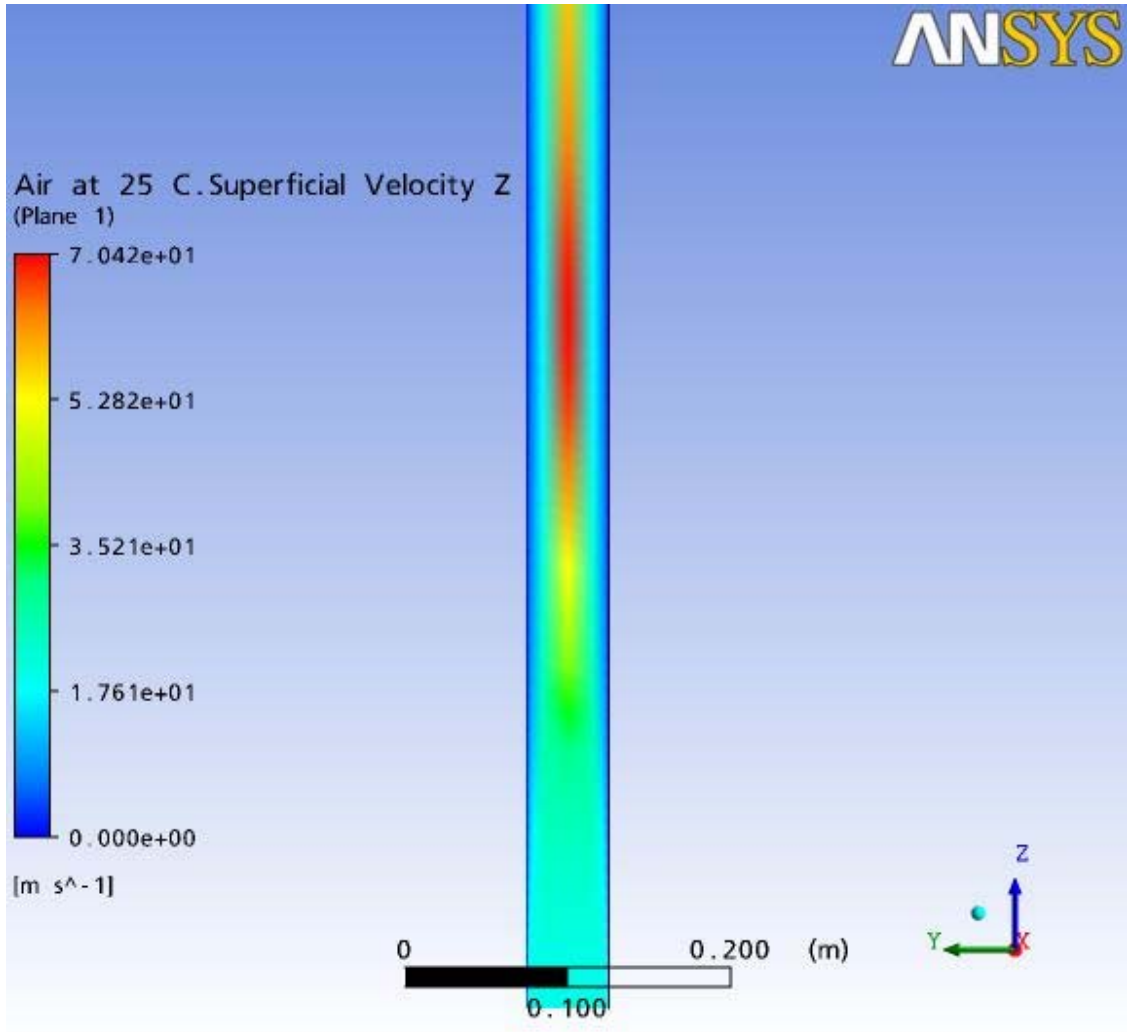
Valores de comparación:

|                            | Experimental | Simulación |
|----------------------------|--------------|------------|
| Caída de presión por metro | 570 Pa/m     | 13 KPa/m   |
| Espesor de película        | 0.44 mm      | 1.24 mm    |

**Observaciones:**

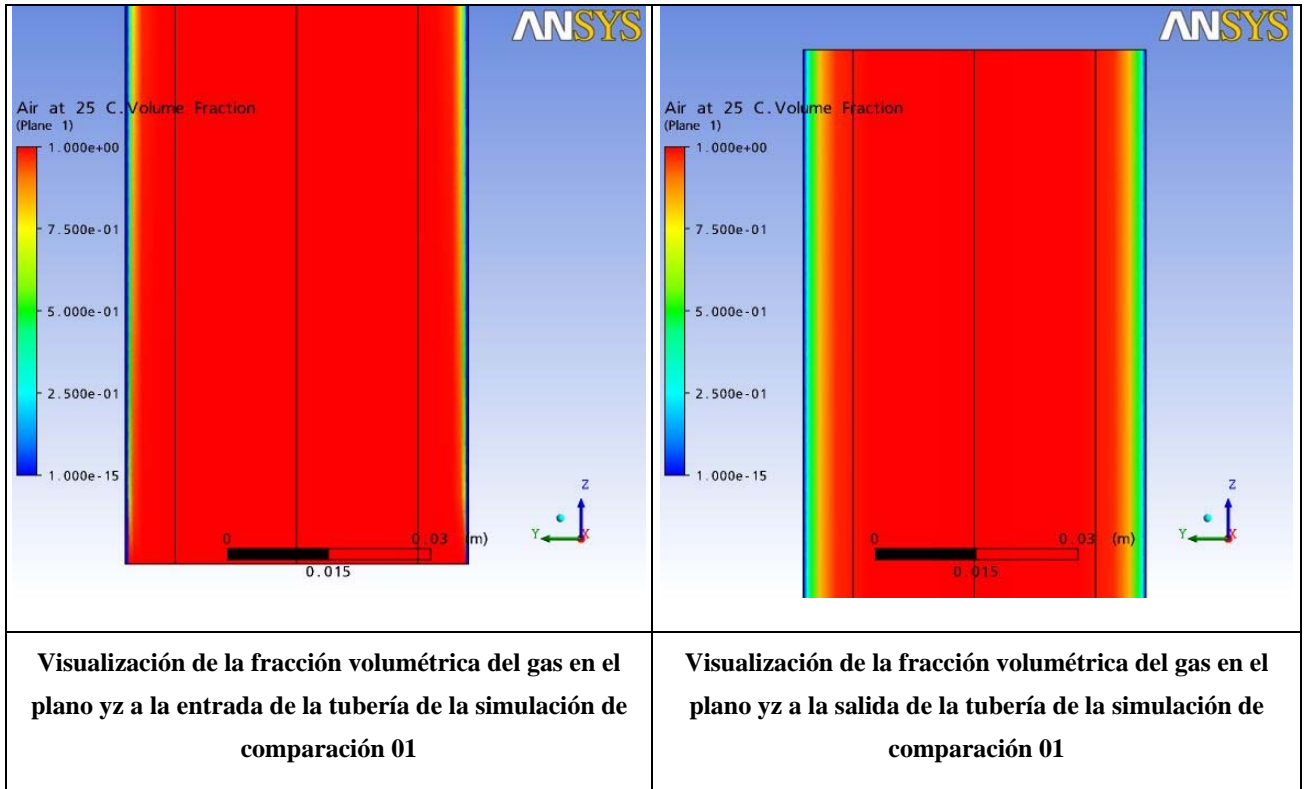
El patrón anular se conserva en todo el proceso.

El proceso presenta una región de desarrollo del perfil de velocidad modificando el perfil con el que comienza estabilizándose el mismo a los 0.8 m aproximadamente.

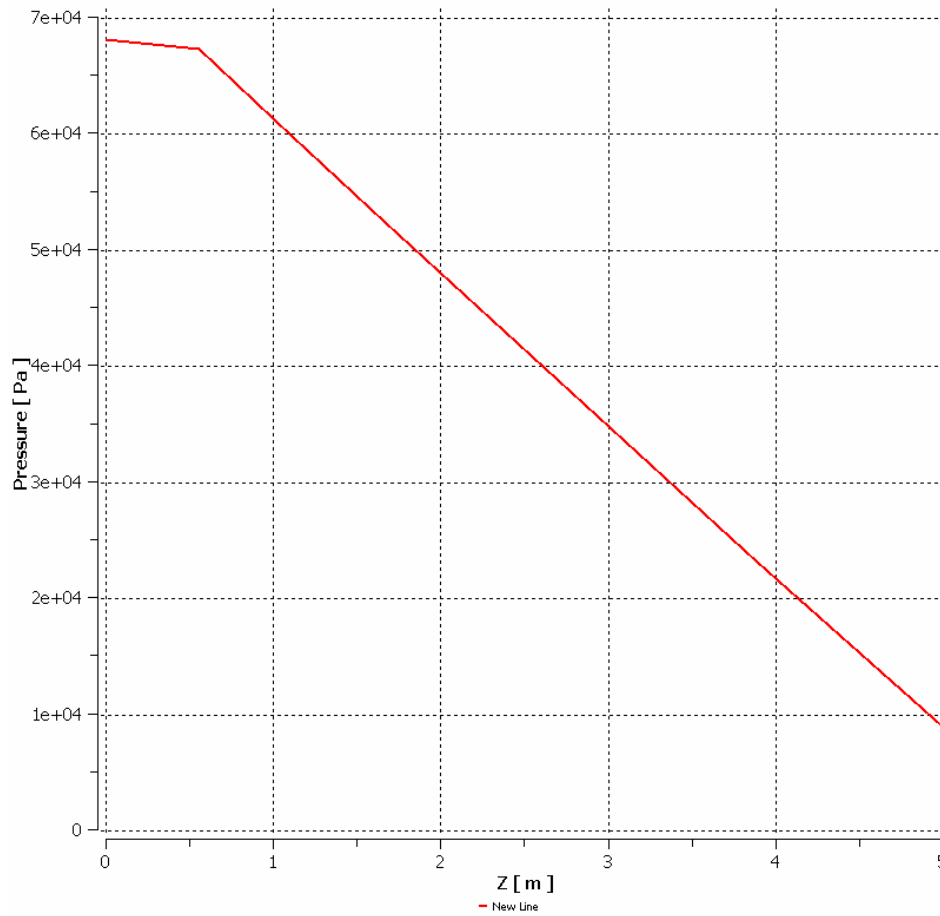


**Visualización de la velocidad superficial del gas en el plano yz a la entrada de la tubería de la simulación de comparación 01**

El espesor de la región anular inicial no se mantiene, ensanchándose poco a poco y estabilizándose a los 0,8 m con un espesor final de 1.24 mm



La caída de presión es lineal luego de la etapa de desarrollo a razón de 13 KPa/m aproximadamente.



**Visualización de la grafica de presión en el eje de la tubería de la simulación de comparación 01**

Simulación de comparación 02:

Valores de entrada:

|   |           |
|---|-----------|
| Velocidad superficial del gas           | 24,10 m/s |
| Velocidad superficial del líquido       | 0,031 m/s |
| Espejo de la región anular a la entrada | 0.36 mm   |



Valores de comparación:

|                     | Experimental | Simulación |
|---------------------|--------------|------------|
| Caída de presión    | 650 Pa/m     | 23 KPa/m   |
| Espesor de película | 0.36 mm      | 1.22 mm    |

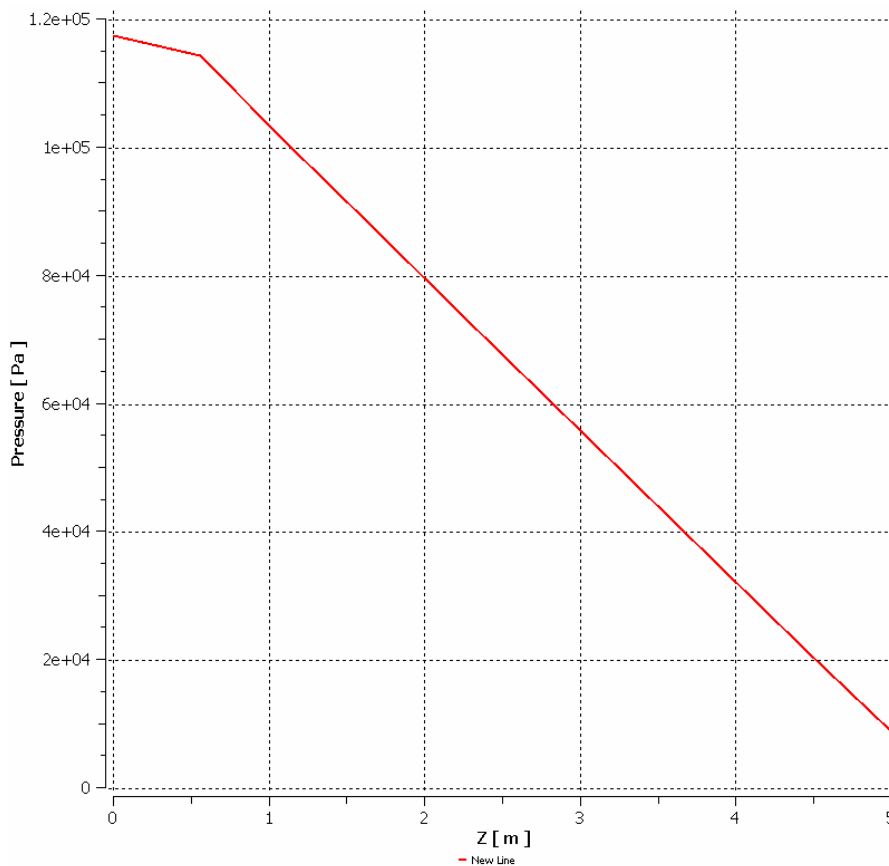
**Observaciones:**

Muy parecido al caso anterior.

Se estabiliza a los 0.8 m aproximadamente.

El espesor se engrosó levemente hasta estabilizarse a 1.22 mm.

La caída de presión por metro es lineal luego del desarrollo a razón de 23 KPa/m aproximadamente.



**Visualización de la grafica de presión en el eje de la tubería de la simulación de comparación 02**

Simulación de comparación 03:

Valores de entrada:

|  |           |
|--|-----------|
| Velocidad superficial del gas            | 27.11 m/s |
| Velocidad superficial del líquido        | 0,062 m/s |
| Espesor de la región anular a la entrada | 0.50 mm   |

Valores de comparación:

|                     | Experimental | Simulación |
|---------------------|--------------|------------|
| Caída de presión    | 820 Pa/m     | 32 KPa/m   |
| Espesor de película | 0.50 mm      | 1.23 mm    |

**Observaciones:**

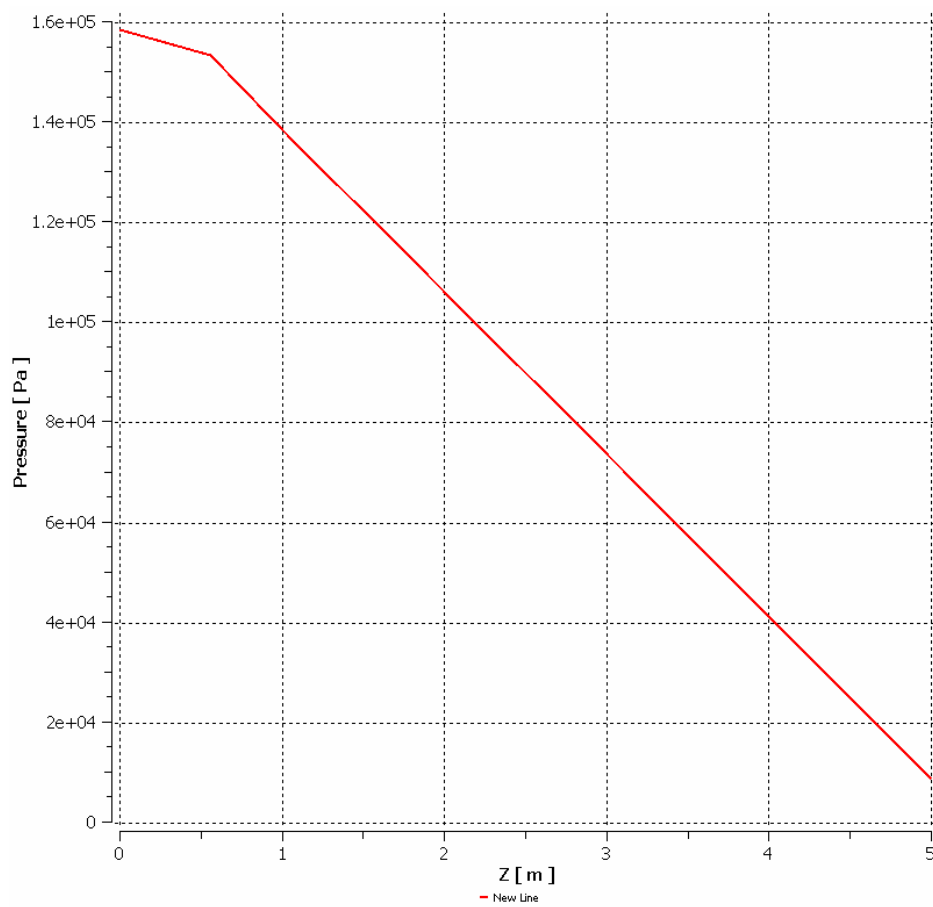
Muy parecido al anterior.

El patrón anular es estable.

Se estabiliza a los 0.8 m de la entrada.

El espesor se ensancha hasta 1.23 mm.

La caída de presión por metro es lineal después del desarrollo a razón de 32 KPa/m.



**Visualización de la grafica de presión en el eje de la tubería de la simulación de comparación 03**

**Simulaciones para el estudio de sensibilidad de malla:**

Debido a la diferencia entre los resultados esperados y reportados por las simulaciones de comparación se hicieron simulaciones con el objeto de buscar la malla más apropiada para las simulaciones.

Tomando como referencia los datos de la simulación de comparación 03 y comparando su caída de presión.

Caída de presión experimental 820 Pa/m.

Mallas aritméticamente espaciadas

| capas radiales | Capas longitudinales | Caída de presión (Pa/m) |
|----------------|----------------------|-------------------------|
| 5              | 50                   | 30505                   |
| 10             | 50                   | 23832                   |
| 25             | 50                   | 16645                   |
| 35             | 50                   | no converge             |
| 40             | 50                   | Error                   |
| 50             | 50                   | Error                   |
| 25             | 100                  | Error                   |
| 25             | 25                   | Error                   |

Mallas espaciadas geométricamente

| capas radiales | capas longitudinales | Caída de presión (Pa/m) |
|----------------|----------------------|-------------------------|
| 5              | 50                   | 24195                   |
| 10             | 50                   | no converge             |
| 10             | 100                  | 27934                   |
| 10             | 500                  | 26634                   |

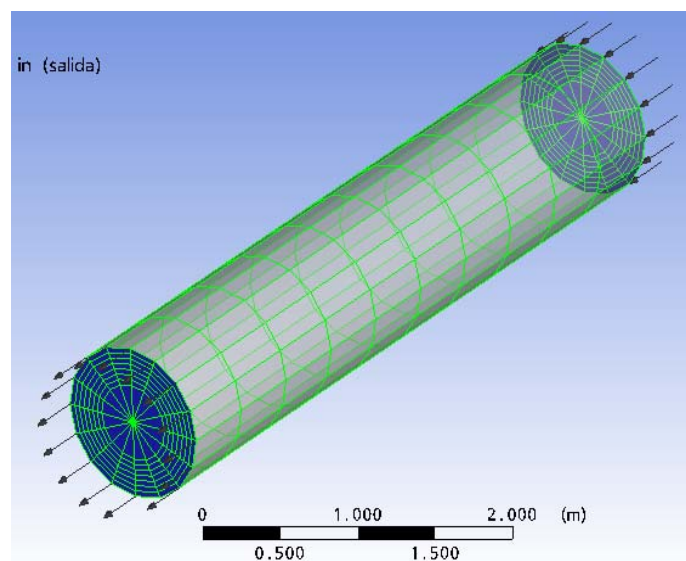
### **Simulaciones de ensayo:**

Las simulaciones de ensayo son simulaciones que se realizaron en el proceso de aprendizaje así como también para la observación de los mejores procedimientos para dar una solución óptima al proceso estudiado.

#### Ensayo de muestra 01:

Geometría: cilindro 1m de diámetro y 5m de longitud.

Malla híbrida espaciada aritméticamente de 1490 nodos.



#### **Malla híbrida espaciada aritméticamente con entrada y salida fija del ensayo de muestra 01**

Régimen laminar.

Perfil de velocidad a la entrada constante con una velocidad normal de 1 m/s.

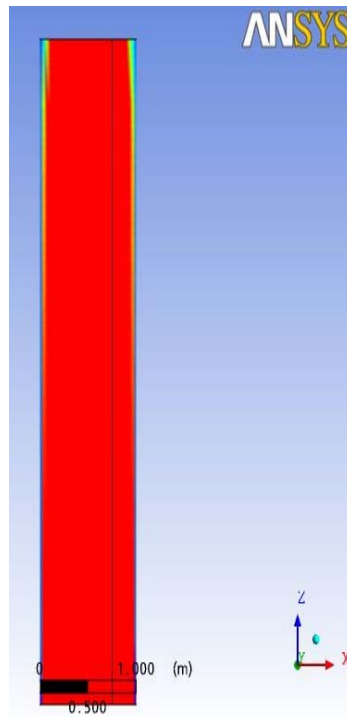
Fluidos: agua en la región anular y aceite mineral de 320 centistokes en la región del núcleo.

#### Ensayo de muestra 01 - 01:

Gravedad: en z.

#### **Observaciones:**

El patrón anular se mantiene, mas al finalizar el trayecto comienza a encuallarse.



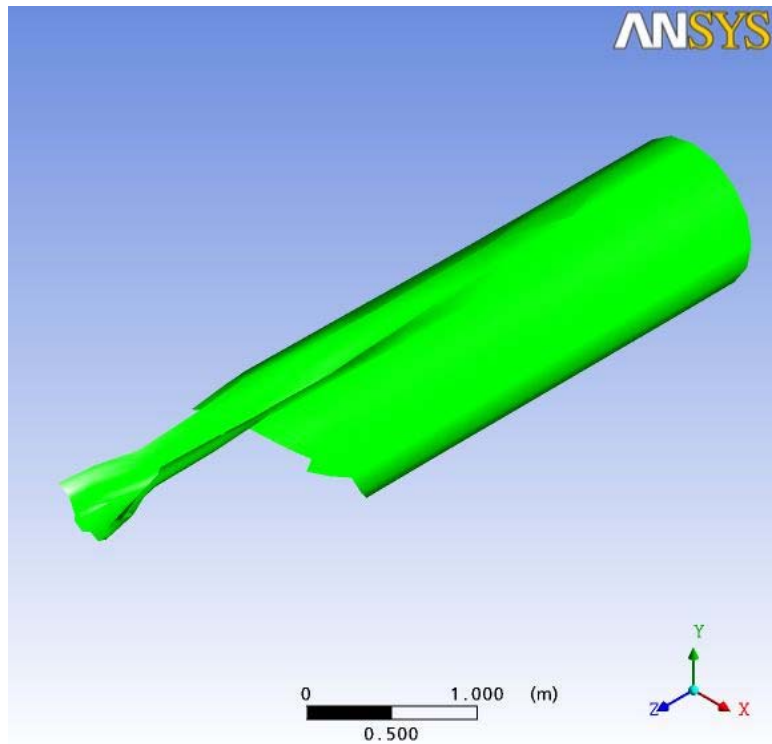
**Visualización de la fracción volumétrica del aceite de 320 centistokes en el plano xz del ensayo de muestra 01-01. Patrón de flujo anular en tubería vertical**

Ensayo de muestra 01 - 02:

Gravedad: en y

**Observaciones:**

Comienza de una transición a otro patrón de flujo.



**Visualización en perspectiva de la interfase entre ambos fluidos del ensayo de muestra 01 - 02. Patrón de flujo anular en tubería horizontal.**

Ensayo de muestra 02:

Geometría: cilindro 0,03 m de diámetro y 3m de longitud.

Malla híbrida espaciada aritméticamente de 7399 nodos.

Régimen laminar.

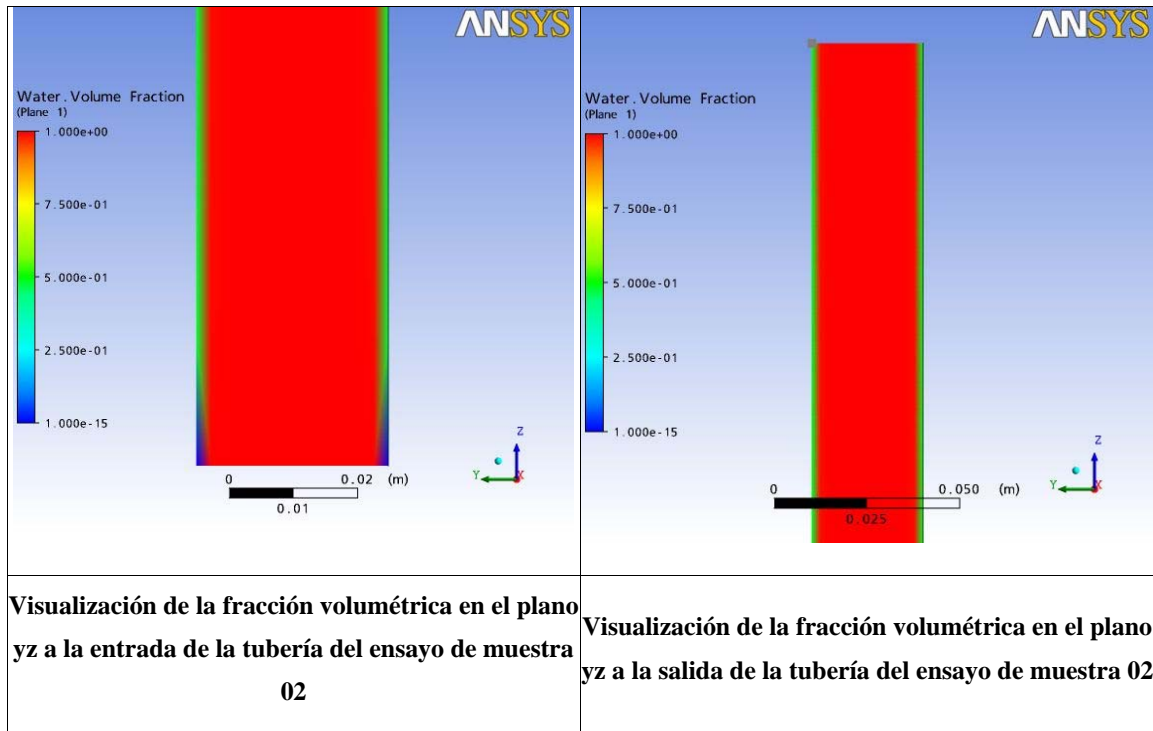
Velocidad normal perfil escalón 0.5 m/s en la región anular y 10.78 m/s en la región del núcleo.

Fluidos: aire en la región anular y agua en la región del núcleo.

Gravedad en z.

**Observaciones:**

Se observa el patrón anular y se estabiliza rápidamente disminuyendo su espesor de película de 0.00116 m a 0.00008 m



### Ensayo de muestra 03:

Geometría: cilindro 0.01 m de diámetro y 15m de longitud.

Malla híbrida espaciada aritméticamente de 14749 nodos.

Régimen laminar.

Velocidad normal a la entrada constante y de 1 m/s.

Gravedad en y.

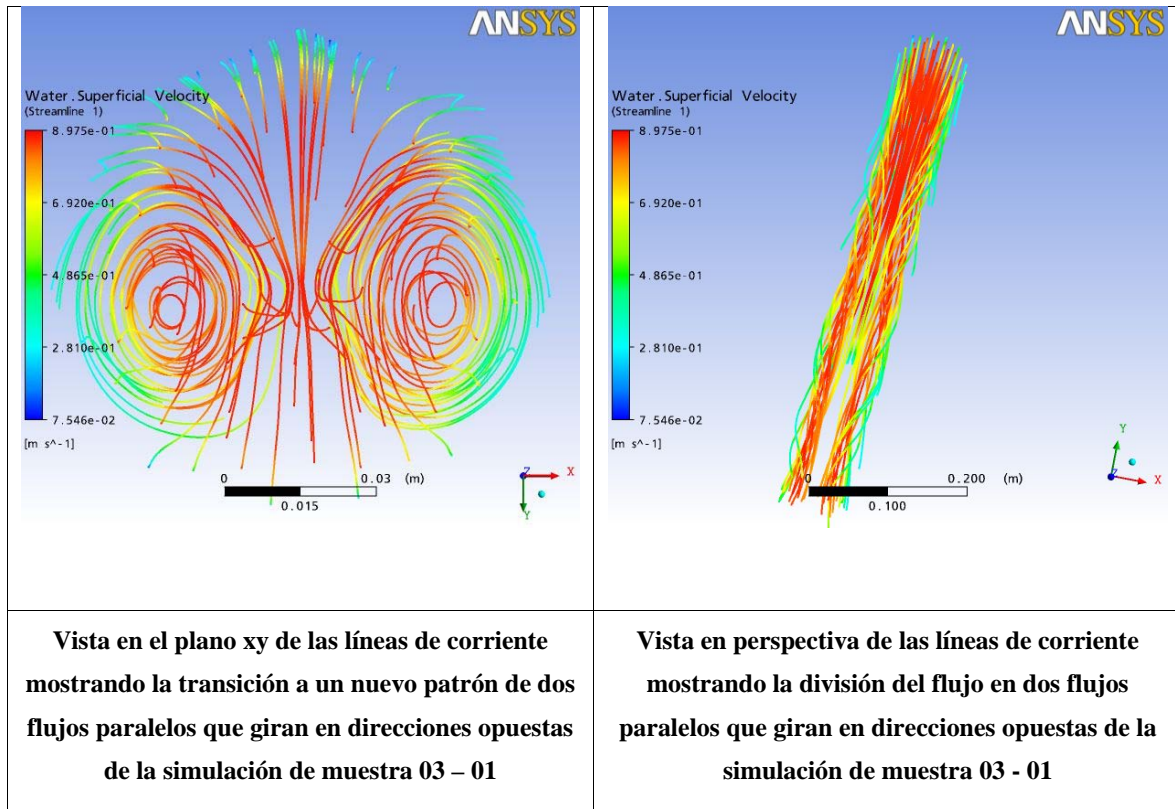
### Ensayo de muestra 03 - 01:

Fluidos: agua en la región anular y aceite de 10° API en el núcleo.

### **Observaciones:**

Se observa que el patrón anular pasa a un nuevo patrón dividiéndose en dos flujos que se transportan paralelamente y girando en direcciones opuestas.



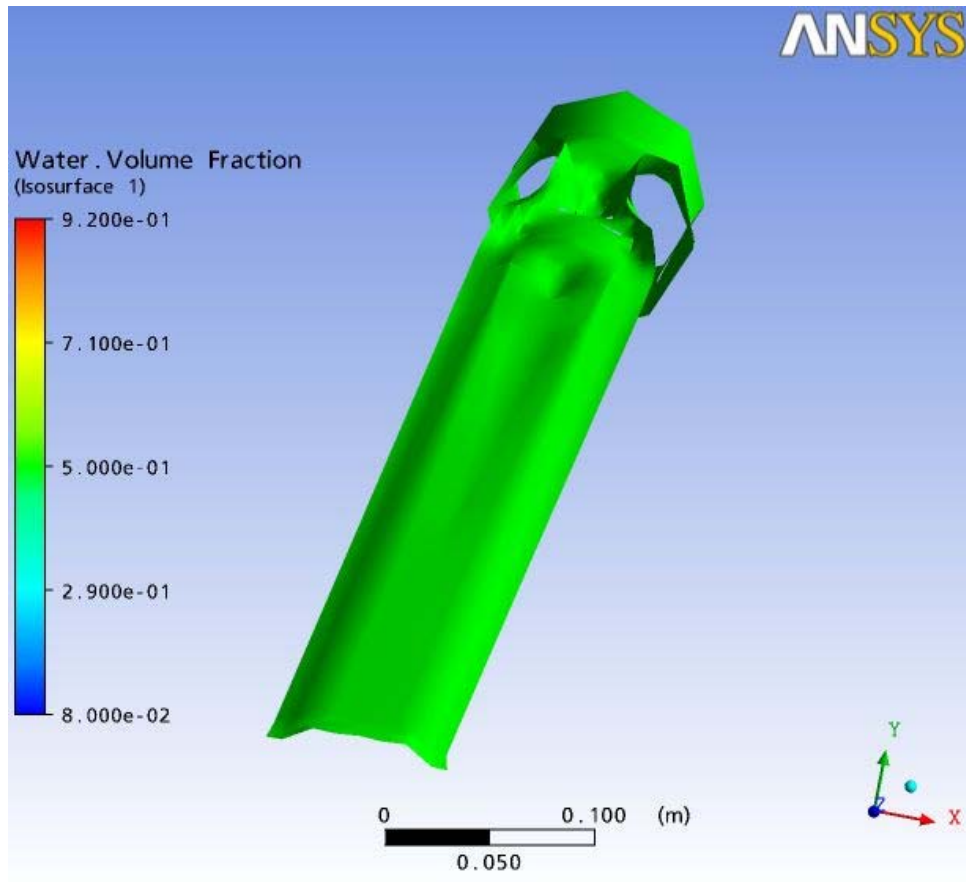


Ensayo de muestra 03 - 02:

Fluidos: agua en la región anular y aceite mineral de 320 centistokes en el núcleo.

**Observaciones:**

El patrón de flujo pasa de anular a estratificado.



**Visualización del cambio de patrón de flujo anular a estratificado del ensayo de muestra 03 - 02**

Ensayo de muestra 04:

Geometría: cilindro 0.03 m de diámetro y 3m de longitud.

Malla: híbrida espaciada aritméticamente de 14749 nodos.

Régimen laminar.

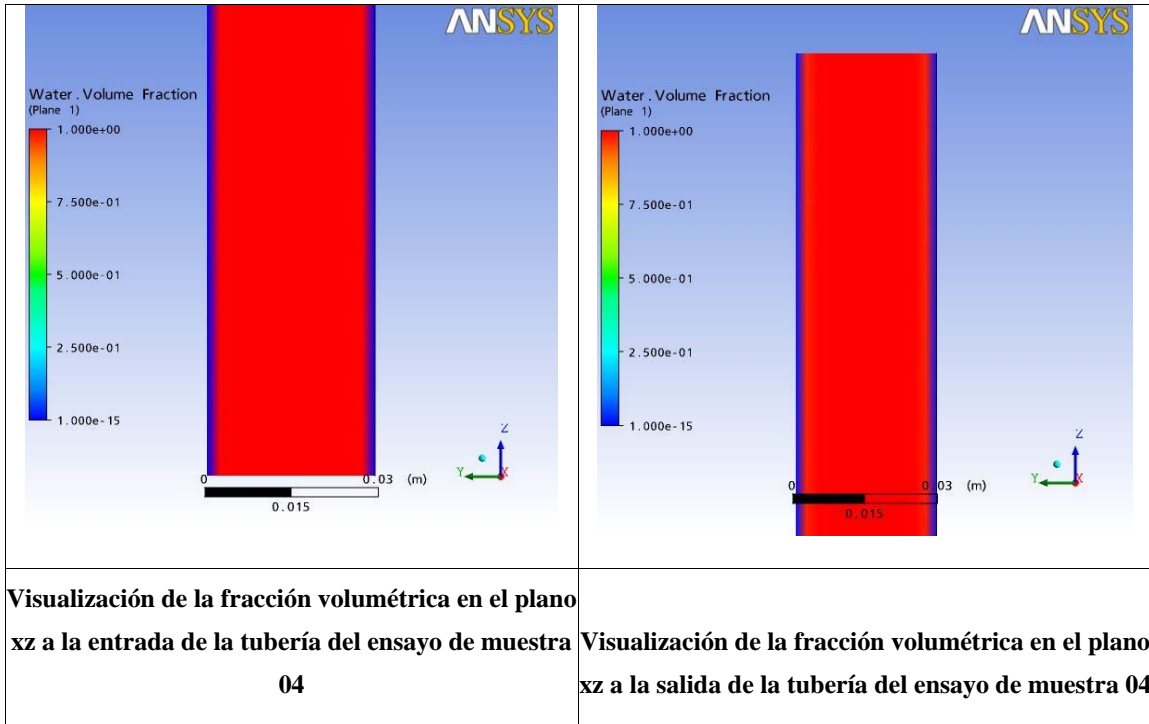
Perfil de velocidad constante de velocidad normal 25 m/s.

Fluidos: aire en la región anular y agua en la región del núcleo.

Gravedad en z.

**Observaciones:**

El patrón anular se conserva de principio a fin manteniendo el espesor de su capa anular.



## ANÁLISIS DE RESULTADOS

**Simulaciones de comparación:**

Las simulaciones convergieron adecuadamente con una tolerancia de error de  $1 \cdot 10^{-5}$

*Simulación de comparación 01:*

|                             | Experimental | Simulación | Error relativo |
|-----------------------------|--------------|------------|----------------|
| Caída de presión por metro  | 570 Pa/m     | 13 kPa/m   | 2180,7 %       |
| Espesor de la región anular | 0.44 mm      | 1.24 mm    | 181,8 %        |

*Simulación de comparación 02:*

|                             | Experimental | Simulación | Error relativo |
|-----------------------------|--------------|------------|----------------|
| Caída de presión por metro  | 650 Pa/m     | 23 kPa/m   | 3438,5 %       |
| Espesor de la región anular | 0.36 mm      | 1.22 mm    | 238,9 %        |

*Simulación de comparación 03:*

|                             | Experimental | Simulación | Error relativo |
|-----------------------------|--------------|------------|----------------|
| Caída de presión por metro  | 820 Pa/m     | 32 kPa/m   | 3802,4 %       |
| Espesor de la región anular | 0.5 mm       | 1.23 mm    | 146,0 %        |

### Simulaciones para el análisis de sensibilidad de malla:

Se observa que la malla mas apropiada para las simulaciones es la malla híbrida espaciada aritméticamente.

| capas radiales | capas longitudinales | Caída de presión (Pa/m) |
|----------------|----------------------|-------------------------|
| 5              | 50                   | 30505                   |
| 10             | 50                   | 23832                   |
| 25             | 50                   | 16645                   |

La curva que más se les aproxima es  $y - a = \frac{c}{x - b}$

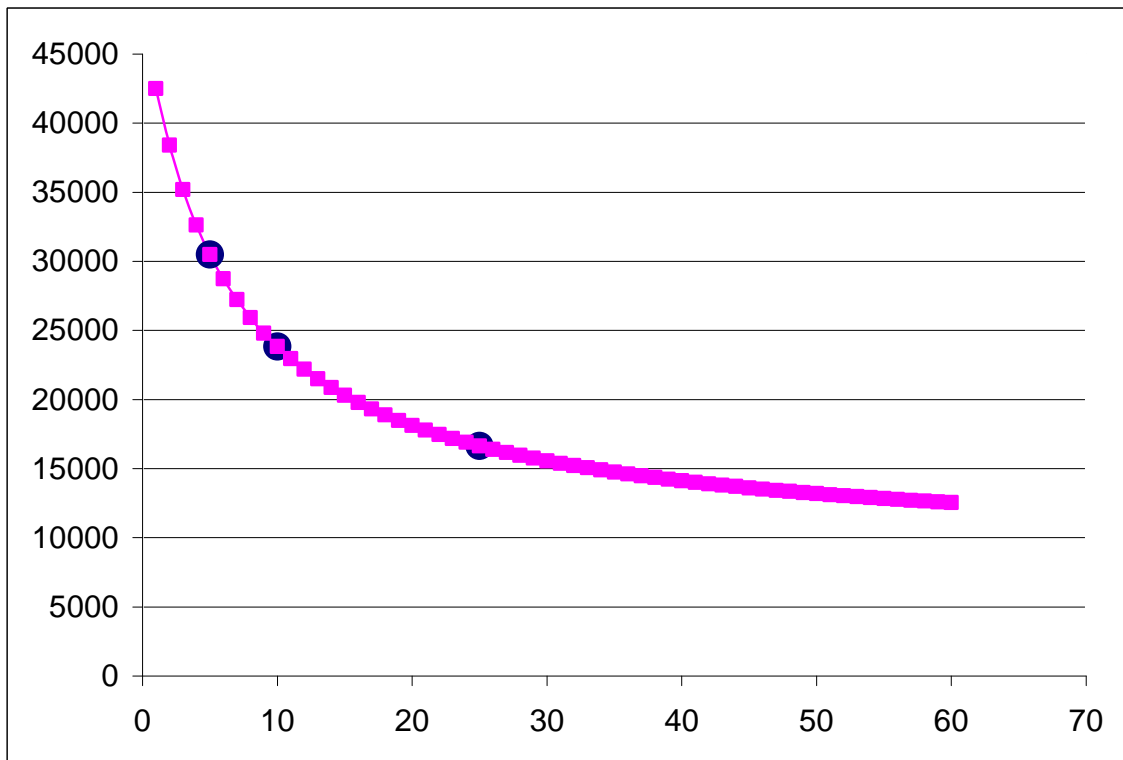
Donde:

$$a = 8882.233479$$

$$b = -6.201683292$$

$$c = 242211.3825$$

Cuya asintota horizontal está en 8882.233479 Pa/m



**Simulaciones de ensayos:**

En los mismos se observan los diferentes fenómenos de patrón de flujo.

La dificultad de los mismos se presentó en el proceso de solución, puesto que cuando el patrón de flujo pasa por un proceso de transición ya bien sea de laminar a turbulento o de cambio de patrón de flujo, el proceso de cómputo tiene la tendencia a no converger.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

Se observa un gran número de simulaciones fallidas para estudiar y optimizar los procedimientos adecuados para la obtención de buenas simulaciones. No son fracasos sino procesos que nos mostraron el camino más adecuado para llegar al éxito.

Usualmente los procesos líquido – líquido son más estables al momento de simular que los procesos gas – líquido.

En las simulaciones de flujo bifásico vertical ascendente, se muestra que el espesor de la región anular se ensancha. En unos casos es producto de un cambio del perfil de velocidad y en otros es producto de una insostenibilidad del patrón de flujo por efecto de la gravedad.

En las simulaciones de flujo bifásico horizontal se muestran casos el patrón de flujo anular se mantiene y en otros pasa a otro patrón estratificado o a un patrón nuevo, donde el flujo bifásico se divide en dos y pasa a dos flujos bifásicos paralelos que giran en direcciones opuestas entre si. Ello es debido a que la región superior del flujo no es capaz de sostenerse y cae por la acción de la gravedad.

Se observa que en la mayoría de los casos el programa desarrolla su perfil de velocidad y luego se estabiliza, y al estabilizarse el flujo, la caída de presión es lineal.

Las simulaciones de comparación no se corresponden con los valores registrados. Y se presume que ello es debido a que los valores experimentales fueron tomados cuando el perfil de velocidad ya está desarrollado mientras que la simulación desarrolla su propio perfil de velocidad. A parte de ello pudieron faltar datos, como la rugosidad de la pared o el nivel de turbulencia. Así como parámetros mal establecidos en el ANSYS® CFX™ Pre de las simulaciones que no se daban y había que suponerlos.

También se observa que es necesario hacer un análisis de sensibilidad de malla, para escoger la malla más adecuada, puesto que el breve estudio que se realizó en este trabajo permite establecer que tanto una malla muy sencilla como una malla más complicada y densa no permiten un buen desarrollo de la simulación.

También se observó la dificultad por parte del software ANSYS® CFX™ Solver de interpretación de las ondas producidas en la interfase. Lo que dificulta sus cálculos. Y su posterior interpretación. Que también puede alterar los valores esperados.

En el análisis de sensibilidad de malla se observan las limitaciones de las mallas. Mejorando en la medida que la malla híbrida es más sencilla y que las mallas espaciadas geométricamente no son óptimas para el análisis del flujo bifásico, aunque funcionan excelentemente para flujo monofásico.



## RECOMENDACIONES

Se recomienda probar otro creador de mallas debido a que el ANSYS® Workbench™ es inestable en el sistema operativo Linux.

Se recomienda usar mallas híbridas aritméticamente espaciadas para facilitar la convergencia e interpolación en las iteraciones de la simulación. Acortando el tiempo de la simulación.

Se recomienda usar modelo fluidos homogéneo, puesto que los resultados son más estables en un modelo homogéneo que en un modelo heterogéneo. Y usualmente da los mismos resultados, mas el modelo homogéneo converge en menor tiempo.

Se recomienda usar un valor de tolerancia de  $10^{-5}$  puesto que en algunas simulaciones, usualmente las más complicadas, cuando se usa  $10^{-4}$  da por concluidas las iteraciones antes de llegar al valor, arrojando un error de  $10^{-3}$ . Con  $10^{-5}$  se garantiza que al concluir las iteraciones ya ha pasado la marca de  $10^{-4}$ .

Se recomienda hacer un estudio de sensibilidad de malla previo a las simulaciones, para hallar la malla más apropiada para el estudio del fenómeno.

## BIBLIOGRAFÍA

- 📖 Baritto, L. y Miguel, L. (2007); Ascenso de burbujas de Taylor en miniconductos verticales de sección no circular: estudio numérico; Universidad Central de Venezuela, Facultad de ingeniería.
- 📖 Brauner, Neima (2003); Modelling and Control of Two-Phase Phenomena: Liquid-Liquid Two-Phase Flow Systems; Tel-Aviv University, School of Engineering, Tel-Aviv, Israel.
- 📖 Jensen, M. K. (1987), The Liquid Film and Core Region Velocity Profiles in Annular Two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow*. Vol. 13, Nº 5, pp. 615-628.
- 📖 Kashid, M. N. (2007), Experimental and Modelling Studies on Liquid-Liquid Slug Flow Capillary Microreactors, M.Tech-Ing. Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen der Universit at Dortmund genehmigte Dissertation, Sonand, India.
- 📖 Lopez, E y Ponce, M. (2004), Análisis Numérico del Flujo Laminar en Desarrollo con Alto Número de Prandtal entre dos Cilindros Concéntricos. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Caracas
- 📖 Maliska, C. (2004). Transferencia de Calor e Mecánica de los Fluidos Computacional, 2da ed. Florianópolis, Brasil: Livros Técnicos e Científicos Editora
- 📖 Nohra K., Carlos J. (2008); Modelo fluidodinámico para patrón de flujo anular en tuberías; Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería; Caracas.
- 📖 Sarica, C and Zhang, H. (2006), Development of Next Generation Multiphase Pipe Flow Prediction Tools, *Semi-Annual Technical Report*. Department of Petroleum Engineering, Tulsa University Fluid Flow Projects. Tulsa, Oklahoma.
- 📖 Shoham, O. (2006). Mechanistic Modelling of Gas-Liquid Two-Phase flow in Pipes. Universidad de Tulsa, Sociedad de Ingenieros de Petróleo
- 📖 Trallero, J.L. (1992), Estudio de las Ondas Interfaciales en Flujo Anular Líquido-Líquido, Tesis M.Sc. Ing. Hidráulica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- 📖 Zabarás, G. y Dukler, A.E. (1986). Vertical Upward Cocurrent Gas-Liquid Annular Flow. *A.I.Ch.E. Journal* (7): 829-843.

## ANEXO A

### PROCEDIMIENTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA Y LA MALLA DE COMPUTO EN ANSYS® WORKBENCH™ E INCORPORACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA Y PARÁMETROS NECESARIOS PARA LA SIMULACIÓN EN ANSYS® CFX™

*Creación del modelo y su respectiva malla en ANSYS® Workbench™:*

1. Crear el Archivo de Proyecto en el ANSYS® Workbench™ con la finalidad de guardar en él la organización de la geometría y su respectiva malla.
2. Crear la geometría mediante el ANSYS® Workbench™ DesingMoldeler.
  - 2.1. Creamos digitalmente la geometría deseada dibujando la generatriz de la misma.
  - 2.2. luego extruccionando la misma.
3. Crear la malla respectiva a la geometría mediante el ANSYS® Workbench™ CFX™ Mesh.
  - 3.1. Escogemos la estrategia de mallado extruccionado, para ello seleccionamos en el tablero Model → Mesh → Options → Meshing Strategy → Extrude 2D Mesh. luego escogemos el número de capas en la longitud, en el tablero Model → Mesh → Options → 2D Extrusion Option → Number of Layer.
  - 3.2. En el tablero en el tablero Model → Mesh → Extrude Periodic Pair → Extrude Periodic Pair, seleccionamos el principio de la malla extruccionada como Location 1 y el fin de la malla extruccionada como Location 2. Luego declaramos el periodo en el tablero Model → Mesh → Extrude Periodic Pair → Periodic Tipe (anotamos la longitud del cilindro).
  - 3.3. Creamos una inflación el la pared del lateral del cilindro en el tablero Model → Mesh → Inflacion (click boton derecho) → Insert → Inflated Boundary. Escogemos el número de capas del mismo en Number of Inflated Layer, que es el número de capas que se desea desde la pared del cilindro hacia el centro o eje del cilindro. Para mallas espaciadas aritméticamente en la inflación de la pared

dejamos el factor de expansión (Expansion Factor) en 1.2, si deseamos una malla espaciada de forma geométrica modificamos el factor de expansión a 2. También se puede variar el Tickness Multiplier para ajustar mejor la geometría.

4. Generamos una primera malla de superficie en la que podemos ver la forma de la malla que vamos a crear para ver si está acorde a lo que deseamos.
5. Si la malla de superficie no está acorde a lo que deseamos ajustamos la dimensión de los triángulos en el tablero Model → Mesh → Spacing → Defaul Body Spacing Maximum Spacing. Adaptamos y volvemos a generar la malla de superficie hasta obtener la forma deseada. Si la malla de superficie está acorde a lo que deseamos generamos la malla de volumen.

#### *Simulación en ANSYS® CFX™:*

Esta metodología es menos detallada debido a su gran complejidad.

6. Una vez generada y guardada la malla de volumen Creamos en el ANSYS® CFX™ Pre los datos previos para armar la simulación.
  - 6.1. Creamos una nueva simulación en el menú → file → New Simulation. Y escogemos el tipo de simulación general.
  - 6.2. Importamos la malla de volumen creada y guardada. En el menú File → Import Mesh, y buscamos y seleccionamos la malla de volumen que está en formato “gmt”
  - 6.3. En el tablero Simulation → Simulation Type (doble click) → Simulation Type, seleccionamos el modo de simulación Estado Permanente (Steady State).
  - 6.4. En el tablero Simulation → Default Domain (doble click) → General Options → Fluids list, seleccionamos los fluidos con los que trabajaremos, cuando seleccionamos dos fluidos el programa abre otras pestañas. Cuando el fluido no existe en la tabla de materiales tenemos que crearlo en el tablero Simulation → Materials (click boton derecho) → Insert → Material, le damos el nombre y agregamos sus propiedades

- 6.5. Para trabajar con la gravedad y la flotación en la carpeta Default Domain → Buoyancy, cambiamos la opción a Bouyand y agregamos las componentes xyz de la aceleración de gravedad así como la densidad de referencia.
- 6.6. En la carpeta Default domain → Multiphase Option, activamos el modelo homogéneo (Homogeneous Model). Y en Default Domain → Turbulence → Option escogemos el modelo de turbulencia k-Epsilon.
- 6.7. Creamos las diferentes regiones de la superficie de la malla de volumen en el tablero Simulation → Default Domain (click boton derecho) → Insert → Boundary, colocamos el nombre de la región y agregamos sus propiedades.
  - 6.7.1. Para la región de entrada colocamos la propiedad de Inlet, escogemos la región y le damos la condición de entrada de la velocidad normal o el perfil de velocidad según la expresión matemática que hallamos creado.
  - 6.7.2. Para la región de salida colocamos la propiedad de outlet, escogemos la región y le damos la condición de salida de la presión relativa.
  - 6.7.3. Para la región de pared colocamos la propiedad de wall, escogemos la región y le damos la condición de no deslizamiento con rugosidad cero (0).
- 6.8. Creamos todas las expresiones matemáticas necesarias para la simulación en el tablero simulation → Expressions (doble click) → Expressions (click boton derecho) → New, colocamos el nombre de la expresión, que es la que invocaremos en las condiciones de las regiones creadas. Las expresiones matemáticas usada en las simulaciones están en el anexo B.
- 6.9. Colocamos el número máximo de iteraciones y la tolerancia al error en el tablero Simulation → Solver → Solver Control (doble click)
7. Una vez que todos lo datos necesarios para la simulación están colocados activamos el solucionador, el ANSYS® CFX™ Solver, en el menú File → Write Solver File.
8. Luego de terminado el proceso de solución activamos el visualizador ANSYS® CFX™ Post.
  - 8.1. Creamos un plano de visualización en el plano XZ. Donde podemos ver la caída de presión, la velocidad superficial en la dirección z y la facción volumétrica.

- 8.2. Creamos una isosuperficie de visualización con la variable de fracción volumétrica a 0,5. Donde podemos ver la forma de la interfase entre los dos fluidos.
- 8.3. Crear una línea a lo largo del eje, desde el punto (0,0,0) al punto (0,0,L) donde “L” es la longitud del cilindro. Tomado como referencia la misma crear la gráfica de presión a lo largo de Z.
- 8.4. Mediante la herramienta de consulta puntual vemos la longitud de desarrollo del perfil de velocidad.
- 8.5. Mediante la herramienta de consulta puntual vemos el valor de la presión en dos (2) puntos del eje donde el fluido ya está desarrollado. Con ello calculamos la caída de presión por metro.
- 8.6. Mediante la herramienta de consulta puntual vemos la coordenada x o y del espesor de película a la salida y con ella calculamos el espesor de película a la salida.

## ANEXO B

### EXPRESIONES MATEMÁTICAS USADAS EN LAS SIMULACIONES:

**Cuando se usa un porcentaje de espesor de capa del anulo a la entrada:**

| <i>Nombre</i>   | <i>Abreviatura</i> | <i>Expresión</i>                           |
|---|--------------------|--|
| Diámetro de tubería   | Dtu                | valor numérico                             |
| Ecuación de fracción volumétrica del fluido externo (que fluye por el anulo)  | EqFvFe             | $\text{step}((x^2+y^2-R_{Fi}^2)/(1[m^2]))$ |
| Ecuación de fracción volumétrica del fluido interno (que fluye por el núcleo) | EqFvFi             | $1-\text{EqFvFe}$                          |
| Ecuación del perfil de velocidad  | EqV                | $V_{Fe}+\text{EqFvFi}*(V_{Fi}-V_{Fe})$     |
| Radio del fluido interno (que fluye por el núcleo)                            | RFi                | $R_{tu}*T_{Fi}$                            |
| Radio de la tubería   | Rtu                | $D_{tu}/2$                                 |
| Tasa del fluido interno (%)   | TFi                | valor numerico                             |
| Velocidad media del fluido externo  | VFe                | $V_{sFe}/(1-T_{Fi}^2)$                     |
| Velocidad media del fluido interno  | VFi                | $V_{sFi}/(T_{Fi}^2)$                       |
| Velocidad superficial del fluido externo (que fluye por el anulo)             | VsFe               | valor numerico                             |
| Velocidad superficial del fluido interno (que fluye por el núcleo)            | VsFi               | valor numérico                             |

**Cuando se usa el espesor de la región anular a la entrada:**

| <i>Nombre</i>   | <i>Abreviatura</i> | <i>expresión</i>                                      |
|---|--------------------|---|
| Diámetro de tubería   | Dtu                | valor numérico  |
| Ecuación de fracción volumétrica del fluido externo (que fluye por el anulo)  | EqFvFe             | $\text{step}((x^2+y^2-R_{Fi}^2)/(1[m^2]))$            |
| Ecuación de fracción volumétrica del fluido interno (que fluye por el núcleo) | EqFvFi             | $1-\text{EqFvFe}$                                     |
| Ecuación del perfil de velocidad  | EqV                | $V_{Fe}+\text{EqFvFi}*(V_{Fi}-V_{Fe})$                |
| Radio del fluido interno (que fluye por el núcleo)                            | RFi                | $R_{tu}-\text{esp}$                                   |
| Radio de la tubería   | Rtu                | $D_{tu}/2$  |
| Espesor de la capa anular   | esp                | valor numérico  |
| Velocidad media del fluido externo  | VFe                | $V_{sFe}*R_{tu}^2/(\text{esp}*(2*R_{tu}-\text{esp}))$ |
| Velocidad media del fluido interno  | VFi                | $V_{sFi}*(R_{tu}/(R_{tu}-\text{esp}))^2$              |
| Velocidad superficial del fluido externo (que fluye por el anulo)             | VsFe               | valor numérico  |
| Velocidad superficial del fluido interno (que fluye por el núcleo)            | VsFi               | valor numérico  |



**Cuando se usa el espesor de la región anular a la entrada en una tubería de sección octagonal:**

| <i>Nombre</i>   | <i>Abreviatura</i> | <i>expresión</i>                                     |
|---|--------------------|--|
| Diámetro de tubería   | Dtu                | valor numérico                                       |
| Ecuación de fracción volumétrica del fluido externo (que fluye por el anulo)  | EqFvFe             | $\text{step}((x^2+y^2-R_{Fi}^2)/(1[m^2]))$           |
| Ecuación de fracción volumétrica del fluido interno (que fluye por el núcleo) | EqFvFi             | $1-EqFvFe$   |
| Ecuación del perfil de velocidad  | EqV                | $V_{Fe}+EqFvFi*(V_{Fi}-V_{Fe})$                      |
| Radio del fluido interno (que fluye por el núcleo)                            | RFi                | $R_{tu}-esp$   |
| Radio de la tubería   | Rtu                | $D_{tu}/2$   |
| Espesor de la capa anular   | esp                | valor numérico                                       |
| Velocidad media del fluido externo  | VFe                | $0.9230167002*V_{sFe}*R_{tu}^2/(esp*(2*R_{tu}-esp))$ |
| Velocidad media del fluido interno  | VFi                | $0.9230167002*V_{sFi}*(R_{tu}/(R_{tu}-esp))^2$       |
| Velocidad superficial del fluido externo (que fluye por el anulo)             | VsFe               | valor numérico                                       |
| Velocidad superficial del fluido interno (que fluye por el núcleo)            | VsFi               | valor numérico                                       |