



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Desarrollo de un modelo  
bifásico para el transporte  
de petróleo pesado con base  
en redes neuronales**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecánico**

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

Diego Fernando Galavíz López

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Alejandro Rodríguez Valdés



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Ingresa 2019

## **Jurado Asignado**

**Presidente:** Dr. Jose Luis Fernández Zayas

**Vocal:** Dr. Alejandro Rodríguez Valdés

**Secretario:** Dr. Francisco Javier Solorio  
Ordaz

**1er Suplente:** Dr. Arturo Palacio Pérez

**2do Suplente:** Dr. José Enrique Guzmán  
Vázquez

## Agradecimientos.

- A mis tías Maru, Melisa y Patricia por su gran apoyo en toda mi vida y tomar el rol de madre.
- A mis abuelas Rafaela y Mamá Maru, quienes me apoyaron toda la vida y me criaron.
- A mi novia Estef, por todo su apoyo en estos casi dos años a su lado. Te amo y tú sabes que sin ti no hubiera logrado esto, es un logro conjunto gracias por todo tu apoyo.
- A mi tío Alejandro Gallo, por todo su apoyo en los momentos difíciles de mi vida.
- A mi tutor el Dr. Alejandro Rodríguez Valdés, que me dio la oportunidad de ser becario en el Instituto de Ingeniería y ha sido un gran guía, un gran mentor; pero sobre todo un gran ser humano.
- Al Dr. Arturo Palacio Pérez, que me ha apoyado en todo momento y me ha compartido un poco de su gran experiencia y conocimiento ingenieril.
- Al M.I Jonathan Hernández, que ha sido un gran maestro, compañero de trabajo y un excelente amigo; sin el cual esta tesis no hubiera sido posible.
- AL Dr. Enrique Guzmán que siempre me brindó sus conocimientos y apoyo
- A mi compañero y buen amigo Emanuel Osorio, por su gran apoyo en la realización de experimentos.
- A todos los mexicanos, que con su esfuerzo e impuestos me dieron la oportunidad de tener un mejor futuro al estudiar lo que más amo.
- A todos mis profesores de la Facultad de Ingeniería de la UNAM
- Al instituto de Ingeniería de la UNAM
- Al Fondo Sectorial de Hidrocarburos SENER-Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología por apoyarme con una beca para poder llevar a cabo este documento y facilitarme la utilización de los equipos (Proyecto 166923).

*Gracias a todos y cada uno de ustedes, al igual que Sir Isaac Newton dijo: “si he conseguido ver más lejos, es porque me he parado en hombros de gigantes”*

*“No necesito saberlo todo, tan sólo necesito saber dónde encontrar aquello que me hace falta, cuando lo necesite”.*

Albert Einstein (1879-1955)

*“La ignorancia afirma o niega rotundamente; La ciencia duda”*

Voltaire (1694-1778)

*“Si pasas por el infierno sigue adelante”*

Sir Winston Churchill (1874-1965)

*“Todo fluye, nada permanece”*

Heráclito (540 a.c – 480 a.c)

*“To live is to risk it all, Otherwise you’re just an inert chunk of randomly assembled molecules drifting wherever the universe blows you”*

Rick Sánchez

*“Prefiero tener preguntas que no pueden ser respondidas, que respuestas que no pueden ser cuestionadas” PhD Richard Feynman (1918-1988)*

## **I. Resumen.**

En el presente trabajo se expone la importancia en la determinación del gradiente de presión en flujos bifásicos, dentro de tuberías horizontales con fase líquida en alta viscosidad, para el transporte de petróleo pesado. El estudio se enfoca en la modificación al modelo de Lockhart-Martinelli (1949), específicamente la ecuación analítica propuesta por Chisholm (1967) para este modelo. La modificación fue realizada considerando un enfoque de aplicación al diseño ingenieril, de aplicación “sencilla” y que otorgara la capacidad de atender cualquier régimen de flujo para cada fase.

Esto se llevó a cabo mediante la programación y aplicación de una Red Neuronal Artificial, aprovechando las capacidades que esta herramienta matemática (perteneciente al campo de la inteligencia artificial) ofrece. Dentro de estas capacidades se puede destacar, su “adaptabilidad” y habilidad en la detección de patrones y generación de correlaciones que modelan fenómenos complejos y de múltiples variables. Por ello se aplicó, con el objetivo de aproximar el multiplicador multifásico utilizando una sola ecuación que describiera las combinaciones en régimen de flujo para cada fase, y de esta forma mejorar la predicción del gradiente de presión en flujos bifásicos con fase líquida de alta viscosidad ( $\mu_L \sim 10^{-3} [Pa s]$ ), para posteriormente ser validado y comparado con el modelo Lockhart-Martinelli (1949) - Chisholm (1967), y el modelo (mecanicista) unificado de la universidad de Tulsa.

## II. Nomenclatura.

Letras Mayúsculas Romanas.

A	Área de la sección transversal de tubería.
C	Constante de Chisholm.
D	Diámetro de la tubería.
G	Flux.
H	Colgamiento instantáneo.
L	Longitud de la tubería.
$\dot{M}$	Flujo másico de la Mezcla.
$\dot{Q}$	Flujo Volumétrico de la mezcla.
P	Presión.
S	Término fuente.
$U_{Sk}$	Velocidad superficial de la fase k.
$\tilde{U}_k$	Velocidad instantánea de la fase k
Re	Número de Reynolds (Monofásico).
$Re_{Sk}$	Número de Reynolds considerando velocidad superficial de la fase k.

Letras Minúsculas Romanas.

a	Razón instantánea de la fase líquida.
b	Razón instantánea de la fase gaseosa.
f	factor de pérdidas por fricción (factor de Darcy).
g	Constante de aceleración gravitacional.
h	Carga hidráulica.
$h_f$	Pérdidas de carga hidráulica por fricción.
$\dot{m}_k$	Flujo másico de la fase k.
$\dot{q}_k$	Flujo volumétrico de la fase k.
r	Vector posición en sistema de coordenadas generalizado.
t	Tiempo.
x	Calidad de la mezcla.

Letras Griegas.

$\alpha$ .	Fracción volumétrica de la fase k.
$\theta$ .	Orientación del ducto con respect a la horizontal.
$\mu$ .	Viscosidad dinámica

$\rho$  Densidad.  
 $\Omega$  Volumen de control  
 $\varphi$  Multiplicador bifásico  
 $\Psi$  Variable de transporte.  
 $T$  Coeficiente de intercambio difusivo  
 $X$  Parámetro de Martinelli.

Subíndices y Superíndices.

L indica fase líquida  
G indica fase gaseosa  
h indica mezcla homogénea  
K indica fase k-ésima.  
i indica la coordenada i-ésima.

## **Contenido.**

### **1. Introducción.**

- 1.1 Antecedentes.**
- 1.2 Justificación del Problema.**
- 1.3 Objetivos.**
- 1.4 Hipótesis.**

### **2. Marco Teórico.**

#### **2.1 Enfoques de análisis.**

- 2.1.1. Enfoque Experimental.
- 2.1.2. Enfoque Numérico (simulación).
- 2.1.3. Enfoque riguroso.
- 2.1.4. Enfoque Mecanicista.

#### **2.2 Leyes de conservación.**

#### **2.3 Variables del flujo bifásico.**

- 2.3.1. Gasto másico.
- 2.3.2. Caudal volumétrico.
- 2.3.3. Fracción volumétrica de líquido (Colgamiento) y fracción volumétrica de gas (fracción seca).
- 2.3.4. Colgamiento instantáneo de líquido.
- 2.3.5. Velocidades Superficiales.
- 2.3.6. Velocidad instantánea.
- 2.3.7. Velocidad de deslizamiento.
- 2.3.8. Viscosidad de Mezcla.

- 2.4 Flujo bifásico en conducto horizontal.**
  - 2.4.1. Modelo homogéneo sin deslizamiento.
  - 2.4.2. Modelo unificado TUFFP.
  - 2.4.3. Modelo separado Lockhart-Martinelli.
- 2.5 Redes Neuronales Artificiales.**

### **3. Metodología Experimental.**

- 3.1 Nuevo Circuito experimental del Instituto de Ingeniería.**
- 3.2 Subsistema hidráulico.**
- 3.3 Subsistema neumático.**
- 3.4 Subsistema de instrumentación, adquisición y control.**
- 3.5 Matriz experimental.**
- 3.6 Procedimiento experimental.**

### **4. Resultados Experimentales y Análisis.**

- 4.1 Medición de viscosidad.**
- 4.2 Validación del sistema experimental (Monofásico).**
- 4.3 Aplicación del modelo Lockhart - Martinelli (Chisholm 1967).**
  - 4.3.1. Algoritmo
  - 4.3.2. Resultados Obtenidos
- 4.4 Aplicación del modelo unificado TUFFP.**
  - 4.4.1. Algoritmo
  - 4.4.2. Resultados Obtenidos
- 4.5 Aplicación de modelo propuesto RNA.**
  - 4.5.1. Algoritmo
  - 4.5.2. Resultados Obtenidos
  - 4.5.3. Comparativa de los modelos
- 4.6 Discusión.**

## **5. Conclusiones.**

- 5.1 Contribuciones.**
- 5.2 Conclusiones.**
- 5.3 Recomendaciones y trabajo a futuro.**

## **6. Referencias.**

## **7. Apéndices.**

## **1. Introducción.**

En este capítulo se exponen los aspectos generales de la determinación del gradiente de presión en flujos con dos fases y tuberías con orientación horizontal, siendo este el tema central de esta tesis. Se incluye la motivación para el desarrollo de esta, así como los objetivos que fueron perseguidos y sus limitaciones. Pasando por una descripción breve de los antecedentes de estudio referentes a los modelos utilizados en la predicción en la caída de presión en flujos multifásicos horizontales. Se finaliza con un breve párrafo que describe la tendencia en implementación de inteligencia artificial en la resolución de problemas complejos en ingeniería.

## 1.1 Antecedentes.

El flujo multifásico se encuentra en una amplia cantidad de campos industriales y de la ingeniería, así como en la propia naturaleza, ya que se denomina flujo multifásico a todos aquellos flujos que involucren más de una fase. Pudiendo ser o no de la misma especie química ej. vapor de agua y agua líquida.

Debido a su extensa aplicación en distintos campos, se han desarrollado diversas investigaciones que buscan ampliar el entendimiento de este fenómeno físico, así como otorgar una mejor descripción y predicción de sus características principales. Dentro de estos campos en la industria es destacable la importancia en la predicción de la caída de presión en tuberías horizontales, que es el tema central del presente trabajo.

El modelo Lockhart-Martinelli (1949), es uno de los modelos más sencillos y utilizado ampliamente en investigaciones científicas, así como en el diseño de distintos elementos o sistemas industriales en los que se presenta el flujo bifásico. Este modelo ha proveído de resultados confiables para el diseño ingenieril debido su capacidad de predicción en la caída de presión en flujos multifásicos, mismos que han sido evaluados en diversos trabajos, de los que se pueden destacar los llevados a cabo por Cravino (2009), en el que se evalúa el desempeño de cuatro modelos mecanicistas, nueve modelos homogéneos y diecisiete correlaciones utilizados comúnmente en la predicción del gradiente de presión de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías verticales, y en el que se reporta que el modelo de Lockhart-Martinelli se encuentra entre los tres modelos con mejor desempeño, a pesar de que originalmente no se desarrolló para flujos verticales; y Cui Chen (2010) en este último estudio se analizaron y caracterizaron cada uno de los datos experimentales con los que se obtuvo la correlación de Lockhart-Martinelli y se determinó que el modelo es capaz de otorgar resultados con un margen de error promedio absoluto entre el 15% y 20% (agua-aire).

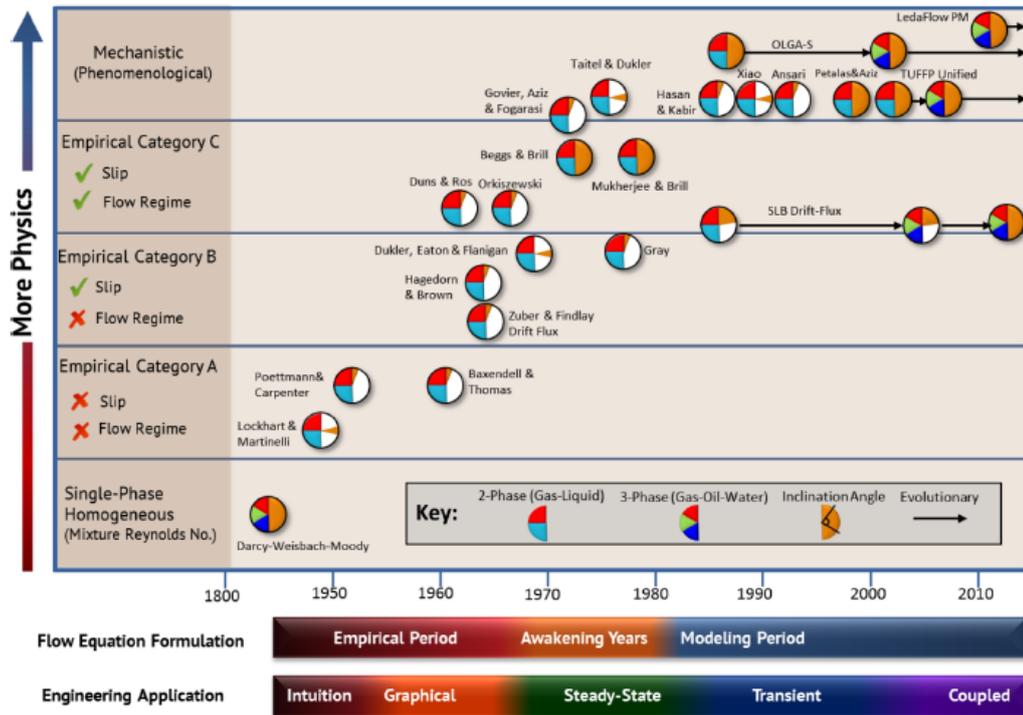
Si bien el modelo original fue publicado en el año de 1949<sup>1</sup>, se ha posicionado como uno de los modelos ampliamente utilizados en áreas de especialización como lo son: energía nuclear (R.Kong 2018), geotérmica (Rizaldy 2016), refrigeración (Madhavi Sardeshpande 2013) y la industria petrolera. También se han generado distintas críticas entorno al modelo e incluso es catalogado actualmente por algunos autores Shoham Ovadia (2006) y grupos de investigación TU-FFP, Schlumberger como un modelo empírico y sin fundamento teórico. Esto es posiblemente debido al crecimiento que se suscitó a mediados del siglo XX y principios del siglo XXI, en los trabajos de investigación relacionados a la mejora

---

<sup>1</sup> Se especula que el modelo fue publicado por Lockhart hasta el año de 1949, debido a que su investigación fue considerada "secreto militar". Tal como lo expone el autor Genick Bar-Meir en su publicación "*Basics of Fluid Mechanics*".

en la predicción de la caída de presión en flujos multifásicos a lo largo de principalmente tuberías que transportan hidrocarburos y que desemboca en tres categorías distintas de enfoque en cuanto al análisis del fenómeno físico: experimental, numérico y riguroso en los que se ahondará en la sección 2.1 del presente texto.

Sin embargo a pesar de la extensa cantidad de investigaciones que fueron publicadas, relacionadas a la generación de modelos capaces de mejorar la predicción en la caída de presión para flujos multifásicos y de las cuales se pueden destacar las correlaciones de Beggs y Brill (1973), Taitel y Duckler (1976), Singh y Griffith (1970), a su vez trajeron consigo nuevos nichos de investigación en el campo de flujos multifásicos como lo es el análisis y clasificación de la distribución espacial de las fases y su predicción mediante los mapas de patrones de flujo (véase sección 2.4), y de los cuales se obtuvo información relevante acerca de la evolución espacial y temporal del mismo. No obstante, se mantuvieron las limitaciones de cada modelo a ser aplicado a ciertos dominios (patrones de flujo, diámetros de tubería o propiedades físicas de las sustancias) en los que mostraban su mejor desempeño y para los cuales fueron diseñados. Para afrontar este hecho se desarrollaron modelos más complejos que los anteriormente mencionados que se vinieron desarrollando a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, de los que es importante destacar el software OLGA (1990-2018) desarrollado por los laboratorios SINTEF, en el proyecto LedaFlow, para posteriormente vender dicho software a la empresa Schlumberger, así como el TUFFP Modelo unificado (1999-2018) que se desarrolla por un grupo de trabajo de la universidad de Tulsa y el cual predice y describe tanto la caída de presión para cualquier patrón de flujo o transición de este, así como otras características importantes del flujo, por medio del buen manejo y selección de ciertas condiciones de cierre.



1.1 Etapas históricas en el desarrollo de modelos para determinar el gradiente de presión en flujos multifásicos.

Fuente: Shippen, M. & Bailey, W.J. 2012 p.4147

Tomando en cuenta la descripción histórica del párrafo anterior y retomando la idea inicial de la presente sección en cuanto al modelo Lockhart-Martinelli (1949), es importante destacar que casi dos décadas después de la publicación de su trabajo *“Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes”*, fue publicada una de las investigaciones más disruptivas que refutan las críticas de algunos investigadores que catalogaban al modelo como empírico y sin base teórica. Este fue el trabajo realizado por Chisholm (1967) titulado *“A Theoretical Basis for the Lockhart-Martinelli Correlation for Two Phase Flow”*, en el cual logra demostrar que el fundamento teórico de la correlación. Sin embargo, debido a la complejidad de las ecuaciones Chisholm logra, *“a prueba y error”* (citado textualmente de su trabajo) la obtención de una ecuación sencilla que describiera la solución gráfica, originalmente presentada en el modelo de Lockhart-Martinelli (1949). Es importante mencionar que Chisholm tuvo como objetivo desarrollar un modelo, *“sencillo”* que tuviese la capacidad de describir el fenómeno físico, principalmente para ser aplicado como una *“excelente”* herramienta en el diseño ingenieril.

El trabajo realizado por Chisholm (1967) hoy en día es ampliamente conocido ej. (Ron Darby 2001) como Lockhart-Martinelli (1949), sin discriminar el hecho de que la ecuación “teórica” y simplificada que reemplaza la solución gráfica original fue deducida por Chisholm. Igualmente su trabajo detono una tendencia a la modificación de su ecuación propuesta, ya que en diversos trabajos se ha buscado ampliar el dominio de aplicabilidad o ajustarse a condiciones particulares, de los cuales son destacables los trabajos de Hemeida y Sumait (1988) en el que se modificó el modelo original utilizando un software estadístico (SAS) y datos que se extrajeron en condiciones reales de transporte de crudo y en conjunto lograron obtener una serie de parámetros de ajuste para sus condiciones de operación mejorando la predicción en la caída de presión. Otro trabajo que muestra la versatilidad del método se muestra en el trabajo propuesto por Farooqi y Richardson (1982) en el que se modifica el modelo añadiendo un parámetro de corrección para poder ser aplicado a fluidos no Newtonianos. Otras publicaciones de años más recientes en las que se muestra cómo se puede modificar el modelo original son las de Muzychka y Awad (2010) para flujos en micro canales, Kutty y Babu (2017) quienes obtienen el parámetro de Martinelli mediante el uso de dinámica de fluidos computacional y acoplándolo al modelo. Finalmente podemos mencionar la modificación al modelo más recientemente publicado de Ran Kong (2018) en el cual se busca determinar la relación entre la constante de Chisholm y la variación en el diámetro de la tubería.

Si bien no existe una publicación que realice una revisión o compendio de todas modificaciones realizadas, se puede remitirse a la referencia M.M. Awad(2012), en la que se mencionan ampliamente distintas modificaciones al modelo de Lockhart-Martinelli (1949).De igual forma en dicha publicación se expone como alternativa de estudio el aprovechamiento y explotación de recursos computacionales de los que se dispone en la actualidad para obtener soluciones mediante la simulación numérica así como la implementación de redes neuronales artificiales. Cuestión que fue abordada por los trabajos de M. Attia (2015) con su publicación titulada “*Pressure Drop Due to Multiphase Flow Using Four Artificial Intelligence Methods*” y publicada por la Society of Petroleum Engineers (SPE) y el trabajo de Nirjhar Bar (2010) con su publicación titulada “*Prediction of pressure drop using artificial neural network for non-Newtonian liquid flow through piping components*” la cual fue publicada en el Journal of Petroleum Science and Engineering. Estos dos trabajos de investigación son solo una muestra de que la tendencia que existe a la implementación de la Inteligencia Artificial (I.A) en la resolución de problemas “complejos” en la física e ingeniería, ha llegado a la rama de los flujos multifásicos con excelentes resultados, y es por ello que el presente trabajo toma este enfoque, al aplicar las herramientas provenientes del campo de la inteligencia artificial, específicamente la implementación de Redes Neuronales Artificiales (RNA) basado en el modelo de Lockhart-Martinelli (1949), concretamente en la metodología y ecuación propuesta por Chisholm(1967) .

## 1.2 Justificación del Problema.

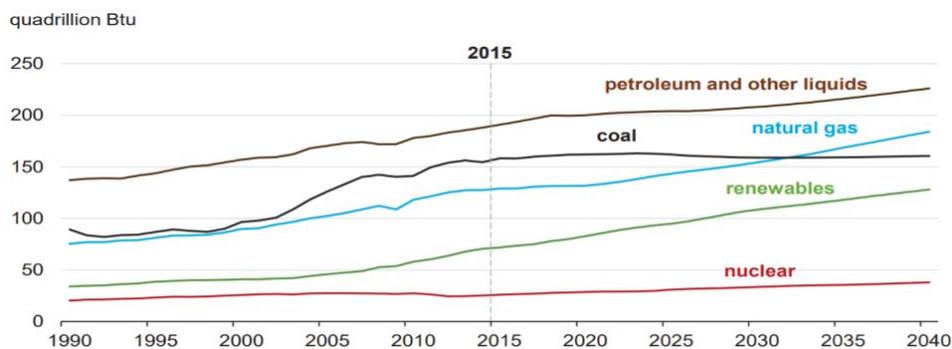
El sector energético, es probablemente el sector de mayor importancia para cada nación o región en el mundo ya que contribuye al crecimiento y desarrollo económico de estas. Como lo muestra el Foro económico Mundial (World Economic Forum) en su presentación “Energy For Economic Growth” en el congreso llevado a cabo en el año 2012. El sector energético contribuye principalmente a través de dos formas. La primera se debe al importante rol que desempeña el sector energético, en la generación de empleos y valor mediante la extracción, transformación y distribución de bienes y servicios energéticos en la economía de una nación.

En segundo lugar, la energía sirve como base al resto de la economía de una nación, al ser un insumo para casi todos los bienes y servicios.

Por la tanto cabe mencionar el enorme impacto que tienen los estudios e informes realizados por distintos órganos internacionales, en los que se muestran las perspectivas energéticas globales, así como su comportamiento en el mercado internacional. Derivadas del comportamiento macro y microeconómico de cada región del mundo, así como de las reformas, políticas y acuerdos tanto nacionales como internacionales.

Siendo estos informes una gran herramienta para las diferentes naciones o regiones del mundo con la finalidad de generar planes de acción que favorezcan su crecimiento económico y bienestar.

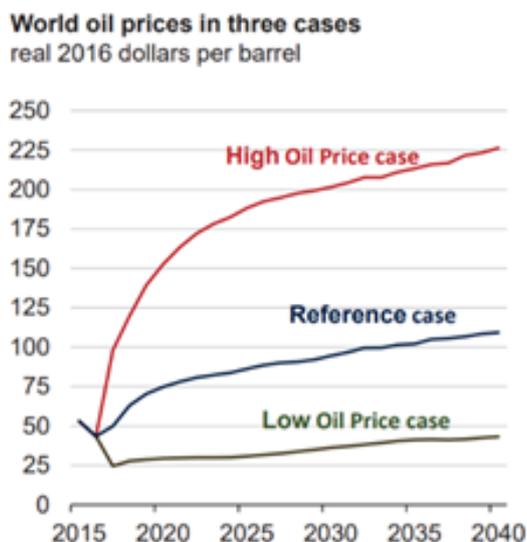
Uno de los principales informes es el emitido por la Agencia Internacional de Energía (IEA international Energy Agency), que en su reporte correspondiente al año 2017 (del cual se extrajo la siguiente gráfica) se observa el panorama global proyectado a 2040 en materia energética.



1.2 Pronóstico de crecimiento en fuentes de energía.

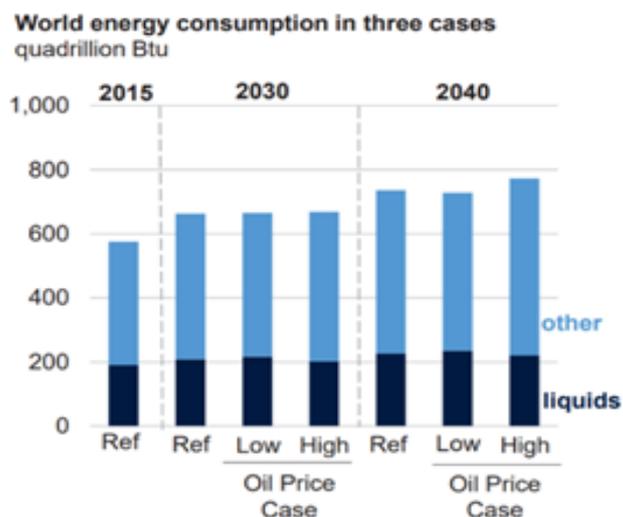
Fuente: IEA (2017)

Del cual podemos observar un crecimiento evidente en materia de energías renovables, así como de gas natural como fuentes de energía a nivel global. Igualmente, de esta grafica es destacable apuntar que el petróleo y otros líquidos siguen siendo la mayor fuente de energía. Del mismo informe realizado por la IEA se analiza de forma asilada al petróleo y se muestran las siguientes gráficas.



1.3 Pronósticos de precio de petróleo 2015-2040

Fuente: IEA (2017)



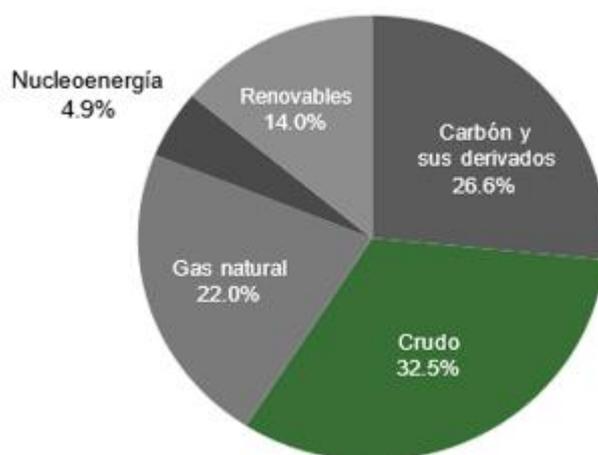
1.4 Pronósticos de consumo mundial de hidrocarburos 2015-2040

Fuente: IEA (2017)

En la gráfica de la figura 1.3, se observa el comportamiento económico del petróleo, mostrando tres casos posibles en el pronóstico del precio por barril a nivel mundial. Del cual se puede observar el precio al alza (225 USD/bbl), el precio a la baja (45 USD/bbl) y finalmente un precio promedio (109 USD/bbl) para el año 2040.

En cuanto a la gráfica presentada en la figura 1.4 se observa que, sirve como complemento de figura 1.3 ya que, se muestra el consumo esperado de petróleo como fuente de energía en cualquier de los escenarios económicos mostrados. De lo que se puede destacar el hecho de permanecer casi constante e independiente del precio que se tenga, ya que en el caso al alza se esperaría un 28% de consumo a nivel global, mientras que para el caso promedio y a la baja se esperarían 31% y 32% respectivamente en consumo global.

Como se muestra en la figura 1.5, en el caso particular de México el balance nacional de energía para el año 2016 muestra que los hidrocarburos aportaron el 81.7% (32% proveniente del petróleo) a la producción de energía primaria.



1.5 Fuentes de producción de energía primaria en México

Fuente: Secretaría de energía (2018). Balance Nacional de Energía. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia>

Como se observa a continuación, en la figura 1.6, México de su producción total de petróleo, el 53% es petróleo pesado<sup>2</sup>. De igual forma se observa que el

<sup>2</sup> El instituto Americano del Petróleo (API American Petroleum Institute) considera petróleo pesado aquel con  $10^{\circ} - 22.3^{\circ}$  de gravedad API correspondientes a densidades entre  $920 - 1000 \frac{kg}{m^3}$  y con valores de viscosidad dinámica de  $100 - 10000 \text{ cP}$  a  $15.6^{\circ}\text{C}$  de temperatura. Se consideran extrapesados aquellos con gravedad API de  $10^{\circ}$  o menor,

primer semestre del año 2018 la producción de petróleo pesado aumento en un 4.2% dejando un total del 57.2% del total de su producción.

Esto nos indica que las aportaciones de hidrocarburos (siendo más de la mitad de la producción crudo pesado) al sector energético de nuestro país influyen directamente en el PIB y su crecimiento.



indicadores petroleros

Producción de hidrocarburos líquidos

(miles de barriles diarios)

	Total	Petróleo crudo							Líquidos del gas <sup>b</sup>
		Total crudo	Por tipo			Por bloques <sup>a</sup>			
			Pesado	Ligero	Superligero	Aguas Someras	Sur	Norte	
2017	2,227	1,348	1,049	689	210	1,584	267	98	279
Enero	2,318	2,020	1,078	716	226	1,625	289	105	299
Febrero	2,326	2,016	1,071	724	221	1,628	284	104	310
Marzo	2,321	2,018	1,071	723	224	1,634	282	102	303
Abril	2,306	2,012	1,066	725	221	1,633	279	100	295
Mayo	2,312	2,020	1,079	724	216	1,645	276	99	292
Junio	2,299	2,008	1,077	718	212	1,637	273	98	292
Julio	2,271	1,986	1,065	712	209	1,618	270	98	285
Agosto	2,196	1,930	1,068	656	206	1,572	262	96	266
Septiembre	1,993	1,730	882	646	202	1,378	257	95	263
Octubre	2,163	1,902	1,049	652	201	1,561	248	93	261
Noviembre	2,110	1,867	1,052	619	196	1,533	240	93	243
Diciembre	2,109	1,873	1,028	653	192	1,539	242	92	236
2018	2,132	1,881	1,076	587	218	1,553	234	94	250
Enero	2,186	1,929	1,068	629	232	1,593	242	93	257
Febrero	2,149	1,895	1,088	587	220	1,561	240	93	254
Marzo	2,111	1,864	1,069	577	218	1,534	238	93	247
Abril	2,144	1,886	1,087	585	213	1,558	233	95	259
Mayo	2,109	1,867	1,079	579	209	1,545	227	95	242
Junio	2,090	1,846	1,068	566	213	1,523	227	96	244

a. Estructura a partir de 2017.

b. Incluye condensados.

Nota: Antes del 2017 los bloques Aguas Someras correspondían a las regiones marítimas, el bloque Sur a la Región Sur y el bloque Norte a la Región Norte.

© Petróleos Mexicanos \* Orgullosamente hecho en PEMEX

1.6 Producción de hidrocarburos líquidos 2017-2018

Fuente: PEMEX. (2018). Recuperado de <http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Paginas/Indicadores-Petroleros.aspx>

Situando al crudo pesado como un importante activo económico para el país y a su vez representando un gran reto técnico y económico, ya que los costos operativos del transporte de petróleo se encuentran directamente relacionados con la cantidad de energía requerida para producir la potencia de bombeo capaz de elevar la presión, lo cual trae consigo aspectos adicionales a tomar en cuenta como la seguridad y fiabilidad del sistema de las tuberías. Debido a la posibilidad

correspondiente a una densidad mayor a  $1000 \frac{Kg}{m^3}$ , para los mismos rangos de viscosidad dinámica que el petróleo pesado.

de superar el esfuerzo de cedencia de esta. Como se muestra en la ecuación 25 en la sección 2.4 de este trabajo, todos estos retos técnicos son causa directa de la viscosidad, para un flujo horizontal. Ante dichos retos se plantean distintas alternativas para mejorar el transporte de petróleo pesado ej. adición de surfactantes Saptoro (2015), flujo lubricado y el uso de bio-reductores de viscosidad Suarez-Domínguez (2017).

La determinación en cuanto a la aplicación de alguno de los métodos citados como mejoradores de flujo viene dada directamente por la rentabilidad del método. Es decir, se trata de una cuestión de carácter económico en la que se requiere tener la mayor exactitud en la determinación de la caída de presión en los ductos que transportan crudo pesado, con la finalidad de inyectar o suministrar la cantidad necesaria de la sustancia que mejore el flujo del petróleo y que a su vez esta cantidad dosificada se encuentre dentro de parámetros de viabilidad económica.

Sin embargo, como se mencionó brevemente en la sección anterior y como se profundizará a lo largo de la sección 2.1 y 2.2 del presente texto, la complejidad del flujo bifásico lo convierte en un problema multivariable de parámetros no concentrados y no lineal. Dificultando así la obtención de un modelo matemático que describa el comportamiento y prediga de forma rigurosa la caída de presión.

Una herramienta que ha probado ser muy eficaz en la resolución de problemas no lineales e incluso estocásticos, mediante su gran capacidad de manejo de grandes volúmenes de datos y múltiples variables relacionadas ej. aproximando una solución a la ecuación de Navier-Stokes (Baymani 2014), o incluso siendo el método con mejor desempeño en comparación con correlaciones tradicionales para determinar el gradiente de presión en la perforación de pozos petroleros (Mohammad AliAhmadi 2015), es el campo de la inteligencia artificial dentro del cual se encuentran las redes neuronales artificiales, utilizadas en los trabajos anteriormente descritos como una poderosa herramienta para aproximar funciones y obtener modelos que describan el fenómeno físico deseado.

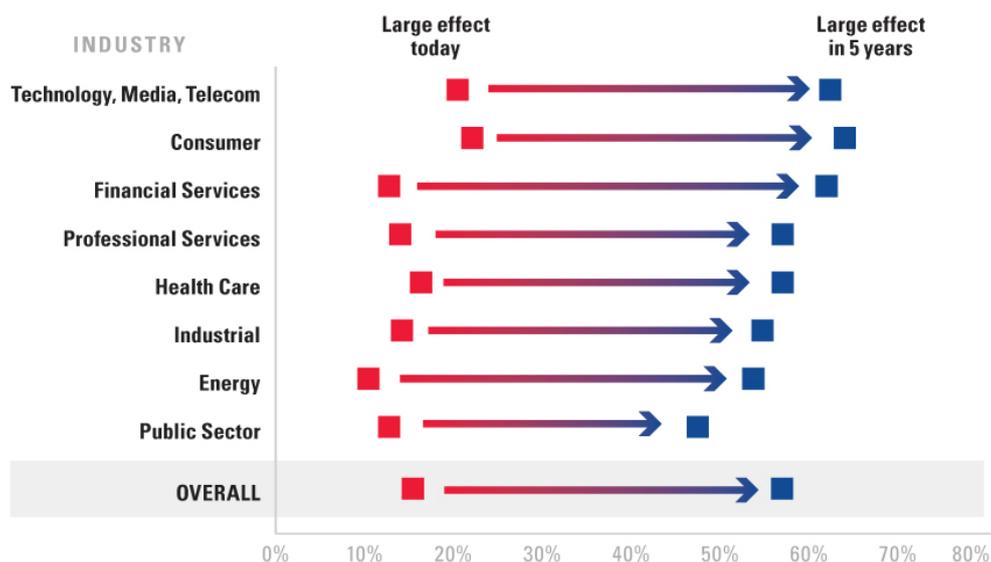
Igualmente, esta herramienta tiene aplicaciones hoy en día en sistemas “críticos” como lo son: seguridad en reactores nucleares (T.V. Santosh 2007), aplicaciones médicas (Sebastian Domsch 2017), en plantas de energía eléctrica (T.E. Boukelia 2016) al igual que en empresas transnacionales y de gran renombre como lo son: Tesla motors, Google y Amazon, por mencionar solo algunas. Obteniendo grandes resultados en la optimización de sus procesos y en el análisis de datos.

De acuerdo con la gráfica publicada por el *MIT Sloan Management*, el gran desempeño mostrado por las tecnologías basadas en inteligencia artificial, ten-

drá como consecuencia en los próximos años, el incremento en la implementación de esta tecnología, a los sectores de la industria que se muestran a continuación en la figura 1.7. De los que se puede destacar el sector energético con 60% de implementación.

### Expectations for AI adoption across industries: impact on processes

To what extent will the adoption of AI affect your organization's processes today and five years from today?



1.7 Expectativas de implementación de Inteligencia Artificial en la industria

Fuente: Boston Consulting Group & MIT Sloan Management. *Review, Reshaping Business With Artificial Intelligence*. (2018). Recuperado de <https://sloanreview.mit.edu/>

### 1.3 Objetivos.

A continuación, se exponen los objetivos que guiaron el presente trabajo.

#### 7.1.1. Objetivo General.

- Adaptar el modelo de Lockhart-Martinelli con la finalidad de obtener una mayor precisión y exactitud en la predicción de caída de presión en flujos bifásicos (Líquido - Gas), generalizando el modelo a los casos que presentan alta viscosidad  $\mu_L \sim 10^{-3} [Pa \cdot s]$  en su fase líquida. Con fines de aplicación en el diseño en sistemas industriales que presentan flujos bifásicos. Principalmente en el transporte de petróleo pesado.

#### 7.1.2. Objetivos Particulares.

- Coadyuvar en la construcción y diseño del nuevo sistema de pruebas para flujos multifásicos del instituto de ingeniería.
- Construir el sistema de pruebas con una relación  $\frac{L}{D} \sim 600$ .
- Poner en marcha el sistema de pruebas para flujos multifásicos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Calibrar y poner en operación todos los elementos de adquisición de datos experimentales y medición.
- Producir una amplia base de datos experimentales con mezclas de alta y baja viscosidad.
- Desarrollar un modelo "híbrido", implementado a partir del modelo Lockhart-Martinelli y una red neuronal artificial, que permita mejorar la precisión de la caída de presión en flujos bifásicos
- Desarrollar e implementar un software que utilice el modelo obtenido para calcular la caída de presión en flujos bifásicos, mediante una interfaz gráfica de fácil acceso y manejo intuitivo para el usuario.

- Analizar y comparar los datos experimentales obtenidos mediante el TUFFP modelo unificado, Lockhart -Martinelli y el modelo propuesto basado RNA.

## 1.4 Hipótesis

Por medio de la programación de una red neuronal artificial que toma como entradas las variables fundamentales que describen el fenómeno físico, se obtiene una modificación del modelo Lockhart-Martinelli para flujos bifásicos (gas-líquido) que amplíe el dominio de aplicabilidad del modelo a flujos que presentan alta viscosidad en la fase líquida  $\mu_L \sim 10^3 [cP]$ , y con ello mejorar la capacidad de predicción en las pérdidas de presión por fricción en el transporte de petróleo pesado.

## **2. Marco Teórico.**

En el presente capítulo se muestran los conceptos de mecánica de fluidos a fines a flujos multifásicos, con el objetivo de que los lectores tengan las bases para entender en su totalidad el estudio que se llevó a cabo. Así mismo se muestran los tres distintos enfoques de análisis en los que se abordan los flujos multifásicos. En dicha sección se muestra la complejidad de las ecuaciones de balance para el caso de dos fases y se hace evidente la dificultad en la obtención de un modelo riguroso. Finalmente se introducen las generalidades de una Red Neuronal Artificial como “aproximador” a funciones mediante datos correlacionados.

## 2.1 Enfoques de análisis.

Se entiende por enfoque de análisis, a la metodología y filosofía con la que será abordado el estudio del fenómeno físico, con la finalidad de dar solución a un problema en el ámbito ingenieril.

### 2.1.1. Enfoque Experimental.

Este proceso en el que se aborda el análisis del fenómeno físico está basado en la realización de experimentos afines y relevantes que conduzcan al desarrollo de correlaciones empíricas.

A priori se busca extrapolar los resultados obtenidos en los experimentos y conducir a una solución universal del fenómeno, para ello este enfoque debe estar basado en el análisis dimensional. De no ser así las correlaciones empíricas obtenidas presentarían restricciones en el dominio de aplicabilidad, acotándose a las condiciones experimentales en las que estas fueron generadas. En el caso particular del flujo bifásico existe una extensa cantidad de estudios que se conducen a través de esta metodología de análisis y son ampliamente utilizados en la industria. Por mencionar algunos de estos trabajos se tienen, las correlaciones de Beggs-Brill (1973), Lockhart-Martinelli (1949) y Muller-Steinhagen-Heck (1986).

### 2.1.2. Enfoque Numérico (simulación).

Este enfoque es principalmente impulsado por el avance tecnológico que ha sido de carácter exponencial en décadas recientes en el campo de la computación, mediante la denominada Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés). Sin embargo, para simular casos realistas, se requiere la inversión de tiempo en horas-hombre para programar. De acuerdo con la infraestructura computacional que se disponga, puede llegar a tardar en ocasiones varios meses obtener una solución que será aplicable a problemas particulares. Existe una extensa cantidad de investigaciones de flujo bifásico mediante simulación numérica entre ellos se encuentra Xie (2017), Lun (1996) y uno de los más relevantes el proyecto OLGA Bendiksen (1991).

### 2.1.3 Enfoque riguroso.

Mediante este enfoque es requerido llevar a cabo la solución analítica de las leyes de conservación utilizando las condiciones de frontera apropiadas, así como las ecuaciones constitutivas adecuadas para tener un sistema de ecuaciones diferenciales compatible. El caso de flujo bifásico supone una tarea compleja debido a su naturaleza caótica, intermitente y de parámetros no concentrados. Sin embargo, esta solución implica tener los resultados más precisos posibles y un modelo generalizado que describiera el fenómeno. No obstante, para el caso particular de flujo bifásico se tiene un sistema de 6 ecuaciones con 8 variables que debe complementarse con una ecuación por cada fase. (Véase sección 2.2).

### 2.1.3. Enfoque Mecanicista.

Este enfoque se encuentra justo en el punto medio entre los enfoques experimental y riguroso. Ya que permite desarrollar herramientas teóricas generadas a partir de ciertas consideraciones o simplificaciones del fenómeno físico de igual forma valiéndose de datos experimentales con el objetivo principal de generar modelos con aplicabilidad, principalmente en el campo del diseño de sistemas industriales. Algunos de los trabajos más representativos considerados modelos mecanicistas o también llamados fenomenológicos se pueden mencionar a Petalas-Azis (1998), Taitel-Duckler (1976), Shoham (2006), Chisholm (1967) y el TUFFP Modelo unificado (1999-2017).

## 2.2 Leyes de conservación.

Las ecuaciones o leyes de conservación que gobiernan el flujo de un volumen de control dado se pueden extrapolar al caso particular del flujo con múltiples fases realizando distintas consideraciones. Un enfoque es el propuesto por Truesdell (1985), conocido como "mezcla simple" y realiza la suposición de que los distintos elementos presentes en el flujo llegan a mezclarse a nivel molecular, lo cual implica que distintos elementos o fases pueden ocupar el mismo lugar en el espacio en el mismo instante. Esto es válido en casos muy particulares como mezclas de ej. Aire o Whisky con refresco de cola, sin embargo, una aproximación más "realista" es la llamada "mezclas multi componente" o de "múltiples fases". En las que se tienen una fase continua en la que a su vez existe una fase dispersa y se permite el movimiento independiente de las fases y no se presenta una interacción o mezcla a nivel molecular, con lo que se mantiene la integridad química de cada fase y se representa la cantidad de cada fase mediante el concepto de fracción volumétrica  $\alpha_k(r, t) = \frac{\Omega_k}{\Omega}$ , y es aplicado a las ecuaciones de conservación (energía, cantidad de movimiento y masa) que tienen la siguiente forma general:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k \Psi_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \rho_k U_k \Psi_k - \Gamma_\Psi \frac{\partial \Psi_k}{\partial x_i} \right) = S_\Psi \quad (1)$$

Donde  $\Psi$  es la variable de transporte de la fase k, que para cada caso particular adquiere un valor, por ejemplo, es igual a la unidad en el caso de la ecuación de continuidad. En cuanto al término  $U$ , es definido como el vector de velocidad de la fase k,  $\Gamma$  es el coeficiente de intercambio difusivo para la variable  $\Psi$ ,  $S$  es el término fuente y  $\rho_k$  es la densidad de la fase k-ésima.

Como se observa en la ecuación número 1, si se tuviese el caso particular del flujo bifásico se tendrían seis ecuaciones de conservación acopladas en un sistema que comprende ocho variables dependientes y que a su vez debe ser complementado por una ecuación de estado por cada fase, sin mencionar que las ecuaciones se encuentran acopladas mediante los campos de velocidad y densidad de cada fase, involucrando a los términos de interacción entre fases. Estos términos de interacción entre fase son modelados por medio de las condiciones denominadas "condiciones de salto" (*Jump conditions*).

Lo anteriormente descrito se puede consultar con mayor detalle en el apéndice A.

### 2.3 Variables del flujo bifásico.

El flujo de múltiples fases trae consigo una cantidad extensa de variables definidas para poder abordar el estudio y descripción del fenómeno físico. A continuación, se definen las variables que se considera son las principales en el flujo bifásico y concretamente son fundamentales para el correcto entendimiento del presente estudio.

#### 2.3.1. Gasto másico.

El gasto másico  $\dot{m}$  con unidades en el SI en  $[\frac{kg}{s}]$ , se define como la tasa de variación temporal de la masa con respecto al tiempo, y en el caso del flujo bifásico es referida a cada una de las fases.

$\dot{m}_L \triangleq$  Flujo másico de la fase líquida.

$\dot{m}_G \triangleq$  Flujo másico de la fase gaseosa.

$\dot{M} \triangleq$  Flujo másico de la Mezcla

Por conservación de masa se obtiene que el flujo total  $\dot{M}$  o de la mezcla, es la suma algebraica de los dos flujos másicos.

$$\dot{m}_L + \dot{m}_G = \dot{M} \quad (2)$$

#### 2.3.2. Flujo volumétrico.

El flujo volumétrico ( $q$ ) con unidades en el SI en  $[\frac{m^3}{s}]$ , es definido como la tasa de variación temporal del volumen.

Siendo  $\dot{Q}$  el flujo volumétrico total, definido por la suma de los flujos másicos de cada fase divididos entre su respectiva densidad.

$\dot{q}_L \triangleq$  Caudal volumétrico de fase líquida

$\dot{q}_G \triangleq$  Caudal volumétrico de fase gaseosa.

$\dot{Q} \triangleq$  Flujo volumétrico total.

$$\dot{q}_L + \dot{q}_G = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L} + \frac{\dot{m}_G}{\rho_G} = \dot{Q} \quad (3)$$

### 2.3.3. Fracción volumétrica de líquido (Colgamiento) y fracción volumétrica de gas (fracción seca).

En el flujo bifásico se define a las razones en volumen de cada fase con respecto al volumen total, por medio del “colgamiento”  $\alpha_L$  para la fase líquida y  $\alpha_G$  para la fase gaseosa “fracción seca”, siendo  $0 < \alpha_L$  o bien  $\alpha_G < 1$  y con ello  $\alpha_L + \alpha_G = 1$ .

De igual forma estos dos conceptos, se pueden reescribir matemáticamente, si se coloca el área de la sección transversal total del ducto en términos del área efectiva ocupada por cada fase.

$$A_T = A_L + A_G \quad (4)$$

Donde:

$$A_L = a \left( \frac{\pi}{4} d_L^2 \right) \quad (5)$$

$$A_G = b \left( \frac{\pi}{4} d_G^2 \right) \quad (6)$$

Siendo  $d_L$  y  $d_G$  los diámetros hidráulicos de líquido y gas respectivamente. En donde las letras  $a$  y  $b$  representan las razones instantáneas de cada fase que fluyen por el área de la sección transversal. Finalmente sustituyendo la ecuación (5) y (6) en (4), se obtiene.

$$\alpha_L = a \left( \frac{d_L}{d} \right)^2 = 1 - b \left( \frac{d_G}{d} \right)^2 \quad (7)$$

#### 2.3.4. Colgamiento instantáneo de líquido.

El colgamiento instantáneo  $H(r, t)$ , representa la fracción de líquido de un elemento diferencial de volumen en un tiempo “ $t$ ” y espacio denotado por el vector “ $r$ ” específico, en el campo de flujo.

$$\tilde{H} = \iint \frac{H(r, t) dr dt}{\int dr \int dt} \quad (8)$$

#### 2.3.5. Velocidades Superficiales.

El concepto de 'Velocidad Superficial' define una de las variables que con mayor frecuencia se hace referencia en el estudio de flujos bifásicos y representa la velocidad que tendría cada una de las fases si éstas se encontraran fluyendo solas a lo largo del ducto.

$$\tilde{U}_{SL} = \frac{\dot{q}_L}{A_T} \quad (9)$$

$$\tilde{U}_{SG} = \frac{\dot{q}_G}{A_T} \quad (10)$$

#### 2.3.6. Velocidad instantánea.

La velocidad instantánea de cada fase se define como la velocidad “actual” o “real” que presenta cada una de las fases en un momento dado, ya que a diferencia de la velocidad superficial esta toma en cuenta el hecho de que cada fase no fluye a través del área total de la sección transversal del ducto.

$$\tilde{U}_L = \frac{\tilde{U}_{SL}}{H_L} \quad (11)$$

$$\tilde{U}_G = \frac{\tilde{U}_{SG}}{1 - H_L} \quad (12)$$

### 2.3.7. Velocidad de deslizamiento.

Representa la velocidad relativa que existe entre cada una de las fases.

$$\tilde{U}_d = \tilde{U}_G - \tilde{U}_L \quad (13)$$

### 2.3.8. Calidad.

La calidad  $x$  se define como la relación del flujo másico de gas con respecto al flujo másico de la mezcla.

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} = \frac{\dot{m}_G}{M} \quad (14)$$

### 2.3.9. Flux.

Se define como la cantidad de masa por unidad de tiempo por unidad de área y tiene como unidades en el SI  $[\frac{kg}{s \cdot m^2}]$ .

$$G_M = \frac{\dot{m}_L + \dot{m}_G}{A_T} \quad (15)$$

### 2.3.10. Propiedades promediadas.

Densidad de mezcla.

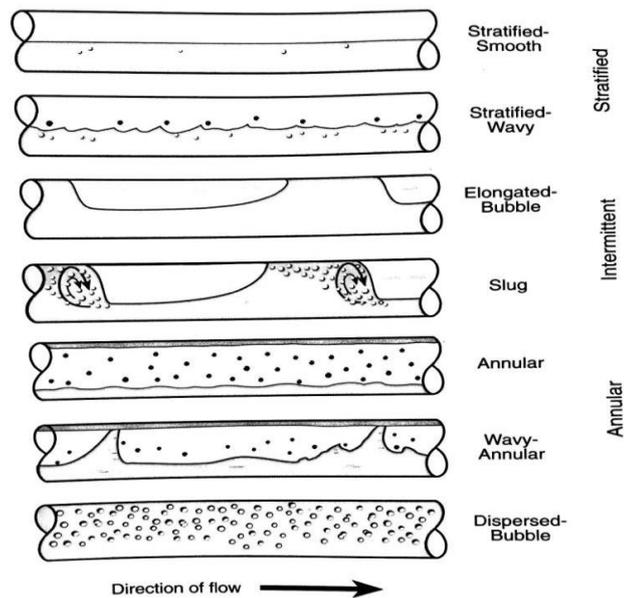
$$\rho_H = \rho_L H + \rho_G (1 - H) \quad (16)$$

Viscosidad de mezcla.

$$\mu_H = \mu_L H + \mu_G(1 - H) \quad (17)$$

## 2.4 Flujo bifásico en conducto horizontal.

Se define como flujo bifásico a todo aquel en el que se encuentran fluyendo simultáneamente dos fases, que pueden ser o no de la misma especie química. La diferencia fundamental entre un flujo monofásico y flujo bifásico es la existencia de los patrones de flujo. Definiéndose el patrón de flujo, como la configuración o distribución geométrica de cada fase dentro del conducto. En el caso particular de flujo bifásico (líquido - gas) en conducto horizontal, es posible que se presente cualquier patrón de flujo que se presentan a continuación en la figura 2.1.



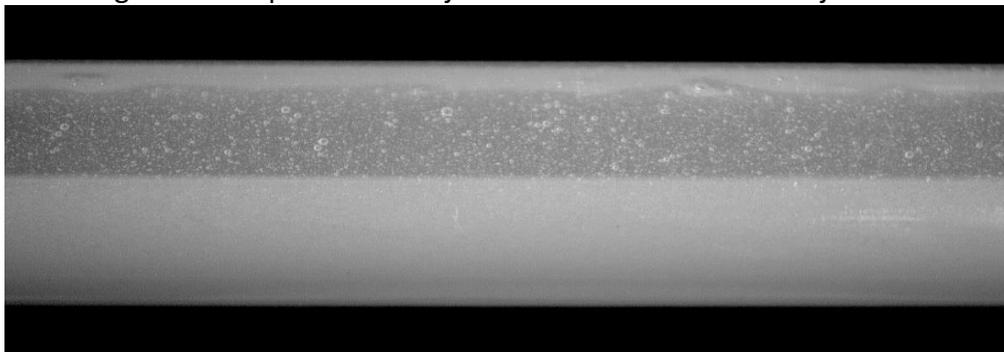
2.1 Clasificación de patrones de flujo en flujo bifásico horizontal.

Fuente: Shoham, O. (2006). [Fig. 1. 4].

Se clasifican en tres principales tipos de patrón (estratificado, anular e intermitente).

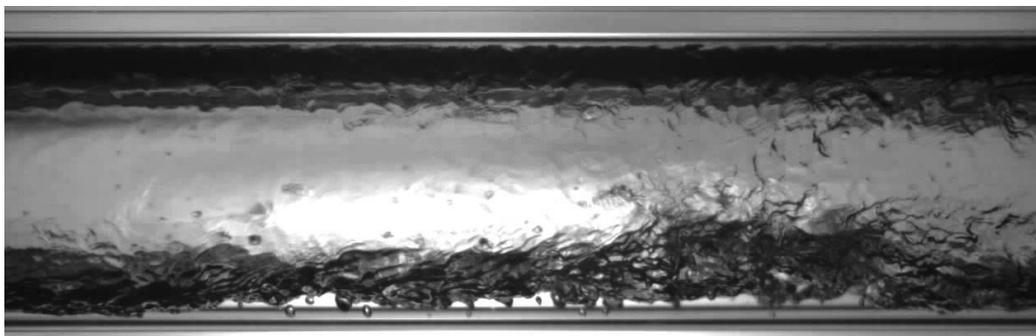
En el caso particular del flujo estratificado las fases están muy bien delimitadas debido al peso específico de cada una de ellas, fluyendo la fase líquida por la

parte inferior del conducto y la fase gaseosa por la parte superior. En general esta configuración se presenta a flujos máscicos relativamente bajos de cada fase.



2.2 Flujo estratificado, imagen tomada con cámara de alta velocidad a 7500 cuadros por segundo. sustancias glicerina (1.2 kg/s)- aire (3 g/s)

En lo que respecta a una distribución anular, se presenta un “núcleo” de fase gaseosa fluyendo a alta velocidad, mientras la fase líquida se encuentra fluyendo a menor velocidad generando así una capa de fluido que cubre el núcleo de gas. Es importante mencionar que se requieren condiciones muy específicas para que se presente este patrón de flujo, siendo muy inestable en lo que respecta al flujo horizontal debido al peso específico de la fase líquida.

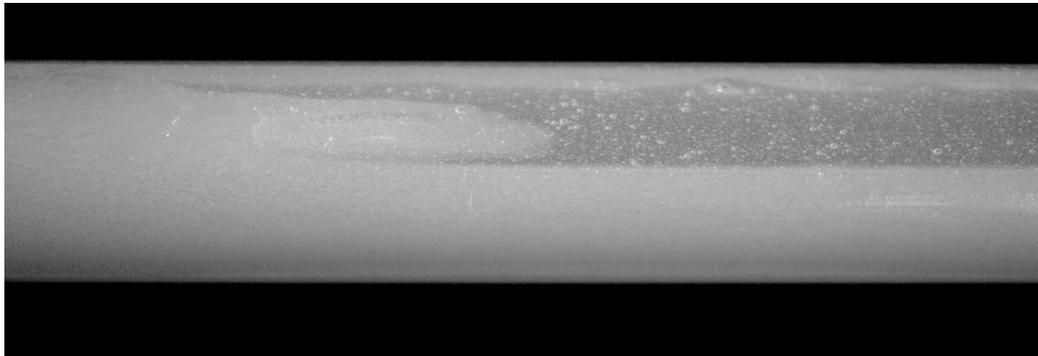


2.3 Flujo anular

Fuente: Eduardo Nunes Dos Santos. Two-phase Transition to annular flow from slug Flow. (2011) Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=MDU426n50i4>.

En cuanto a los flujos intermitentes su configuración está dada principalmente por un flujo que se alterna entre las fases gaseosa y líquida. Los baches o secciones de líquido, que se denominan “slug” en inglés, llenan por completo la sección transversal del ducto y son separados por paquetes de gas que contienen una capa de líquido estratificado que se encuentra fluyendo en el fondo del ducto. Esta disposición geométrica de flujo es una de las que se presenta con mayor

frecuencia en el flujo bifásico y de igual forma existe una mayor cantidad de estudios que lo refieren.



2.4 Flujo Bache (Slug Flow), imagen tomada con cámara de alta velocidad a 7500 cuadros por segundo. sustancias glicerina (6 kg/s)- aire (10 g/s)

La obtención del gradiente de presión se puede considerar como el aspecto fundamental y de vital importancia para el diseño, evaluación y operación de cualquier sistema industrial que involucre fluidos de trabajo. Es particularmente importante en el transporte de aceite crudo debido a las largas distancias que debe ser transportado y que en consecuencia viene asociado con variables económicas relacionadas a la rentabilidad y costos de operación.

Es importante resaltar que la caída de presión es fundamental en el diseño de ductos y equipos industriales, ya que se obtiene una cuantificación de la energía transformada debido al transporte de masa y energía a lo largo del flujo. En consecuencia, el gradiente de presión es directamente relacionada con la velocidad del fluido, la gravedad específica del fluido, aspectos geométricos como la forma, el tamaño y propiedades del fluido como la viscosidad, así como propiedades del conducto (rugosidad).

Quedando expresado en función de tres términos.

$$\frac{dP}{dL}_{Total} = \frac{dP}{dL}_{\Delta EPotencial} + \frac{dP}{dL}_{Fricción} + \frac{dP}{dL}_{Aceleración} \quad (18)$$

A continuación, se reescribe la ecuación (17), de tal forma que se obtenga la ecuación de conservación de la energía en unidades de energía por unidad de volumen. Ya que en el campo de la mecánica de Fluidos es habitual expresarlo de esta forma.

Quedando así la ecuación (18), considerando:

- Dos secciones de un ducto horizontal  $\theta = 0$  (cambio en la elevación nula)
- Ducto de sección constante (diámetro constante)

$$dP_{Total} = h_f - \frac{dP}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g} \quad (19)$$

En el flujo bifásico la obtención del gradiente de presión se diferencia al que se presentan en el flujo monofásico debido a la interfaz que provoca un cambio espaciotemporal del flujo. Dando origen a diferentes configuraciones de flujo con distintas disposiciones de cada fase a lo largo del ducto, provocando grandes caídas de presión comparado con el flujo en una sola fase y haciéndolo sumamente complejo de calcular.

Debido a la complejidad e importancia que representa la obtención del gradiente de presión en el flujo bifásico, a lo largo de los años se han desarrollado literalmente cientos de modelos y modificaciones a modelos existentes que intenta predecir y/o describir el gradiente de presión. A continuación, se describen brevemente los tres grupos de modelos en los que se pueden agrupar todos los trabajos existentes, a partir de la descripción de los modelos más representativos de cada grupo.

#### 2.4.1. Modelo homogéneo (Sin deslizamiento, Wallis).

Este modelo está caracterizado principalmente por asumir que no existe velocidad relativa entre las fases ( $\tilde{U}_d = 0$ ). Como consecuencia el flujo es modelado como un flujo pseudo-monofásico con propiedades de mezcla basadas en la proporción volumétrica de cada fase (Wallis, 1969).

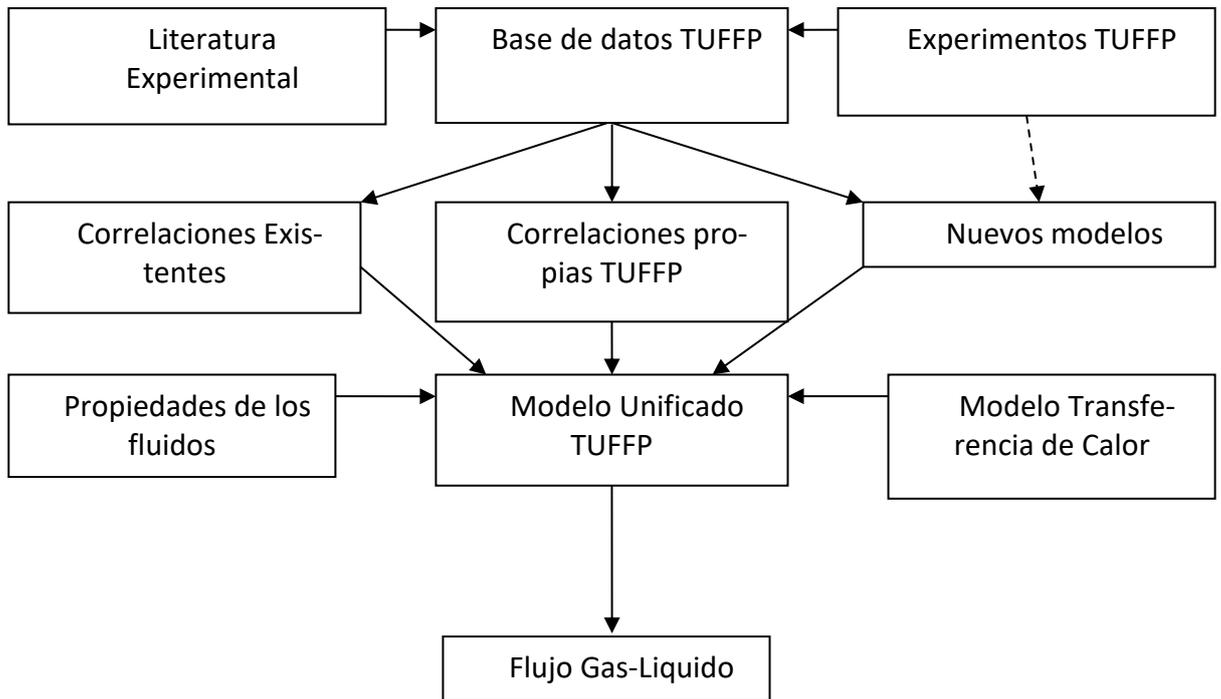
$$-\frac{dP}{dL} = \frac{\frac{f_H}{D} + \frac{G_M}{2\rho_H} + \rho_H g \sin(\theta)}{1 + G_M \left[ x \frac{dv_G}{dP} + v_M \frac{dx}{dP} \right]} \quad (20)$$

El modelo homogéneo es un modelo simple y versátil, elaborado a partir de las ecuaciones de conservación promediadas y utilizando

las condiciones de salto adecuadas, que permite dar una descripción del comportamiento del flujo bifásico, como una mezcla homogénea. Sin embargo, debido a que presenta diversas suposiciones, principalmente considerar que ambas fases viajan a la misma velocidad, sus resultados son ampliamente distantes de lo observado experimentalmente y por ello no es tan utilizado en las principales aplicaciones del flujo bifásico. En promedio presenta un error porcentual absoluto promedio del 51% (Cravino, 2009).

#### 2.4.2. Modelo unificado (TUFFP).

El modelo unificado TUFFP para flujos bifásicos líquido - gas fue desarrollado con la finalidad de predecir, el gradiente de presión, los patrones de flujo, el colgamiento. Adicionalmente otorga ciertas características principales del flujo intermitente tipo “bache”. El término “unificado” hace referencia a la capacidad que tiene el modelo para ser aplicado en cualquier orientación del flujo ( $-90^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Tiene la capacidad de abordar cualquier patrón que se presente, así como la transición que sucede de un patrón de flujo a otro. Este robusto y complejo modelo está construido con base en una considerable cantidad de correlaciones y condiciones de cierre que se han desarrollado a lo largo de los años y han sido introducidas al modelo. El modelo unificado forma parte de una serie de investigaciones desarrolladas por la unidad de proyectos de la universidad de Tulsa, *Tulsa University Fluid Flow Projects (TUFFP)* (<http://www.tuffp.utulsa.edu/>), en cooperación con diversas entidades tanto gubernamentales como privadas del sector energético. Esta unidad de proyectos lleva realizando investigaciones desde 1973 cuando fue fundada por el Dr. James P. Brill y es uno de los grupos de trabajo más destacados y referentes en el ámbito petrolero a nivel mundial. A continuación, se presenta un diagrama que muestra cómo se encuentra constituido el modelo unificado de Tulsa.



### 2.4.3. Modelo separado (Lockhart-Martinelli).

La característica principal de los modelos “separados”, radica en que se considera cada fase como si fluyera a lo largo de la tubería de forma independiente (se consideran las velocidades superficiales de cada fase). Si bien existen numerosos modelos que parten de esta premisa, como los modelos de Turner (1966) o el modelo de Awad-Muzychka (2014). A continuación, se describiría únicamente el modelo Lockhart-Martinelli (1949) debido a los objetivos que busca alcanzar el presente trabajo.

Lockhart y Martinelli (1949) Llevaron a cabo experimentos en los que obtuvieron datos para el flujo bifásico de aire y líquidos, incluidos benceno, queroseno, agua y diferentes tipos de aceites en tuberías con un diámetro variable de 0.0586 pulgadas a 1.017 pulgadas.

Por medio de los datos recopilados, desarrollaron un modelo basado en dos multiplicadores de fase  $\varphi_i$  expresando la caída de la presión de fricción en dos fases en términos de estos multiplicadores de fase, que relacionan la caída de presión monofásica de cada fase con respecto a la caída total de presión.

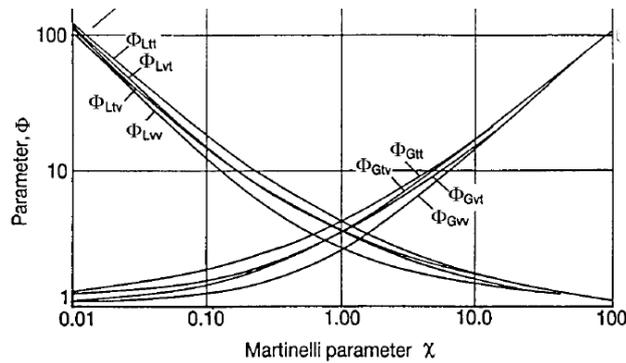
$$\varphi_L = \frac{\frac{dP}{dL_f}}{\frac{dP}{dL_{fSL}}} \quad (21)$$

$$\varphi_G = \frac{\frac{dP}{dL_f}}{\frac{dP}{dL_{fSG}}} \quad (22)$$

Estos factores son calculados a través del factor de Martinelli  $\chi$  Siendo este factor un parámetro adimensional que relaciona la caída de presión debida a la fase líquida con respecto a la caída de presión debida a la fase gaseosa y que parte de la suposición de que la caída de presión de cada fase es igual durante régimen permanente.

$$\chi^2 = \frac{\frac{dP}{dL_{fSL}}}{\frac{dP}{dL_{fSG}}} \quad (23)$$

Originalmente el valor de los multiplicadores se determinaba como función del parámetro  $\chi$  a partir del gráfico obtenido por Lockhart y Martinelli (1949) mostrado en la gráfica 2.5.



2.5 Curvas para determinar el multiplicador bifásico, como función del parámetro de Martinelli

Fuente: R. Darby. *Chemical Engineering Fluid Mechanics*. (2001).

En el cual se observan cuatro curvas que corresponden a los cuatro posibles casos en los que se puede incurrir, debido a la combinación de regímenes de flujo para cada fase, que se presenta en la tabla 2-1.

Tabla 2-1. Combinaciones de Regímenes de flujo

Bifásico	Líquido	Gas
Tt	Turbulento	Turbulento
Vt	Laminar	Turbulento
Tv	Turbulento	Laminar
Vv	Laminar	Laminar

Debido a esto el modelo no toma en cuenta el patrón de flujo que se presenta en la tubería, simplemente la combinación de los regímenes de flujo para cada fase (turbulento o laminar).

$$\begin{aligned} \phi_l^2 &\rightarrow \frac{1}{\chi^2} & \chi &\rightarrow 0 & \text{Flujo de fase gaseosa} \\ \phi_l^2 &\rightarrow f(\chi) & 0.01 &< \chi < 100 & \text{Flujo bifásico} \\ \phi_l^2 &\rightarrow 1 & \chi &\rightarrow \infty & \text{Flujo de fase líquida} \end{aligned}$$

La gran aportación de Chisholm (1967) fue realizar un estudio que le diera solidez teórica al modelo original de Lockhart-Martinelli, logrando así obtener una ecuación que sustituyera la solución gráfica obtenida originalmente.

$$\varphi_L = 1 + \frac{C}{\chi} + \frac{C}{\chi^2} \quad (24)$$

$$\varphi_G = 1 + C\chi + \chi^2 \quad (25)$$

De igual forma como se muestra en la tabla 2-2, la constante de Chisholm (1967) se establece de acuerdo con los regímenes de flujo para cada fase.

Tabla 2-2. Constante de Chisholm asociada a cada combinación de régimen de flujo.

Bifásico	Líquido	Gas	C
Tt	Turbulento	Turbulento	20
Vt	Laminar	Turbulento	12
Tv	Turbulento	Laminar	10
Vv	Laminar	Laminar	5

El significado de la constante C de las ecuaciones (30) y (31), se puede obtener si se multiplica la ecuación (30) en ambos lados de la igualdad por  $\frac{dP}{dL}_{fSG}$

$$\frac{dP}{dL_f} = \frac{dP}{dL_{fSL}} + C \left[ \left( \frac{dP}{dL_{fSL}} \right) \left( \frac{dP}{dL_{fSG}} \right) \right]^{0.5} + \frac{dP}{dL_{fSG}} \quad (26)$$

De esta forma se obtiene que el gradiente de presión por fricción en flujos bifásicos  $\frac{dP}{dL_f}$  es la suma de tres componentes: el gradiente de presión de la fase líquida fluyendo sola, la contribución del gradiente de presión por fricción total de las dos fases en la interfaz, y el gradiente de presión de la fase líquida fluyendo sola.

Por lo tanto, la constante C en el modelo de Chisholm (1967) se puede considerar como un factor de ponderación para la media geométrica de los gradientes de presión monofásicos de líquido y gas, englobando de forma “sencilla” y compacta todas las interacciones interfaciales presentes en el flujo bifásico.

El parámetro de Chisholm (C) es una medida de las interacciones de entre las dos fases que se encuentran fluyendo. Y esta interacción es totalmente dependiente de los regímenes de flujo de cada fase de (tt, vt, tv y vv) e implícitamente función de las propiedades físicas de cada fase.

La metodología de aplicación y cálculo del gradiente de presión para flujos bifásicos mediante este modelo se encuentra en la sección 4.3.1 del presente texto.

## 2.5 Redes Neuronales Artificiales.

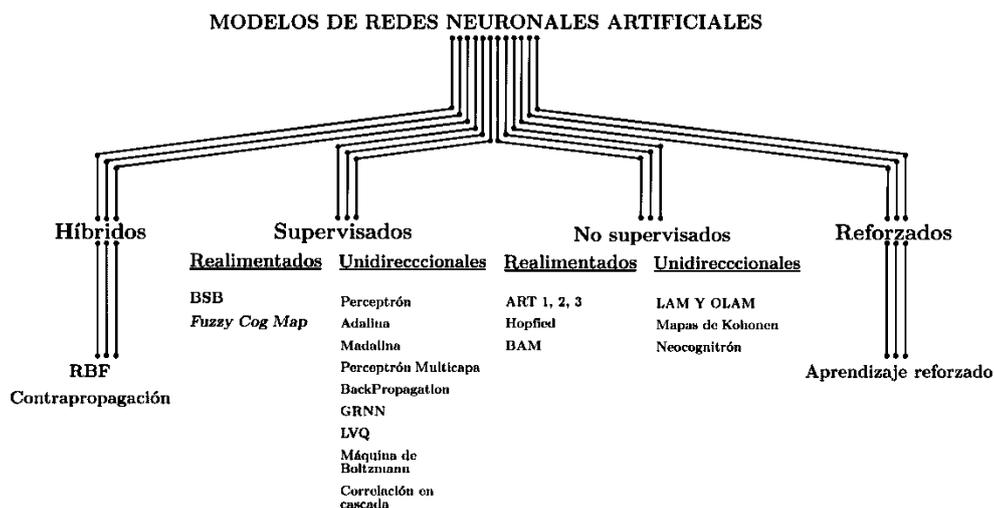
El objetivo de la presente sección es presentar un panorama general referente a las redes neuronales artificiales, como una herramienta matemática que se ha desarrollado en los últimos años (1943) y ha cobrado una gran relevancia en la solución de problemas altamente complejos y no lineales en la última década, aplicándose en diversas áreas de la ingeniería ej. energía nuclear, automatización industrial y robótica, detección de fugas y optimización de procesos. Si se desea obtener una perspectiva más especializada del tema se recomienda acudir a fuentes afines que ofrezcan una descripción más detallada como los trabajos de Chapman y Hall (2015) o el trabajo François Chollete (2018).

Las redes neuronales artificiales (RNA) son poderosas herramientas numéricas adaptativas, aplicables en diversos campos de la ingeniería, economía y ciencias, que permiten la resolución de problemas que son dependientes de múltiples variables y presentan un alto grado de complejidad. Las RNA están inspiradas en la

topología y funcionamiento del cerebro humano y por ello son fundamentalmente constituidas mediante tres características que las diferencian de la programación “clásica”, dichas características son:

- Cálculo o procesamiento en paralelo: Habilidad de realizar una considerable cantidad de cálculos en un intervalo de tiempo lo más reducido posible.
- Memoria distribuida: Permite a las RNA tener una distribución de la información por medio de las sinapsis de la red, que en comparación con una estructura típica en la que se definen posiciones predeterminadas para la información.
- Capacidad adaptativa: Las RNA tienen la capacidad de adaptarse a la “situación” o problema. Por medio de la modificación de sus sinapsis, y “aprendiendo” de la experiencia mediante un entrenamiento, con el objetivo de extrapolar y llegar a generalizar conceptos a partir de casos particulares.

Existe una gran variedad en cuanto a tipos de RNA se refiere, en el siguiente diagrama se muestran clasificadas debido al tipo de aprendizaje que utilizan.



2.6 Clasificación y tipos de redes neuronales artificiales existentes.

La selección de la RNA depende de la naturaleza propia que tenga el problema o la tarea a realizar.

La RNA que se utiliza con mayor frecuencia en los problemas asociados a datos que deben correlacionarse y en aproximación de funciones, es el llamado perceptrón de múltiples capas (PMC), localizada en el diagrama anterior en las redes neuronales supervisada unidireccionales.

En el PMC, la unidad de neurona es llamada perceptrón simple y son agrupadas en capas en donde se encuentran interconectadas entre sí. Mediante la interconexión de las distintas capas se obtiene la estructura de una RNA.

Emulando a un cerebro, se tiene que las conexiones entre cada neurona tienen valores distintos (sinapsis), ya que cada conexión debe ser ponderada y ajustada. Para ello se utilizan ponderadores o “pesos” y términos de ajustes, con los que es posible aproximar cualquier función, ya que son parámetros libres que pueden ajustarse.

Se requiere de una base de datos (entradas - salidas) previamente pre procesado, ya que el PMC requiere aprender, por medio de la “experiencia” o “entrenamiento”. Esto se logra a partir de una serie de ejemplos que se le otorgan con la finalidad de adquirir dicha experiencia.

Mediante la implementación de un algoritmo de entrenamiento que tiene como objetivo establecer los valores para el vector de pesos con los cuales el error cometido al evaluar los ejemplos de entrenamiento sea el menor posible.

Existe una estrecha relación entre la cantidad de capas ocultas, número de neuronas y la complejidad de la función que es posible aproximar, sin embargo, un PMC con al menos una capa oculta es “una clase de aproximador universal” y esto se demuestra en los trabajos de Hornik (1991) y Cybenko (1989), lo cual implica que una red neuronal puede aproximar cualquier función continua hasta cualquier nivel de exactitud al implementarse un PMC con una sola capa oculta. En la sección 4.5.3 se muestra la modificación realizada al modelo Lockhart-Martinelli Chisholm (1967) utilizando una RNA con arquitectura de PMC, con la finalidad de obtener una relación funcional óptima para la obtención del multiplicador bifásico y con ello adaptar y mejorar la predicción en el gradiente de presión en flujos bifásicos horizontales con una fase líquida de alta viscosidad  $\mu \sim 10^3 [cP]$ .

### **3. Metodología Experimental.**

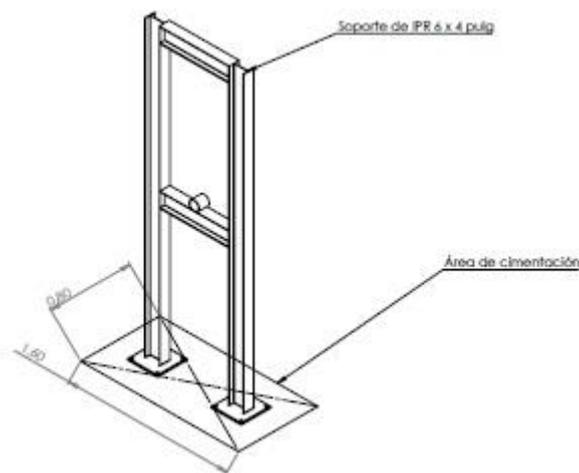
En este capítulo se encuentra la descripción de la metodología llevada a cabo en la realización de pruebas experimentales, así como una descripción detallada de la topología del sistema experimental localizado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

### 3.1 Nuevo Circuito experimental del Instituto de Ingeniería.

La serie de experimentos de flujo bifásico (gas-líquido), que se reportan en la presente tesis, fueron llevados a cabo en las instalaciones del laboratorio de flujos multifásicos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El cual fue rediseñado en su totalidad y mejorado entre los meses de octubre de 2016 y julio de 2017.

A continuación, se realiza una descripción breve de la topología del sistema experimental y sus características mecánicas.

El sistema cuenta con una longitud de 50[m] en la que se tiene una sección de pruebas de 45[m] y se encuentra a una altura de 1.80 [m], soportada por un marco rígido fabricado con vigas IPR de 6x4 pulgadas otorgando a cada sección de tubería una inclinación de  $\sim 0^\circ$ .



3.1 Plano de la soportería para el circuito de pruebas experimentales.

El sistema está fabricado por tubería de acero al carbono en 3 pulgadas de diámetro (nominal) cedula 80, sin costura y cuenta con uniones bridadas tipo “welding socket” ANSI B16.5, con sellos fabricados en politetrafluoroetileno (Teflón) y con accesorios para el control de flujo mediante válvulas de esfera marca Worcester clase 150.

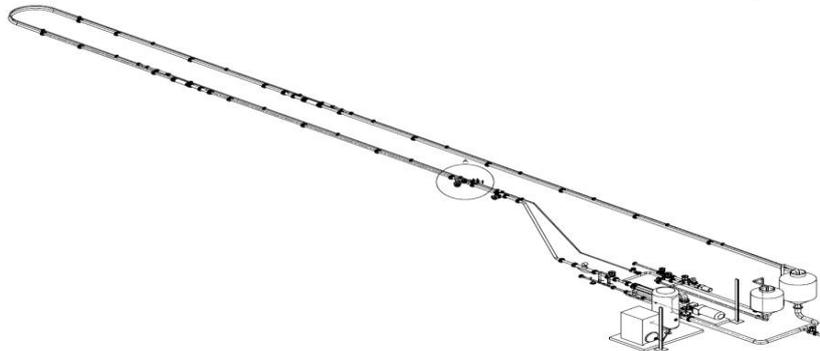


3.2 Accesorios y tubería 3[in] nominal, acero al carbono cedula 80



3.3 Circuito experimental de flujos multifásicos Edificio 8 Instituto de Ingeniería UNAM.

El sistema experimental está constituido por subsistemas con equipos y tareas específicas que en conjunto constituyen la totalidad del circuito experimental. Cada subsistema será descrito detalladamente en las secciones siguientes.



3.4 Plano isométrico del circuito experimental.

### 3.2 Subsistema hidráulico.

El subsistema hidráulico consta de una tolva de almacenamiento con una capacidad individual de  $1.3 [m^3]$  marca Rotoplas. La tolva de almacenamiento se conecta mediante una sección de tubería de  $0.152 [m]$  (6 pulgadas) de diámetro nominal a una bomba de cavidad progresiva con  $29.8 [kW]$  (40 [Hp]) de potencia de la marca *Seepex* con un estator fabricado en polímero VITON y fabricada específicamente para el laboratorio de flujos multifásicos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.



3.5 Bomba de cavidad progresiva y tolva de almacenamiento.

El control de velocidad de la bomba se efectúa por medio de un variador de frecuencia marca *ABB* con su correspondiente interruptor termomagnético que es controlado por un termopar situado en el interior de la bomba, brindándole un paro de emergencia adicional.



3.6 Controlador de la bomba y paro térmico de emergencia.

A continuación de la descarga de la bomba se cuenta con un medidor flujo másico de efecto Coriolis modelo *Promass 83F* de la marca *Endress Hauser* en 3 pulgadas (nominal). El cual envía la señal de flujo másico de líquida al sistema de adquisición.



3.7 Medidor de flujo másico para fase líquida por efecto Coriolis

### 3.3 Subsistema neumático.

El aire que se suministra al sistema se comprime por medio de un compresor de la marca *Kaeser*. Con capacidad suficiente para inyectar hasta  $0.50 \left[ \frac{kg}{s} \right]$ . Cuenta con una presión máxima de operación de  $1.6 [MPa]$ . El aire es almacenado en un tanque presurizado modelo D-57223 *Kreuztal* de la marca Otto Klein con capacidad para almacenar  $1 [m^3]$  a  $1.6 [MPa]$  de presión máxima, para posteriormente ser conducido por una sección de tubería de acero al carbono con 2 pulgadas (nominal) de diámetro y una longitud 3 metros de largo hasta un medidor de flujo de efecto Coriolis modelo *Promass 83F* de la marca *Endress Hauser*, el cual envía la señal de flujo másico de aire al sistema de adquisición.



3.8 Compresor de aire marca Kaesser y Medidor de flujo másico para fase gaseosa por efecto Coriolis

El aire es suministrado al sistema principal, localizado a cuatro metros aguas arriba del medidor, por medio de una sección tipo "Y" de acero al carbono, y en la que se controla el flujo mediante una válvula de esfera clase 150.



3.9 Inyección de aire, accesorio tipo "Y", y válvula de control de inyección de gas

### 3.4 Subsistema de instrumentación, adquisición y control.

La instalación experimental fue instrumentada para medir y registrar los valores de los diversos parámetros de flujo.

Las variables de: presión, flujos volumétricos, temperatura y densidad son medidos en línea por los instrumentos respectivos en el sistema experimental y

mostrados en el siguiente párrafo. Así mismo, se cuenta con equipos complementarios como el viscosímetro marca Brookfield con el que se obtienen mediciones de viscosidad.



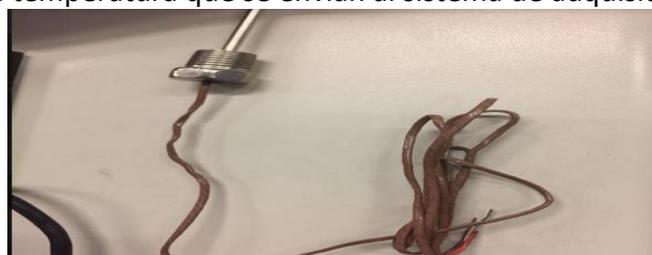
3.10 Medición de viscosidad glicerina, con viscosímetro por efecto Couette, marca Brookfield

La medición de las presiones se realiza mediante transductores de presión (colocados como se muestran en el diagrama) marca MEAS de la serie U5300  $344.73 \times 10^3$  [Pa] (50[psi]) de presión.



3.11 Transductor de Presión manométrico, modelo MEAS U5300.

Los termopares tipo K fueron empleados en el sistema para llevar a cabo las mediciones de temperatura que se envían al sistema de adquisición.



3.12 Termopar tipo K

En el caso de los transductores de presión que transmiten una señal analógica de corriente directa que varía entre 4 y 20[mA] de acuerdo con la lectura de presión.

La señal eléctrica proveniente de cada instrumento se transmite a través de cables calibre 18 AWG que fueron blindados contra ruido electromagnético y adaptados mediante conectores tipo CANON para facilitar la conexión entre los equipos, sensores y el sistema de adquisición.



3.13 Conector tipo CANON y sistema de adquisición de datos marca imc modelo CRONOSflex

En cuanto el sistema de adquisición se cuenta con un equipo de la marca *imc* modelo *CRONOSflex*, con capacidad de 40 entradas análogas y 5 entradas digitales y una velocidad de adquisición de hasta 100[kHz] por entrada.

### 3.5 Matriz experimental.

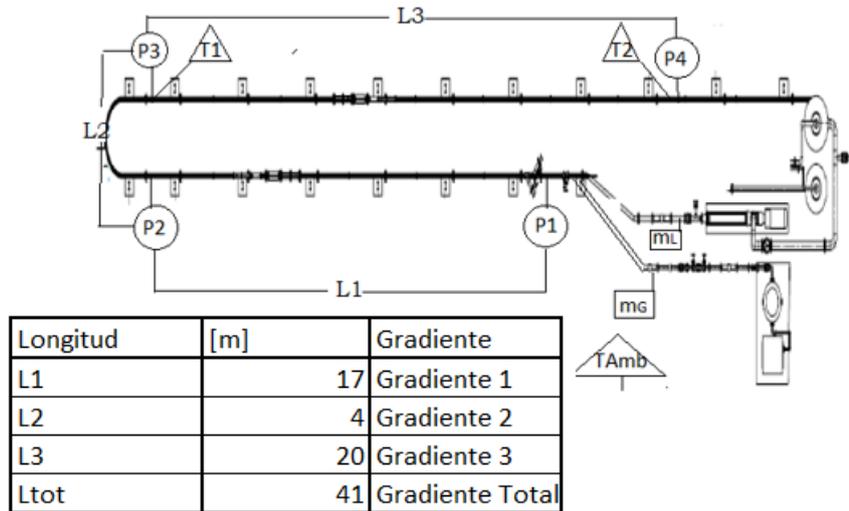
La matriz experimental fue diseñada con base en la capacidad del sistema experimental. En los intervalos señalados en la tabla para agua, y en las tablas para glicerina. Es importante señalar que se optó por utilizar glicerina con el objetivo de emular las propiedades físicas del petróleo crudo y de esta forma llevar a cabo los experimentos con fase líquida de alta viscosidad mediante una sustancia cuya hoja de seguridad química no representa un peligro en su manejo ni desecho a diferencia del petróleo crudo.

En la tabla 3-1 se muestran los aspectos más relevantes de las tres pruebas experimentales realizadas, en las que se adquirió a una tasa de 5[Hz].

3-1 Tabla Pruebas experimentales llevadas a cabo y variables medidas.

Prueba	Eventos	Variables	Datos por variable	Datos Por Punto de la Matriz Experimental	Total datos prueba
Agua-Aire	2	P1,P2,P3,P4,mL,mG,T1,T2	900	7200	129600
Glicerina-Aire #1	3	P1,P2,P3,P4,mL,mG,T1,T2	900	7200	129600
Glicerina-Aire #2	2	P1,P2,P3,P4,mL,mG,T1,T2,Tamb	900	8100	243000

Las variables referidas en la tercera columna se adquirieron mediante los medidores y transductores correspondientes, mencionados en la sección anterior. A continuación, se indican la disposición de cada medidor y transductor en el sistema.



3.14 Localización de sensores en el sistema experimental.

Como se muestra en las tablas presentadas a continuación, a cada flujo másico de la fase líquida le corresponden distintos flujos másicos de aire. En cada celda de la matriz experimental correspondiente a las tablas 3-2 y 3-3, se realizaron dos eventos para el caso de agua-aire y el primer set de glicerina-aire y tres eventos para el caso del segundo set de glicerina-aire. Con el objetivo de estimar las incertidumbres experimentales asociadas y verificar la reproducibilidad de cada experimento. La tabla 3-2 y 3-3 la tabla fueron el cumulo de datos experimentales con los cuales se sacaron los parámetros de entrada para generar la red neuronal artificial (Apéndice B).

3-2 Tabla Flujos máxicos prueba agua-aire

$\dot{m}_L \left[ \frac{kg}{s} \right]$	$\dot{m}_G \left[ \frac{g}{s} \right]$
1	5
1	10
1	20
3	5
3	10
3	20
5	5
5	10
5	20

3-3 Tabla Flujos máxicos prueba set#1 glicerina-aire

$\dot{m}_L \left[ \frac{Kg}{s} \right]$	$\dot{m}_G \left[ \frac{g}{s} \right]$
1.3	5
1.3	10
3.7	5
3.7	10
6.1	5
6.1	10

Finalmente, para la tabla 3-4 (correspondiente al set#2 glicerina-aire) se realizaron dos eventos y se extendió el dominio de la matriz experimental con la finalidad de validar<sup>3</sup> la red neuronal en puntos que no se habían tomado en las matrices experimentales anteriores.

3-4 Tabla Flujos máxicos prueba set# 2 glicerina-aire

$\dot{m}_L \left[ \frac{Kg}{s} \right]$	$\dot{m}_G \left[ \frac{g}{s} \right]$
1.3	5
1.3	10
1.3	15
2.5	5
2.5	10
2.5	15
3.7	5
3.7	10
3.7	15
4.9	5
4.9	10
4.9	15
6.1	5
6.1	10
6.1	15

---

<sup>3</sup> Los datos realizados en el set#2 de glicerina-aire no fueron utilizados en el entrenamiento de la RNA. Se realizaron con el objetivo de validar el modelo propuesto y verificar su capacidad de extrapolación en combinaciones de flujos máxicos no suministrados en su entrenamiento.

### 3.6 Procedimiento experimental.

Se estableció un protocolo experimental que satisficiera la matriz experimental anteriormente descrita y a partir del cual se genera una base de datos que posteriormente se le provee a los modelos matemáticos de Lockhart-Martinelli, TUFFP y que a su vez son utilizados para generar la red neuronal y posteriormente ser comparados.

A continuación, se presenta el procedimiento que se ha seguido para el inicio y desarrollo de cada experimento programado:

- 1 - Se realizó una inspección a los equipos del laboratorio de flujos multifásicos y se anotaron las observaciones en la bitácora experimental.
- 2 -Se realizó una inspección a las válvulas y se anotaron las observaciones en la bitácora experimental.
- 3 -Se energizaron los equipos por medio del tablero de distribución eléctrica.
- 4 -Se verificó que los medidores de flujo se encuentren funcionando correctamente.
- 5 -Se realizó la conexión de los sensores de presión y temperatura al adquisidor y al ordenador.
- 6 -Con la tubería sin fluido se realizó la calibración de los sensores de presión y se verifica que se encuentren a presión atmosférica, anotando el valor en la bitácora experimental y comparándola con las mediciones emitidas por la estación meteorológica de la UNAM.
- 7 -Se verificó mediante un termómetro de mercurio la temperatura ambiente y el termopar correspondiente a esta medida.
- 8 -Se anotaron las observaciones pertinentes en la bitácora y se procedió al encendido de la bomba, mediante el controlador ABB a una frecuencia de 10[Hz] que equivale  $\dot{m}_L \approx 1 \left[ \frac{kg}{s} \right]$  en agua y  $\dot{m}_L \approx 1.2 \left[ \frac{kg}{s} \right]$  en el caso de glicerina.
- 9 -Se mantuvo en circulación el fluido durante 10 min y se realizó la purga de aire "atrapado" en la sustancia.
- 10 -Se realizaron pruebas con flujo monofásico. Los datos extraídos son procesados mediante un programa realizado en Matlab que utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach para el caso donde  $Re > 2500$  y el modelo de Hagen-Poiseuille para el caso donde  $Re < 2500$ , con la finalidad de validar que el sistema se encuentra funcionando correctamente.
- 11 -Se extrajeron pruebas del fluido en circulación y se le realizó una prueba de viscosidad mediante el viscosímetro Brookfield.
- 12 -Una vez validadas las pruebas monofásicas ( $\epsilon_{relativo} 5\%$ ) se realizaron las pruebas bifásicas.
- 13 -Una vez establecido el flujo másico deseado para la fase líquida mediante el controlador de la bomba, se procedió con la inyección de gas deseada manteniendo una presión constante durante toda la prueba del compresor a 1.3[MPa].

- 14 -Una vez establecido el flujo másico de la fase gaseosa, se mantuvo en circulación durante 3 minutos fluyendo y finalmente se encendió el adquisidor de datos a una frecuencia de muestro de **5[Hz]** , durante 3 minutos en las que se capturan en tiempo “real” las variables de flujos másicos, presiones y temperaturas. De igual forma se realizó un seguimiento por prueba a las variables de bombeo (frecuencia de giro, corriente, temperatura, gasto másico y porcentaje de potencia) que se anotaron en la bitácora experimental.
- 15 - Entre cada experimento se extrajeron por completo la fase del líquido de todo el sistema y se repitieron los pasos del 6 al 9 y del 13 al 14.

## 4. Resultados Experimentales y Análisis.

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos durante las tres sesiones experimentales que se llevaron a cabo para el presente trabajo. A continuación, se muestran los valores del número de Reynolds y velocidades superficiales obtenidas para cada punto de la matriz experimental de las tres sesiones experimentales que se llevaron a cabo.

Es importante mencionar que los datos presentados a continuación fueron obtenidos al promediar las variables que se muestran en la tabla de la sección 3.5, en los eventos realizados para cada sesión experimental. Sin embargo, por cuestiones de presentación se realizó un promedio de cada evento y son los que se muestra a continuación. Si se desea consultar el valor para cada evento se puede remitir al apéndice.

En el caso de las pruebas con agua-aire se obtuvieron regímenes de flujo turbulentos para cada una de las fases ya que en el caso de la fase líquida se obtuvieron  $Re_L \{ 1.7 * (10^4), 8.6 * (10^4) \} [1]$  en el caso mínimo y máximo respectivamente, obtenidos mediante las velocidades superficiales en las que se obtuvieron valores de  $U_{SL} \{ 0.2, 1.1 \} [\frac{m}{s}]$ . En el caso de la fase gaseosa se obtuvieron  $Re_G \{ 5.5 * (10^3), 3.0 * (10^4) \} [1]$  y velocidades superficiales con valores de  $U_{SG} \{ 0.2, 6.9 \} [\frac{m}{s}]$ .

Tabla 4-1 Números de Reynolds y velocidades superficiales, para cada fase obtenidas en la prueba agua-aire

$Re_L * (10^4)$	$Re_G * (10^3)$	$U_{SL} [\frac{m}{s}]$	$U_{SG} [\frac{m}{s}]$	$\dot{m}_L [\frac{kg}{s}] - \dot{m}_G [\frac{g}{s}]$
1.717	6.715	0.232	1.661	1 - 5
1.712	18.562	0.231	4.418	1 - 10
1.710	29.576	0.231	6.867	1 - 20
5.173	5.543	0.699	1.262	3 - 5
5.163	18.303	0.698	3.627	3 - 10
5.150	27.412	0.696	5.049	3 - 20
8.608	5.483	1.163	1.120	5 - 5
8.592	18.175	1.161	3.072	5 - 10
8.580	26.715	1.159	4.117	5-20

En cuanto al primer set experimental llevado a cabo con glicerina-aire, se puede destacar que el régimen de flujo para la fase líquida fue laminar en todos

las casos al obtenerse valores de  $Re_L \{ 4.9 * (10^1), 22.3 * (10^1) \} [1]$  y con velocidades superficiales iguales a las obtenidas en la sesión experimental para aire-agua con valores de  $U_{SL} \{ 0.2, 1.13 \} [\frac{m}{s}]$ . En cuanto a la fase gaseosa se mantuvo un régimen turbulento debido a que se obtuvieron valores de  $Re_G \{ 5.0 * (10^3), 1.0 * (10^4) \} [1]$ , en cuanto a las velocidades superficiales  $U_{SG} \{ 0.45, 1.8 \} [\frac{m}{s}]$ .

Tabla 4-2 Números de Reynolds y velocidades superficiales, para cada fase obtenidas en el set#1 glicerina-aire

$Re_L * (10^1)$	$Re_G * (10^3)$	$U_{SL} [\frac{m}{s}]$	$U_{SG} [\frac{m}{s}]$	$\dot{m}_L [\frac{kg}{s}] - \dot{m}_G [\frac{g}{s}]$
52	5.055	0.264	0.931	1.3 - 5
50.9	10.732	0.259	1.871	1.3 - 10
136.9	5.550	0.695	0.644	3.7 - 5
137.1	10.453	0.696	1.166	3.7 - 10
223	5.110	1.133	0.458	6.1 - 5
222.8	10.225	1.132	0.898	6.1 - 10

En el caso referente a la segunda prueba realizada con glicerina-aire, se puede destacar que el régimen de flujo para la fase líquida se mantuvo laminar en todos los casos, con una disminución importante en los valores del número de Reynolds con respecto a la sesión experimental anterior, al obtenerse valores de  $Re_L \{ 2.4 * 10^1, 11.6 * 10^1 \} [1]$  y velocidades superficiales de  $U_{SL} \{ 0.2, 1.12 \} [\frac{m}{s}]$ .

En cuanto a la fase gaseosa se mantuvo un régimen turbulento ya se obtuvieron valores de  $Re_G \{ 1.0 * 10^4, 4.2 * 10^3 \} [1]$ , en cuanto a las velocidades superficiales con valores de  $U_{SG} \{ 0.3, 1.8 \} [\frac{m}{s}]$ .

Tabla 4-3 Números de Reynolds y velocidades superficiales, para cada fase obtenidas en el set#2 glicerina-aire

$Re_L * (10^1)$	$Re_G * (10^3)$	$U_{SL} [\frac{m}{s}]$	$U_{SG} [\frac{m}{s}]$	$\dot{m}_L [\frac{kg}{s}] - \dot{m}_G [\frac{g}{s}]$
24.89	4.909	0.239	0.672	1.3 - 5
24.99	7.161	0.239	0.952	1.3 - 10
25.72	9.524	0.241	1.249	1.3 - 15
48.61	4.817	0.468	0.472	2.5 - 5
48.48	7.415	0.467	0.712	2.5 - 10
48.73	10.066	0.467	0.959	2.5 - 15
70.88	4.251	0.682	0.344	3.7 - 5
71.03	6.803	0.683	0.543	3.7 - 10

70.90	9.282	0.684	0.739	3.7 - 15
93.61	5.230	0.910	0.379	4.9 - 5
93.70	7.740	0.902	0.560	4.9 - 10
93.43	10.245	0.902	0.742	4.9 - 15
116.53	4.400	1.121	0.306	6.1 - 5
116.56	6.896	1.122	0.477	6.1 - 10
116.03	9.362	1.122	0.648	6.1 - 15

#### 4.1 Medición de viscosidad.

Se realizó la medición de viscosidad para la glicerina mediante el viscosímetro Brookfield-LVD2T utilizando la punta número 62 a 30rpm, parámetros que abarcan un rango de viscosidades de 100cP a 1700cP.

Cada sesión experimental se realizó una medición de viscosidad en la cual la temperatura se monitoreo simultáneamente, obteniéndose una curva de 10 puntos de medición y de los cuales se extrajo el valor promedio obtenido. Dichos valores se reportan en la tabla.

Es importante mencionar que el viscosímetro no permite medir de forma adecuada viscosidades “bajas” ( $\mu < 3\text{cP}$ ) por lo que, en el caso de las pruebas realizadas con agua, la viscosidad fue supuesta como agua a una temperatura de 20°C (1cP).

*Tabla 4-4 Viscosidad promedio en cada prueba experimental realizada*

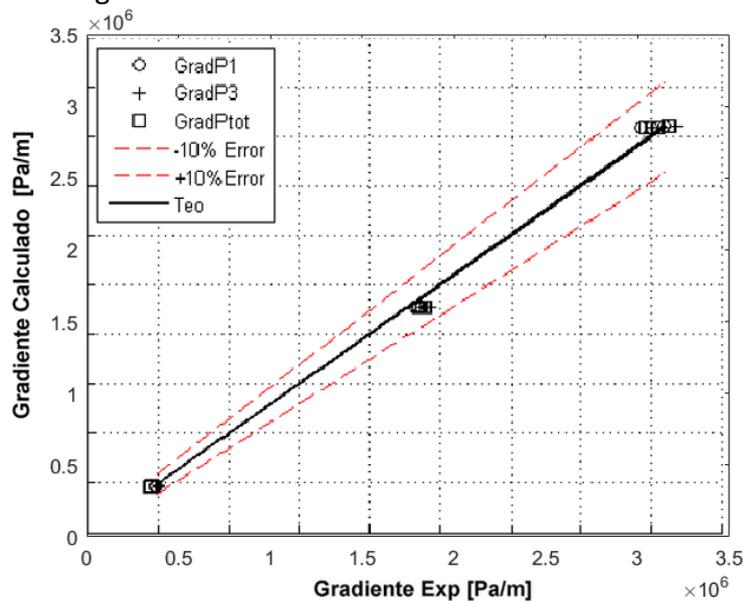
Prueba	Viscosidad $\mu_L$ [cP]
Agua-Aire	1
Glicerina-Aire #1	475
Glicerina-Aire #2	930

## 4.2 Validación del sistema experimental (pruebas monofásicas).

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos de una de las pruebas monofásicas, realizadas previamente a cada prueba bifásica y que fueron llevadas a cabo con el objetivo de validar el sistema experimental, siendo estas realizadas con glicerina como sustancia.

Se procesaron los datos, y al presentar un número de Reynolds menor a 2500, correspondiente a régimen laminar, se aplicó la relación directa entre el número de Reynolds y el factor de pérdidas de Darcy  $f = \frac{64}{Re}$  a la ecuación (25). Posteriormente el valor obtenido se dividió entre las longitudes mostradas en el diagrama de la sección 3.5 para obtener el gradiente de presión monofásico.

En la gráfica 4.1 se muestra una prueba monofásica llevada a cabo con glicerina, para tres gastos máxicos ( $1.7 \left[ \frac{kg}{s} \right]$ ,  $3.7 \left[ \frac{kg}{s} \right]$  y  $6.1 \left[ \frac{kg}{s} \right]$ ), en la que se ilustran tres gradientes medidos correspondientes a las posiciones de los sensores de presión, indicadas en el diagrama 3.14.



4.1 Gráfica de resultados experimentales, prueba monofásica realizada con glicerina. viscosidad de 480 [cP].

Como se puede observar el error entre los valores experimentales y teóricos, se encuentran un rango de 5% con lo que se valida el funcionamiento correcto de la instrumentación del sistema experimental y el desempeño de los transductores.

### 4.3 Aplicación del modelo Lockhart - Martinelli (Chisholm 1967).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al aplicar el modelo Lockhart - Martinelli (1949) sin embargo, como se mencionó en el capítulo 2.4.3, propiamente la metodología empleada en este trabajo en la determinación del gradiente de presión es la que viene dada por Chisholm (1967).

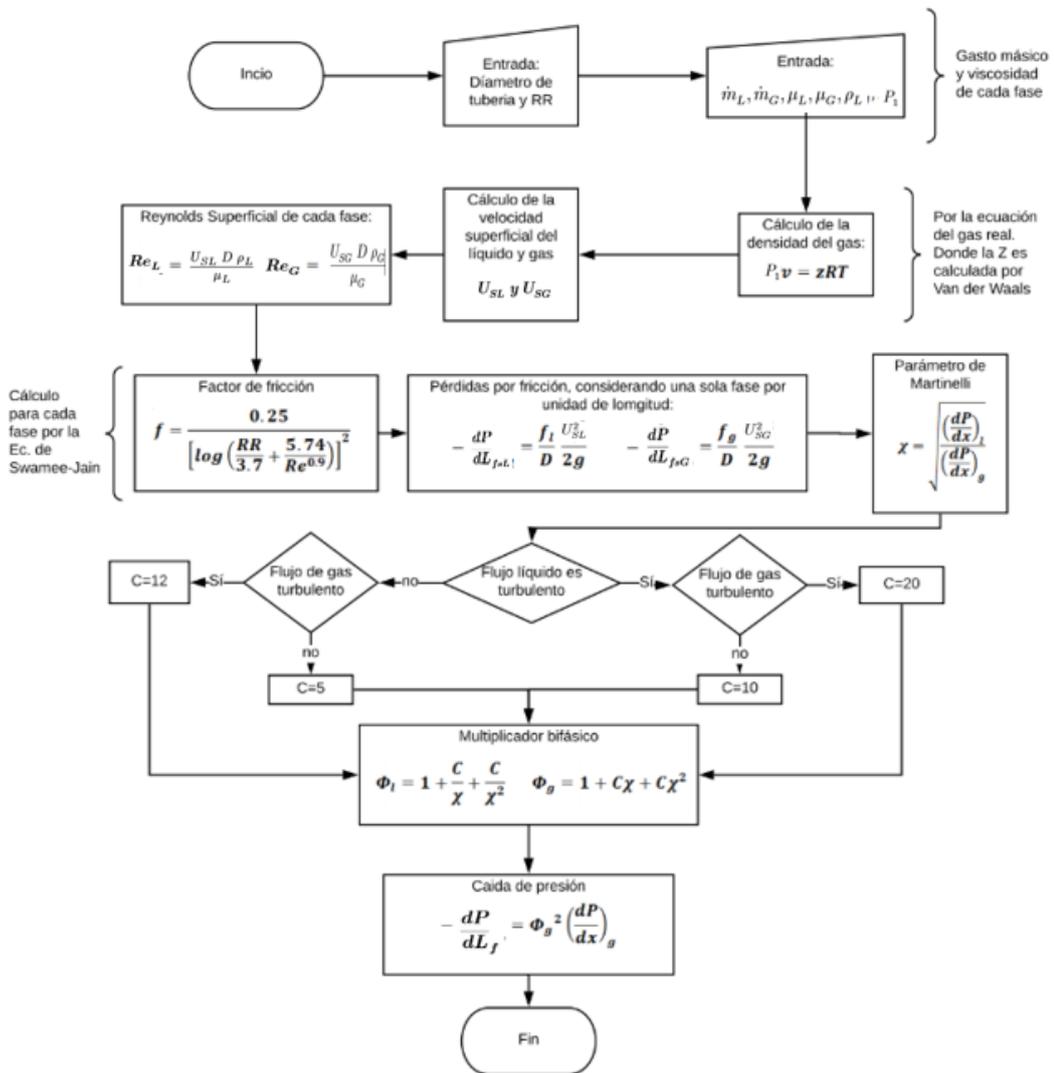
A continuación, se muestra en forma de diagrama de flujo el algoritmo de aplicación del modelo que fue empleado y programado para análisis en cada sesión experimental.

#### 4.3.1. Algoritmo.

Inicialmente se configuran los valores constantes propios de la configuración y propiedades físicas de la tubería (rugosidad relativa, diámetro, longitud). Posteriormente se colocan los valores asociados a las propiedades físicas de los fluidos (viscosidad, densidad, temperaturas), al igual que las características propias de flujo (flujos máscos). En el caso particular de la fase gaseosa, su densidad se calcula empleando la ecuación de estado para un gas "real", por lo que se consideró un factor de compresibilidad que fue calculado aplicando la ecuación de Vander-Walls. Para la ecuación de estado se consideró el valor de temperatura adquirido en el termopar número 1 y una presión promedio, medida entre los transductores 1 y 2. Es importante mencionar que no existió una diferencia representativa entre la aplicación de la ecuación de estado de gas ideal y la del gas real debido a las condiciones experimentales, sin embargo, se considera dicha ecuación, con la finalidad de generalizar y no restringir el dominio experimental en futuros análisis.

Posteriormente se procede al cálculo de las velocidades superficiales de cada fase ( $U_{SL}$  y  $U_{SG}$ ), utilizando dichas velocidades se realiza el cálculo de número de Reynolds, y con ello se obtiene el factor de pérdidas por fricción aplicando la ecuación de Swamee-Jain (1976) (en caso de un flujo laminar se utiliza la ecuación  $f = \frac{64}{Re}$ , derivada

de la solución analítica de Hagen-Poiseuille) con la finalidad de obtener las pérdidas por fricción. Esto es realizado para cada una de las fases y con ello se procede a la obtención del parámetro de Martinelli. Posteriormente es evaluado el tipo de flujo que se tiene en cada fase (laminar o turbulento) y con base en ello se selecciona el valor que adquiere la constante de Chisholm con la que se calculan los multiplicadores multifásicos. finalmente se toma la caída de presión mayor y se multiplica por su multiplicador bifásico correspondiente.

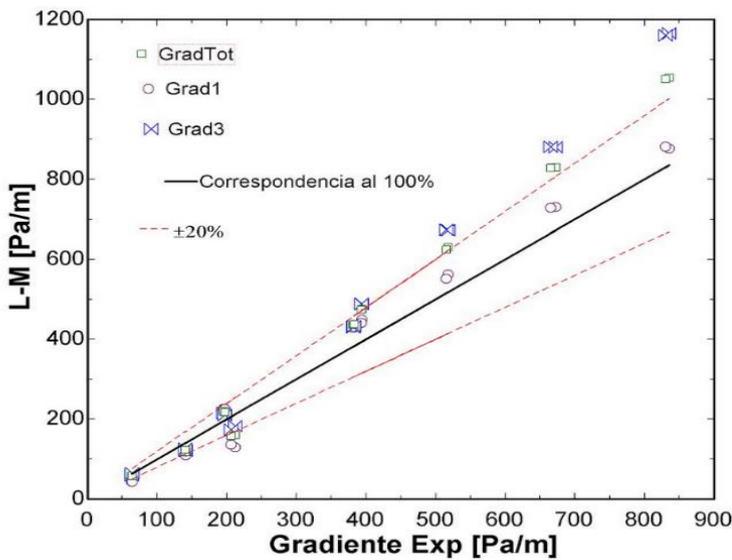


4.2 Algoritmo de cálculo, modelo Lockhart-Martinelli (1949) - Chisholm (1967)

#### 4.3.2. Resultados obtenidos.

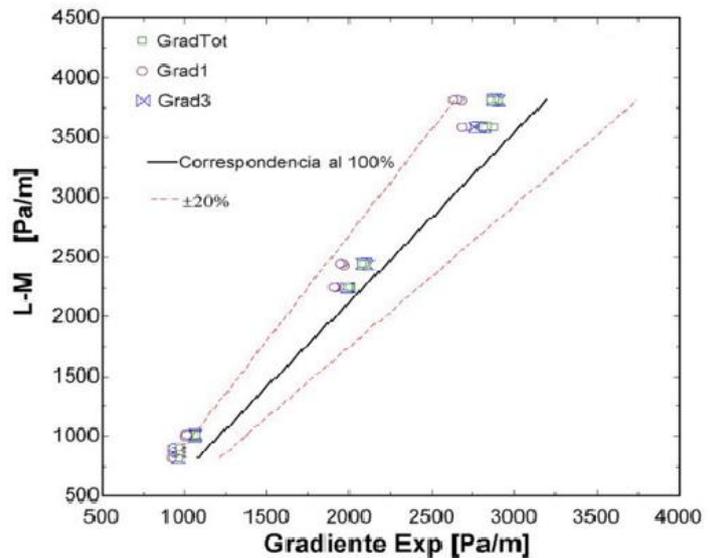
A continuación, se muestran los resultados obtenidos aplicando el modelo de Lockhart-Martinelli (1949) con la ecuación propuesta por Chisholm (1967) en los que es apreciable observar que el gradiente de presión es distinto en cada sección de medición. De igual forma se observa que el modelo tiene una clara tendencia a sobre predecir el gradiente de presión en el caso del gráfico 4.3, correspondiente a la prueba agua-aire, y es particularmente mayor en la sección de la descarga del circuito experimental (gradiente 3). Esta sobre predicción que presenta el modelo es menor en la gráfica 4.4 correspondiente a glicerina-aire con una viscosidad de la fase de líquida de 475[cP].

Se observa que en la gráfica 4.4 y 4.5 los datos presentan una mayor precisión y exactitud con respecto a la prueba experimental de agua-aire, correspondiente a la gráfica 4.3, en donde se observa una mayor dispersión en los datos.



4.3 Resultados experimentales modelo L-M. Prueba Agua-Aire

$$\mu_L = 1[cP].$$

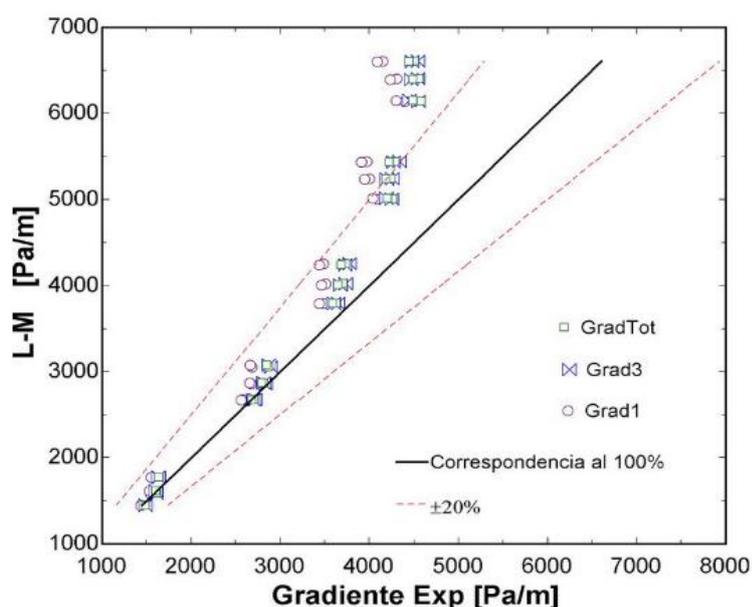


4.4 Resultados experimentales modelo L-M. Set#1 Glicerina-Aire.

$$\mu_L = 475[cP]$$

En las gráficas presentadas anteriormente y en el gráfico 4.5, se observa un “empalme” o “superposición” en todos los puntos experimentales realizados y para todas las secciones de la tubería. Esto se debe a dos factores: a la similitud que existe en el valor del gradiente de presión, para mismos gastos máxicos de líquido y distintos gastos de gas, y la escala de los gráficos. Ya que se muestran únicamente los promedios de cada punto experimental (promedio de dos eventos en el caso de los gráficos 4.3 y 4.4).

En el caso de la segunda prueba experimental, realizada con glicerina-aire con una viscosidad en la fase líquida de 930 [cP] (correspondiente al gráfico 4.5), se observa un mejor desempeño en los primeros tres puntos experimentales (correspondientes a los flujos máscicos de 1.3, 2.5 y 3.7 [ $\frac{kg}{s}$ ]), con respecto al gráfico 4.4. Sin embargo, se observa una sobre predicción mayor, y que va en aumento al aumentar el flujo máscico de la fase líquida. En el caso del gráfico 4.5 se muestran los promedios de los tres eventos realizados para cada punto de la matriz experimental.



4.5 Resultados experimentales modelo L-M. Set#2 Glicerina-Aire

$$\mu_L = 930[cP].$$

#### 4.4 Aplicación del modelo unificado TUFFP.

##### 4.4.1. Algoritmo.

Para el caso del modelo unificado se debe mencionar que el software es elaborado y desarrollado por el Dr. Carlos F. Torres y el Dr. Eduardo Pereyra, de la universidad de Tulsa.

Basado principalmente en distintas publicaciones científicas del grupo de trabajo de la Universidad de Tulsa; de las cuales se destaca el trabajo de Zhang (2003).

Se trata de un software en desarrollo que involucra una cantidad considerable de correlaciones de cierre y al cual se tuvo acceso debido a la participación conjunta de un consorcio, en el que el Instituto de ingeniería de la UNAM y la universidad de Tulsa participan. El programa (elaborado en Fortran) ejecutable arroja los resultados a través de la programación realizada en Excel con Visual Basic. Dicho código realizado en Fortran comprende 91 modelos o correlaciones distintas, lo que hace impráctico presentar el algoritmo, sin mencionar que el código comprende 19 años de desarrollo. Por esta razón se colocan a continuación capturas de pantalla de la interfaz gráfica del programa.

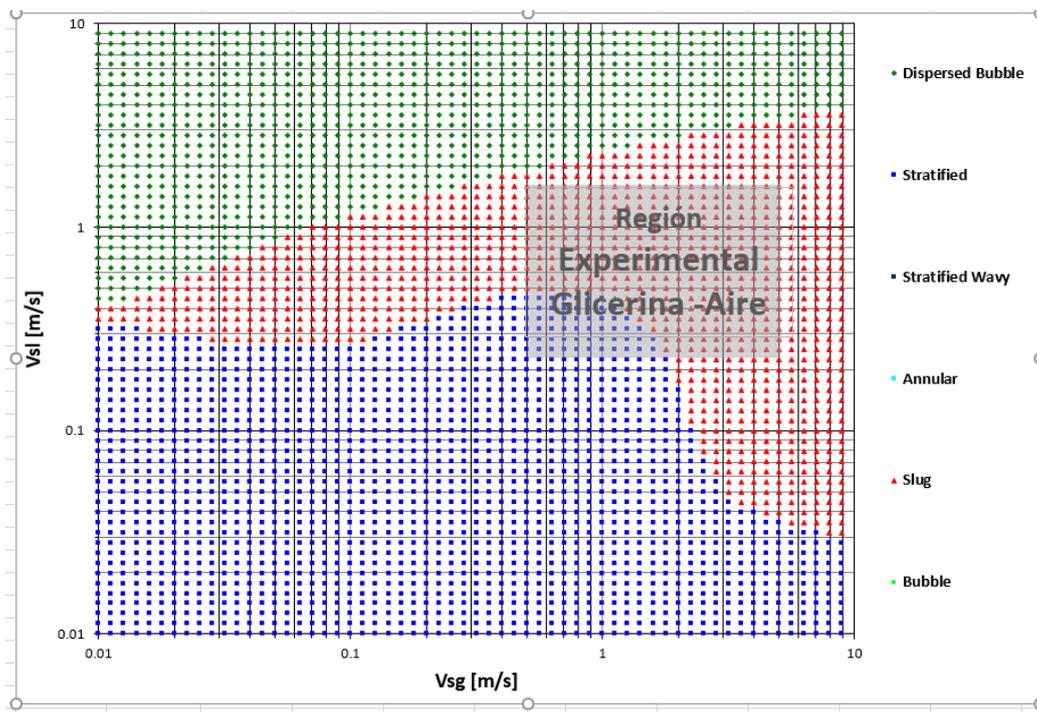
Inicialmente se colocan los datos de las variables de entrada (diámetro, viscosidades, densidades, rugosidad absoluta y tensión superficial) en cuadros de texto, para el cálculo del mapa de patrón de flujo de las fases involucradas.



4.6 Captura de pantalla interfaz gráfica TUFFP v2016.64bits. Entrada de datos patrón de flujo

Finalmente se colocan la cantidad de puntos a imprimir en el mapa de patrón de flujo y el dominio (velocidades superficiales).

A continuación, se muestra el mapa generado para el set#2 de glicerina-aire ( $\mu_L = 930[cP]$ ).



4.7 Mapa de patrón de flujo modelo TUFFP para glicerina-aire.

$$\mu_L = 930[cP].$$

En el patrón se observa que nos encontramos efectivamente en flujo intermitente del tipo bache o “slug” Flow y en una región pequeña de transición con estratificado

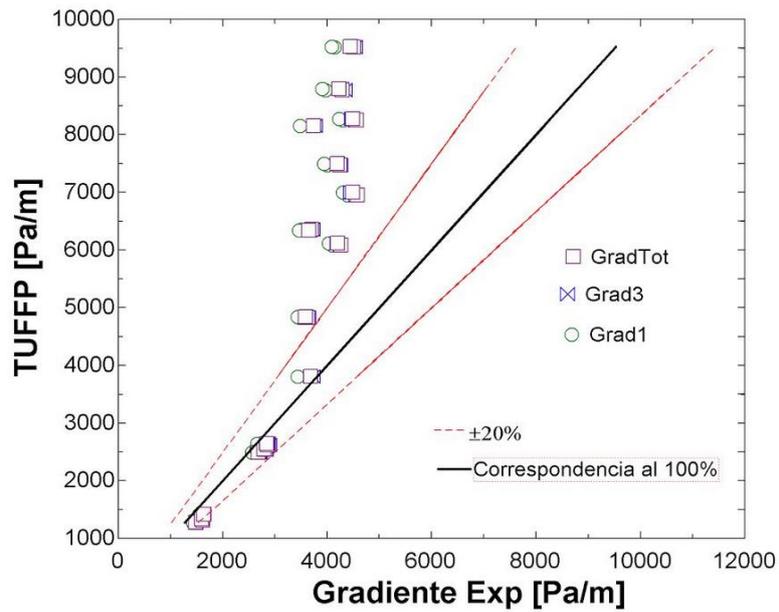
A continuación, se muestra cómo se ingresan los valores de las variables al modelo TUFFP, para el cálculo del gradiente de presión. Mediante una hoja de cálculo de Excel asociada a una macro, se ingresan los datos de: diámetro de la tubería, rugosidad absoluta, inclinación, velocidad superficial del gas, velocidad superficial del líquido, densidad del gas, densidad del líquido, viscosidad del gas, viscosidad del líquido.

Run	Pressure	Pipe Diameter	Pipe Roughness	Pipe Incline	Sup Gas Velocity	Gas Density	Gas Viscosity	Sup Liq Velocity	Liq Density	Liq Viscosity	Liq Surface Tension	Model	Maximum Entrainment	Entrainment Model	Stability Model	Interfacial Friction Model	Wall Friction Model	Mixture Friction Model	Slug Length Frequency Model	Slug Velocity Model	Slug Distribution at Velocity Model	
MARCO-2018-3042-Sp1	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	1.025000	0.980250	0.000010	0.237000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp2	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	1.064200	0.980250	0.000010	0.232000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp3	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	4.465500	1.020250	0.000010	0.230000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp4	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	4.260200	1.020250	0.000010	0.228000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp5	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	0.982000	0.980250	0.000010	0.238000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp6	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	0.752000	0.980250	0.000010	0.232000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp7	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	1.270200	0.980250	0.000010	0.230000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp8	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	0.428000	0.980250	0.000010	0.238000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp9	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	0.980000	1.020250	0.000010	0.230000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp10	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	1.027000	1.020250	0.000010	0.230000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp11	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	1.020000	1.020250	0.000010	0.230000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp12	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	1.020000	1.020250	0.000010	0.230000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp13	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	0.980000	1.020250	0.000010	0.230000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp14	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	0.980000	1.020250	0.000010	0.230000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCO-2018-3042-Sp15	1.000E+05	0.0254	0.0001E-05	0.00	0.980000	1.020250	0.000010	0.230000	990.0000	0.000000	0.072000	unified	0.750000	4	0	0	0	0	0	0	0	0

4.8 Variables de entrada, calculo de gradiente de presión, modleo TUFFP.



De igual forma en el caos del gráfico 4.12, se observa un desempeño dentro del orden del 10% de desviación en los primeros tres flujos másicos de líquido, sin embargo, al igual que el modelo de Lockhart-Martinelli, para el mismo caso (gráfica 4.5) a medida que el flujo másico de líquido aumenta el error se incrementa.



4.12 Resultados experimentales modelo TUFFP ,set#2 glicerina-aire.

$$\mu_L = 930[cP].$$

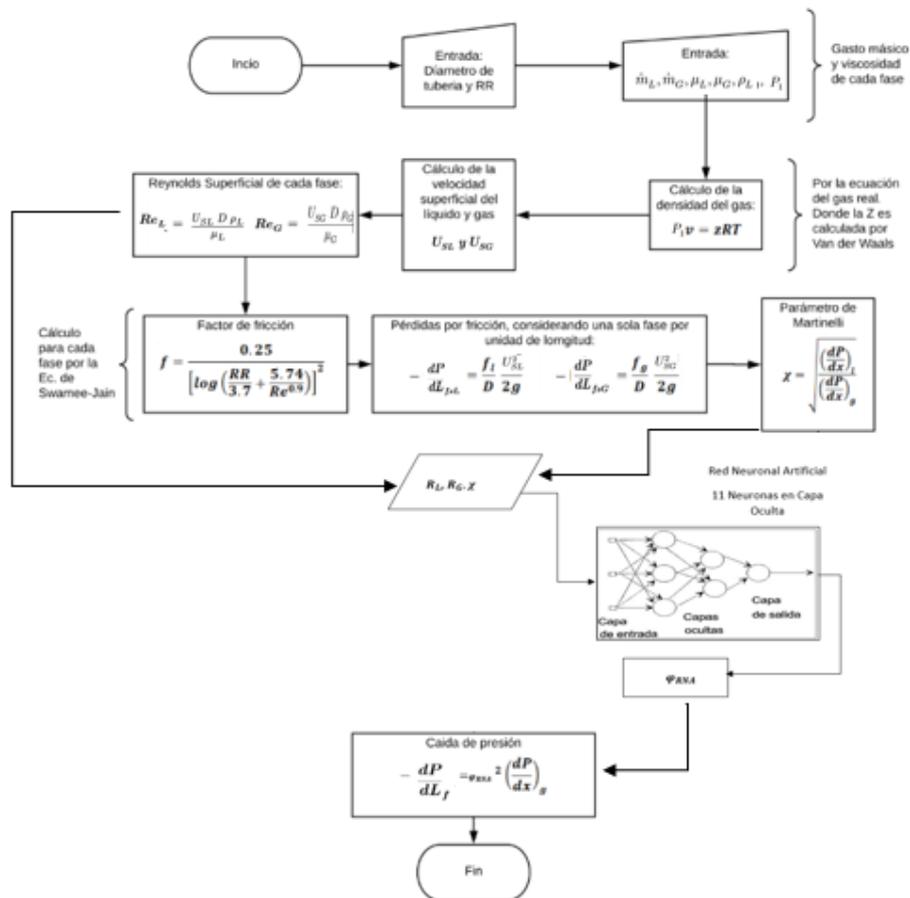
## 4.5 Aplicación de modelo propuesto RNA.

### 4.5.1. Algoritmo.

Como se muestra en el siguiente diagrama de flujo, el modelo propuesto cambia con relación al de Lockhart-Martinelli (Chisholm 1967), en el cálculo del multiplicador bifásico. Como se mencionó previamente en la sección 2.5 se programó una RNA con la arquitectura de un PMC (véase Apéndice B-i) como aproximador universal. El cual fue utilizado con la finalidad de buscar la relación funcional  $\varphi(Re_{SL}, Re_{SG}, X)$  óptima que ampliara el dominio de aplicabilidad del método para viscosidades de órdenes de magnitud de  $10^0$  hasta  $10^3$  [cP] y que a su vez simplificara el método original propuesto por Chisholm (1967) al adaptarse a cada régimen de flujo, y con ello representar mediante una única función las cuatro posibles combinaciones de régimen que se pueden presentar.

La determinación de la relación funcional óptima, se obtuvo mediante el “entrenamiento” de la RNA, buscando que esta “aprendiera” y se “adaptara” al fenómeno físico. Para ello se le otorgaron los datos experimentales del set agua-aire y del set #1 glicerina-aire, previamente pre-procesados (véase apéndice B-ii) y con ello se llevó a cabo el “entrenamiento”. El cual consta de una serie de iteraciones denominadas “epochs”, en las que se modifican los ponderadores o “pesos”, al igual que los términos de ajuste o “término bias” para cada capa de la RNA.

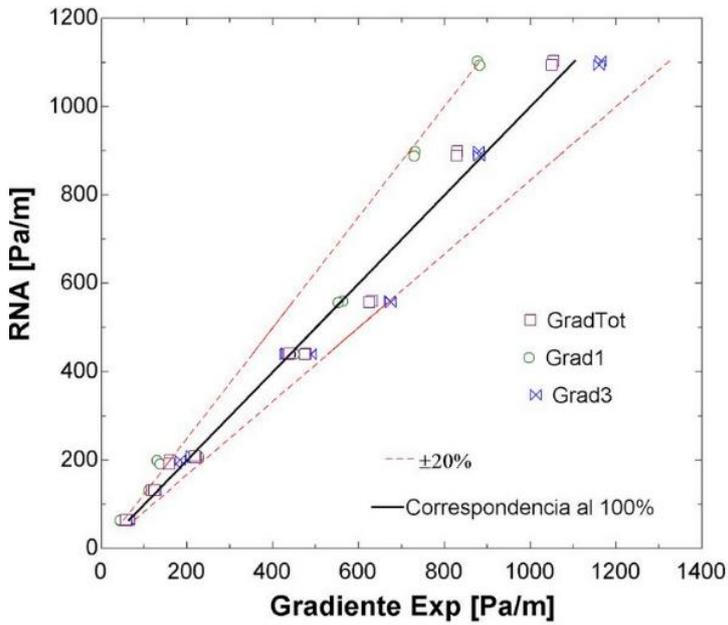
La combinación óptima se obtiene comparando el error existente entre lo calculado y el “valor objetivo” (dato experimental), y de forma paralela actualiza cada ponderador y cada término de ajuste para cada una de las neuronas, buscando un mínimo global en la función de error. Para ello se empleó el algoritmo “*Back-Propagation*” o retro-propagación (véase apéndice B-iii), que como su nombre lo indica realiza el cálculo y la búsqueda del mínimo global en el error desde la salida hasta las entradas otorgadas, de forma iterativa hasta que se alcanza el desempeño deseado.



4.13 Algoritmo de cálculo modelo propuesto basado en Redes Neuronales Artificiales.

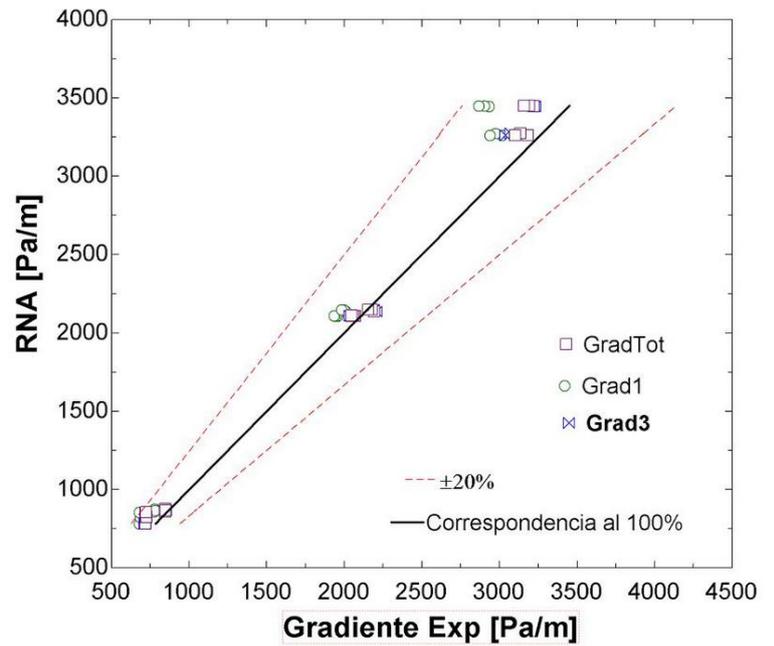
#### 4.5.2. Resultados obtenidos.

Como se puede observar en los resultados obtenidos para el modelo propuesto basado en la RNA. Es apreciable que se tiene una mejora en el desempeño global con respecto a los dos modelos anteriores. Cabe señalar que el mejor desempeño lo muestra tanto en el set #1 de glicerina-aire (gráfico 4.15) como en el set agua-aire gráfico 4.13), sin embargo, este desempeño era esperado, debido a que estos datos formaron parte del entrenamiento de la RNA (véase apéndice Bii). Por ello, la validación del modelo y su desempeño viene dado por los resultados del set #2 de glicerina-aire gráfica (4.15), el cual muestra una mayor exactitud en comparación con los tres modelos anteriormente evaluados.



4.14 Resultados experimentales modelo RNA, agua-aire

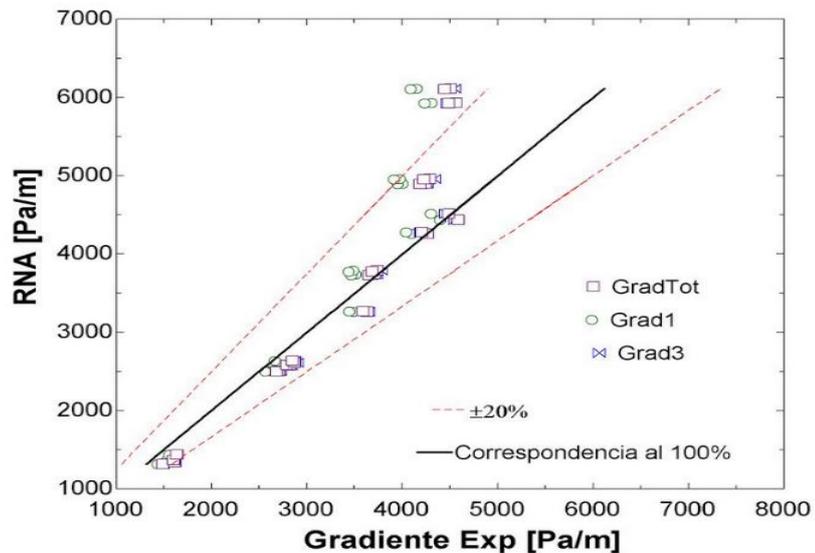
$$\mu_L = 1[cP].$$



4.15 Resultados experimentales modelo RNA, set#1 glicerina-aire

$$\mu_L = 475[cP].$$

En cuanto al gráfico 4.16, se observa un desempeño dentro del 7% de desviación en todas las secciones de la tubería. Sin embargo, al igual que en los modelos anteriores (gráficos 4.5 y 4.12) para esta sesión experimental la desviación se incrementa en los gastos mayores de líquido.



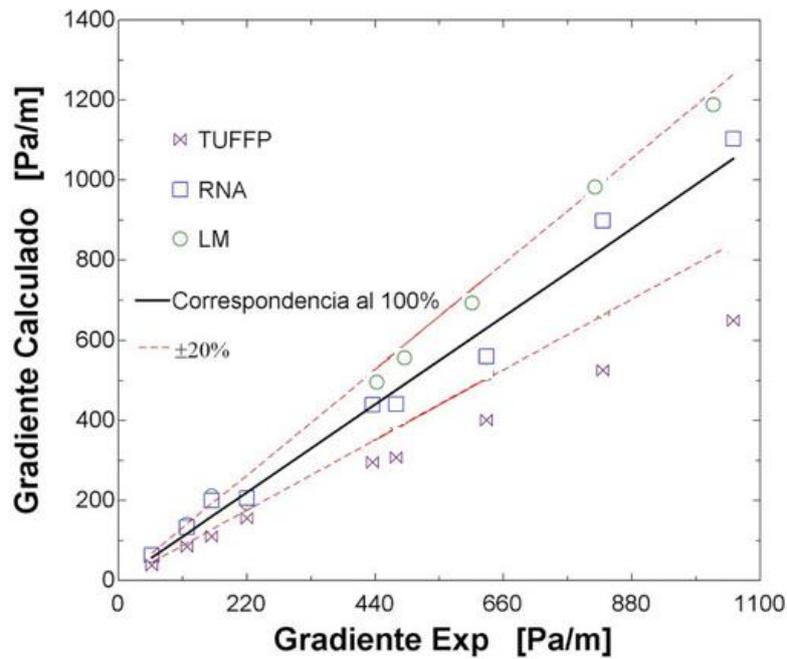
4.16 Resultados experimentales modelo RNA, set#2 glicerina-aire

$$\mu_L = 930[cP].$$

### 4.5.3. Comparativa de modelos

A continuación, se muestran los resultados de los tres modelos considerando el gradiente total, correspondientes a los experimentos de agua-aire, set#1 de glicerina-aire y set#2 de glicerina-aire respectivamente. En dichas graficas se puede observar de forma más clara que el modelo que muestra el mejor desempeño en todos los casos es el modelo propuesto de la RNA, sin embargo, en la sección de discusión se desarrollan aspectos particulares correspondientes a cada modelo, de igual forma se añaden tablas de datos y gráficos de señal propios de los transductores en el apéndice C.

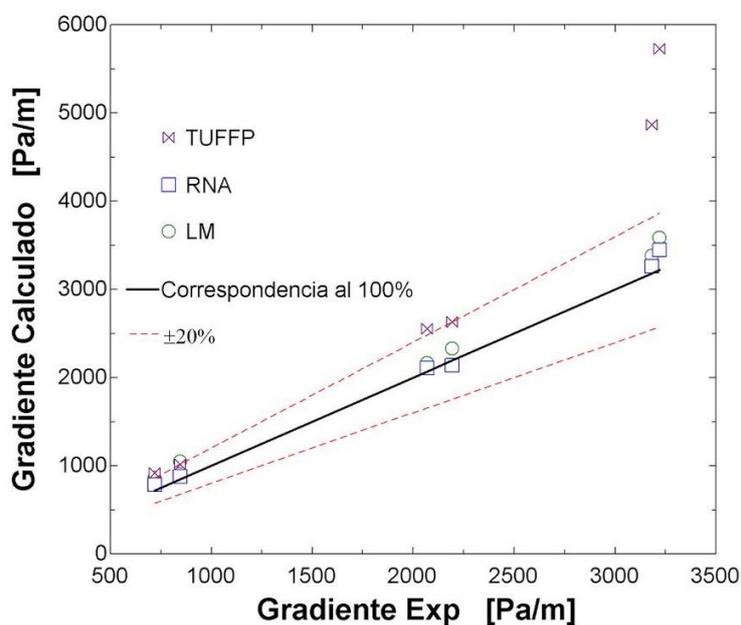
En el caso de la prueba llevada a cabo con agua-aire (gráfica 4.17) se observa que el mejor desempeño lo muestra el modelo propuesto basado en la RNA, y de forma análoga el TUFFP muestra el peor desempeño con valores dentro del 30% de desviación. También se muestra que esta prueba es en la que se obtuvo el peor desempeño global, en los tres modelos.



4.17 Comparativo resultados experimentales, agua-aire

$$\mu_L = 1[cP].$$

En el gráfico 4.18, se muestra la comparación entre los tres modelos para el set#1 de glicerina, con una viscosidad en la fase líquida de 470[cP]. En el gráfico 4.17 se observa un mejor desempeño global de los tres modelos con respecto al caso de agua-aire (gráfico 4.17). Se destaca el desempeño del modelo tradicional Lockhart-Martinelli y el modelo propuesto basado en RNA, al presentar una desviación promedio del 12%. Y se observa el peor desempeño para el modelo TUFFP de forma global y en particular para el mayor gradiente de  $3200[\frac{Pa}{m}]$ , que corresponde al gasto másico de  $m_L = 6.1[\frac{kg}{s}] - m_G = 5[\frac{g}{s}]$  y  $m_L = 6.1[\frac{kg}{s}] - m_G = 10[\frac{g}{s}]$ . En los cuales la desviación de un 65%, con respecto al valor experimental.



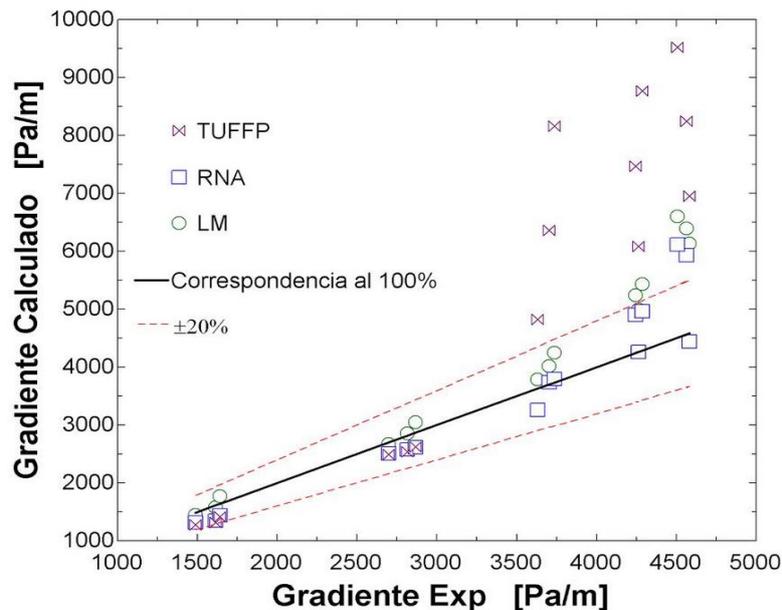
4.18 Comparativo resultados experimentales, set#1 glicerina-aire

$$\mu_L = 475[cP].$$

En el caso del set#2 de glicerina-aire (gráfico 4.19), con una viscosidad en la glicerina de 930[cP]. En el cual se añadieron puntos experimentales intermedios (como lo muestra la tabla 3-4), y cuyos datos no fueron utilizados en el entrenamiento de la RNA, con la finalidad de validar el modelo y evaluar su capacidad de predicción.

Se observa que la RNA presenta una mejora significativa en cuanto a la predicción del gradiente de presión para el caso del modelo propuesto basado en RNA. De igual forma presenta un mejor desempeño en el caso del modelo tradicional Lockhart-Martinelli, respecto a las pruebas anteriores, en las que la viscosidad del líquido es menor.

En el gráfico 4.19, se observa de forma clara que en los tres modelos el peor desempeño se presenta en los tres últimos puntos experimentales correspondientes a los gastos máxicos de glicerina  $3.7[\frac{kg}{s}]$ ,  $4.9[\frac{kg}{s}]$  y  $6.1[\frac{kg}{s}]$ , para todos los gastos máxicos de aire. Particularmente se puede observar que en el modelo TUFFP se ve con mayor amplitud esta desviación, con un valor del 60%.



4.19 Comparativo resultados experimentales, set#2 glicerina-aire

$$\mu_L = 930[cP].$$

#### 4.6 Discusión.

Es apreciable en las tres pruebas, que los gradientes de presión son dependientes de la zona en la que se realice la medición, contrario a lo que se obtiene por definición en los flujos monofásicos. Esto se le puede asociar a la existencia de una “evolución” espacial y temporal del flujo. Ya que es notoria la diferencia en el valor del gradiente de presión en cada transductor y que en particular se ve acentuada en el último gradiente de presión, siendo este el que se encuentra más próximo a la descarga del sistema (cuatro metros), ya que el gas debería modificar su presión al aproximarse a esta zona de descarga, en donde la presión es la presión atmosférica de la Ciudad de México.

Si comparamos los resultados con velocidades superficiales iguales de aire, entre la sesión experimental llevada a cabo con agua-aire y las llevadas a cabo con glicerina-aire, se puede observar en los gráficos de resultados 4.3, 4.4 y 4.5, una

menor precisión, que se puede deber a la propagación de efectos de presión en la descarga, aguas abajo del sistema. Para la glicerina estos efectos se ven mitigados por efectos difusivos (alta viscosidad), ya que los números de Reynolds para las pruebas llevadas a cabo con glicerina como fase líquida, son de al menos tres órdenes de magnitud menores que en los casos de agua.

En el caso específico de la sesión experimental, set#2 glicerina-aire, la cual presentó una viscosidad en la glicerina de 930[cP], se observa un aumento en la desviación (valor medido y calculado), para los tres modelos. Ya que, a mayor gradiente de presión, aumenta la sobre predicción en los tres modelos, siendo esta desviación significativamente mayor en el modelo TUFFP (gráfico 4.19).

Dicha desviación en los tres modelos es atribuida a la viscosidad de la glicerina, ya que en el cálculo de los tres modelos se consideró una viscosidad constante, medida al inicio de la sesión experimental. Esto se comprobó al analizar los datos de temperatura y la bitácora experimental para esta prueba (véase apéndice D), en donde se observa que la temperatura sufrió un aumento considerable a lo largo de la sesión experimental. Por lo que la viscosidad de la glicerina se vio afectada. De igual forma el transcurso del tiempo durante la sesión experimental, ocasiono que la glicerina absorbiera agua de la humedad del ambiente, y al tratarse de una sustancia altamente higroscópica la viscosidad se vio modificada (reducida) entre un 46% y 50%.

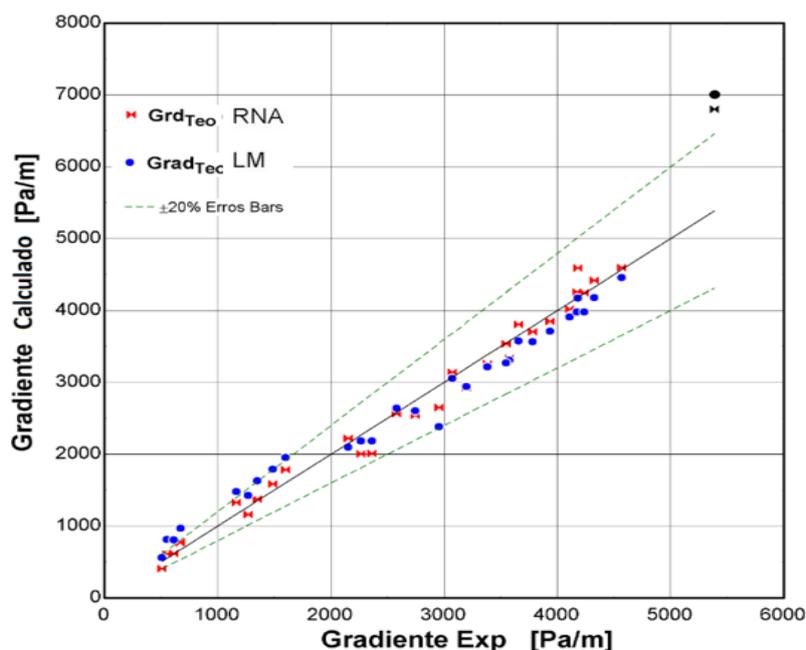
Como consecuencia de lo mencionado en el párrafo anterior, se decidió incluir la medición de viscosidad de la fase líquida (glicerina), durante cada uno de los eventos que conforman la matriz experimental. Y se obtuvieron valores de viscosidad en la glicerina en el rango de, 735[cP] correspondiente al máximo valor medido y 535[cP] correspondiente al mínimo valor medido (véase apéndice C). Cada valor de viscosidad fue asociado a cada prueba de la matriz experimental y de esta forma se llevó a cabo el cálculo de los modelos RNA y Lockhart-Martinelli tradicional.

Así mismo, se incluyeron nuevas combinaciones de gastos máscicos de ambas fases, respecto al set#2 glicerina-aire con la finalidad de ampliar el dominio de la matriz experimental y tener mayor cantidad de datos de gradiente de presión.

Por otro lado, en el gráfico 4.20, también se añade el resultado de una sola prueba realizada en el laboratorio alterno (CICERM), empleando crudo como fluido principal de trabajo. Con una viscosidad de  $\mu_L = 7500[cP]$  y densidad de  $\rho_L = 870[\frac{kg}{m^3}]$ . Fluyendo a un gasto máscico de  $m_L = 1.3[\frac{kg}{s}]$  y  $m_G = 10[\frac{g}{s}]$ .

Al analizar el gráfico 4.20 se puede observar, que el modelo propuesto basado RNA realiza una mejora en la predicción del gradiente de presión en todos los

puntos de la matriz experimental, con una desviación del orden del 10%, sin embargo, se observa que sobre predice para el caso del crudo pesado, teniendo una desviación del 27%. No obstante la desviación sigue siendo menor que la presentada por el modelo de Lockhart-Martinelli tradicional de un 35%.



4.20 Comparativo resultados experimentales, set#3 glicerina-aire (círculos azules y moños rojos) y dato de crudo en (color negro)

A continuación, se presentan dos gráficos para cada set experimental en el que se muestran los valores (promedio) de los errores de cada modelo.

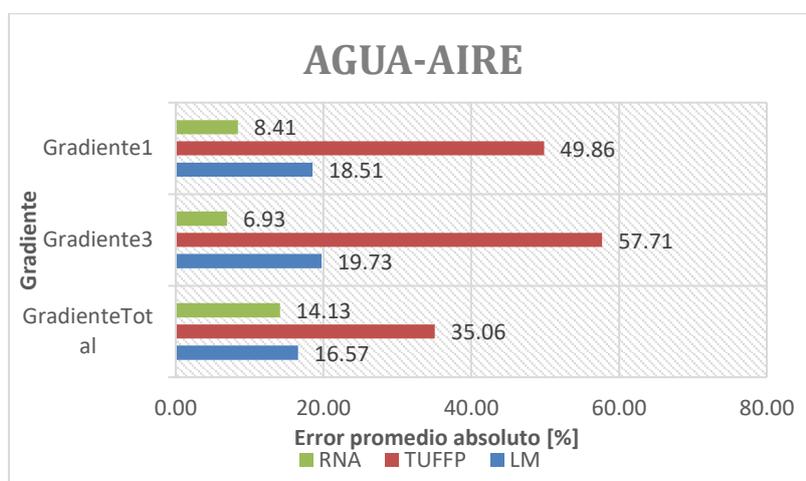
Los criterios utilizados para evaluar el error fueron MAE y RMS; por sus siglas en inglés “*mean absolute error*” (error promedio absoluto),  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|$  y “*root mean*

*Squared error*”  $\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n e_i^2}$ .

Para la prueba realizada con agua-aire, se observa en los gráficos 4.21 y 4.22, que el mayor error tanto RMS y MAE, lo presenta en todos los gradientes el modelo unificado de Tulsa. Esto es posiblemente atribuido al requerimiento de un buen manejo de la extensa cantidad de correlaciones de cierre para el cálculo de características del flujo como: tamaño del slug, frecuencia del slug, colgamiento. De igual forma se requieren datos experimentales que no se tenían disponibles, como la mojabilidad y la tensión superficial.

En cuanto a la RNA propuesta y el modelo de Lockhart-Martinelli se puede decir que obtienen los mejores desempeños. En el caso particular de la RNA se observa

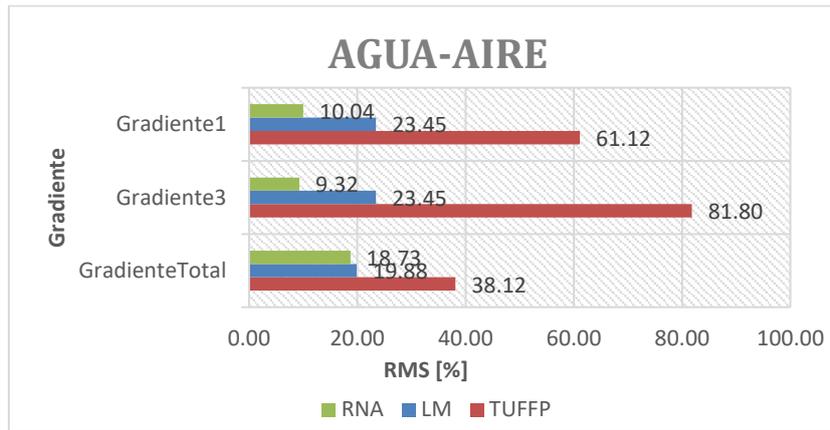
una disminución del error a la mitad para el caso específico del gradiente de presión total con respecto a Lockhart-Martinelli. Sin embargo, esto era de esperarse debido a que Lockhart-Martinelli presenta errores dentro de los rangos de 15%-20% para agua aire, y en cuanto a la RNA es importante decir que tiene una mejor predicción en el gradiente de presión, con MAE < 10% para todas las secciones del sistema experimental, debido a que datos de esta sesión experimental fueron utilizados para la programación de esta RNA.



4.21 Comparativo resultados experimentales, análisis de MAE  
 $\mu_L = 1[cP]$

Como lo muestra el gráfico 4.22 el error RMS mayor en los tres modelos se presenta en la sección de la descarga (gradiente 3), que se puede atribuir a los efectos de presión en la descarga. De igual forma se observa una reducción del error del 50% en el gradiente 1 para el caso de la RNA, respecto a Lockhart-Martinelli tradicional.

En el caso del gradiente total, se observa un desempeño similar (1% de diferencia) entre la RNA y el modelo Lockhart-Martinelli tradicional. Sin embargo, el gradiente total engloba los “efectos” o pérdida “secundaria” del accesorio de tipo “u” localizado entre la sección correspondiente al gradiente 1 y el gradiente 3.



4.22 Comparativo resultados experimentales, análisis de RMS.

$$\mu_L = 1[cP]$$

En el gráfico 4.23 y 4.24, referentes al caso de la prueba experimental glicerina-aire set#1. En la que se obtuvo un incremento en la viscosidad de 470 veces, con respecto a la prueba aire-agua.

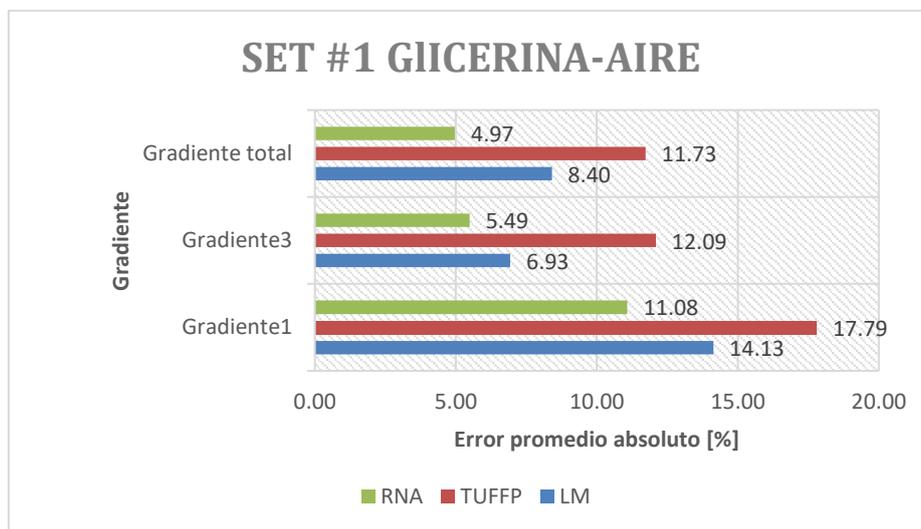
Se observa que Lockhart-Martinelli mantiene un desempeño dentro del orden del 12% de desviación en la predicción del gradiente de presión, e incluso esta desviación es menor que el caso agua-aire, como lo muestran los gráficos 4.21 y 4.22.

Esto se puede deber, ya que a priori el modelo tiende a sobre predecir, y debido a la alta viscosidad presentada en este caso; los movimientos relativos entre las fases se ven atenuados y con ello las variaciones en la señal de presión. Derivando en una curva suavizada semejante al caso monofásico (Véase apéndice C).

Así mismo el modelo unificado sigue manteniendo el peor desempeño en todos los casos, debido principalmente a lo anterior mencionado respecto al manejo de las condiciones de cierre.

Sin embargo, también es importante destacar que tanto el set experimental de agua-aire y el presente set, fueron utilizados como datos para el entrenamiento de la RNA (Apéndice B). Por lo que no serían concluyentes estas sesiones experimentales ya que la mejora obtenida se puede deber a ello. Al comportarse simplemente como una regresión de los datos experimentales, sin embargo, a continuación, se muestran los gráficos que muestran el desempeño del modelo propuesto para el set #2 de glicerina-aire, el cual funciono como set de validación

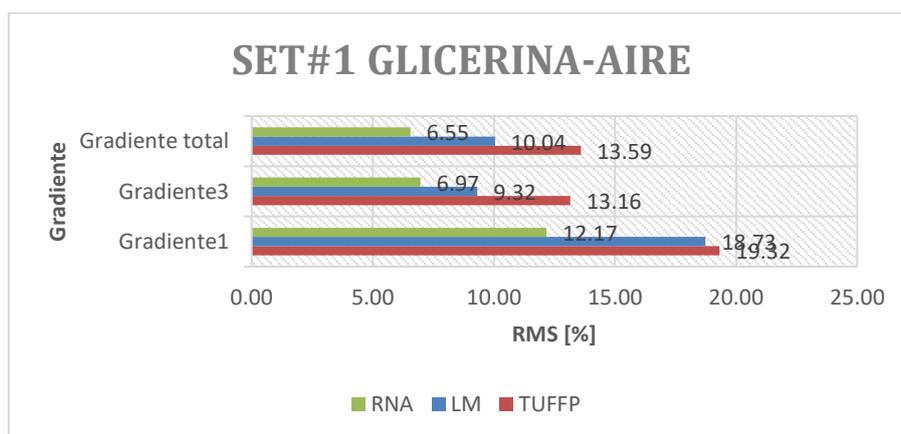
ya que sus datos no fueron incorporados al modelo de la RNA para su entrenamiento.



4.23 Comparativo resultados experimentales, análisis de MAE.

$$\mu_L = 475[cP]$$

En el caso de la RNA, es apreciable que muestra el mejor desempeño en ambos criterios, y es importante mencionar que mejora en un 34.7% el desempeño RMS (gráfica 4.24), con respecto al modelo de Lockhart-Martinelli en el caso del gradiente total.

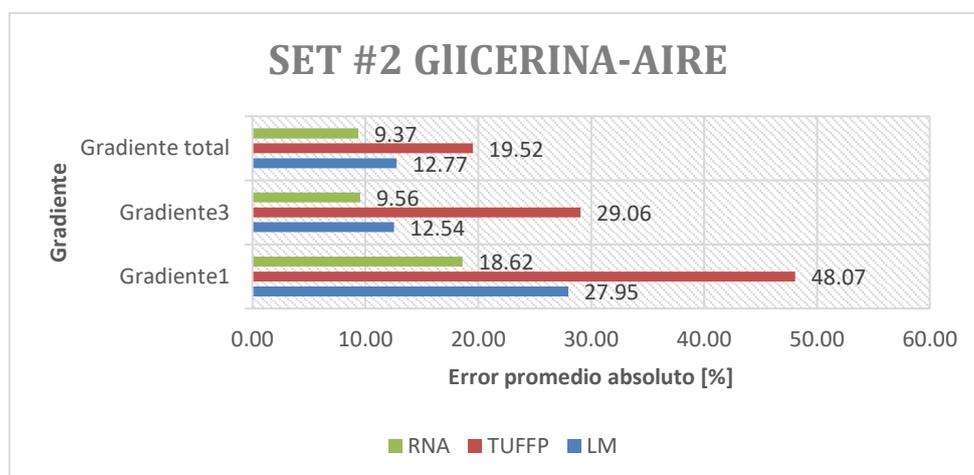


4.24 Comparativo resultados experimentales, análisis de RMS.

$$\mu_L = 475[cP]$$

En el caso del set glicerina-aire#2, se observa claramente que se mantiene la tendencia de la RNA a disminuir el error aumentando la exactitud al igual que la precisión como se puede observar en las gráficas de las pruebas correspondientes al error promedio absoluto en el que se muestra una disminución. Es importante decir que los valores de esta prueba no se utilizaron en la programación de la RNA. Esta prueba sirvió como validación del modelo propuesto, ya que se amplió la matriz experimental al igual que la viscosidad, con la finalidad de evaluar la capacidad de extrapolación de la RNA y validarla. Es importante resaltar que no se llevó a cabo un set de validación con baja viscosidad, (agua-aire).

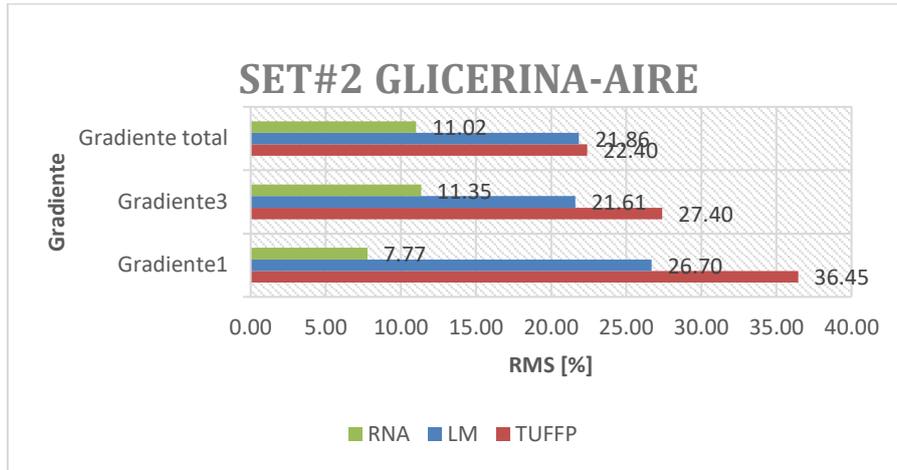
En el gráfico 4.25 se observa una desviación de 9.37% en el gradiente total, para la RNA; lo que representa una mejora del 26% en la predicción del gradiente de presión con respecto al modelo tradicional Lockhart-Martinelli



4.25 Comparativo resultados experimentales, análisis de MAE.

$$\mu_t = 930[cP]$$

En el caso del gráfico 4.26 se puede observar que el TUFFP, tiene el peor desempeño con un RMS para el gradiente total del 22.4%. En cuanto a la RNA se observa una mejora del 48% con respecto al modelo tradicional.



4.26 Comparativo resultados experimentales, análisis de RMS.

$$\mu_L = 930[cP]$$

## 5. Conclusiones.

En este capítulo final, se presentan las conclusiones y las contribuciones del presente trabajo, así como las recomendaciones y trabajo a futuro. Primero se enlistan en forma de puntos clave las contribuciones del trabajo.

### 5.1 Contribuciones.

- Se coadyuvó con el rediseño y puesta en marcha del sistema experimental del laboratorio de flujos multifásicos del instituto de ingeniería.
- Se llevó acabo la instrumentación de del laboratorio de flujos multifásicos del instituto de ingeniería.
- Se desarrolló y aplicó una metodología experimental en el laboratorio de flujos multifásicos del instituto de ingeniería. Con fluidos modelo (Glicerina-Aire), que emularan el comportamiento del petróleo pesado y gas fluyendo en tuberías de producción.
- Se coadyuvó con la elaboración de documentación de procedimientos experimentales y bitácoras para el laboratorio de flujos multifásicos del Instituto de Ingeniería, que se están utilizando para llevar acabo la certificación del laboratorio bajo la norma ISO-9001-2015 ante la Entidad Mexicana de Acreditación.
- Se programó y desarrolló software que permite la automatización en el análisis de resultados experimentales obtenidos en las instalaciones del laboratorio de flujos multifásicos del instituto de ingeniería.
- Se obtuvieron resultados experimentales de gran calidad que se dispondrán ante distintos análisis para su posterior publicación en revistas científicas.
- Se realizó una comparación entre correlaciones.
- Se obtuvo una red neuronal artificial basada en el modelo de Lockhart-Martinelli, con la capacidad de mejorar la predicción en la caída de presión en flujos bifásicos con alta viscosidad.
- Se realizó un análisis de incertidumbre a los datos experimentales y un cálculo de propagación del error en la correlación de Lockhart-Martinelli y la RNA (Apéndice D).
- Se realizó un primer cálculo utilizando crudo, aplicando tanto el modelo propuesto RNA como el modelo Lockhart-Martinelli tradicional.

Este trabajo se enfocó en el análisis de las pérdidas de presión por fricción que se presentan en ductos horizontales, que transporta un flujo bifásico (líquido - gas). Se propuso la adaptación en la ecuación “teórica” obtenida por Chisholm (1967) del modelo Lockhart-Martinelli (1949), por medio de la utilización de una red neuronal artificial. Con el objetivo de ampliar el dominio de aplicabilidad generando un modelo “adaptativo” a las condiciones de transporte de petróleo pesado. Por ende, se llevó a cabo el rediseño de la instalación del laboratorio de flujos multifásicos del instituto de ingeniería, así como su instrumentación y control. Con la finalidad de obtener una base de datos experimentales con la precisión adecuada, que fuesen utilizados en la programación de la red neuronal artificial al igual que su validación y comparación con el modelo unificado TUFFP y el modelo de Lockhart-Martinelli utilizando la ecuación de Chisholm (1967).

Para el trabajo experimental se realizaron tres sets experimentales, primero con agua-aire; y luego con glicerina-aire 475[cP], los cuales sirvieron como datos de entrenamiento del modelo propuesto basado en RNA; posteriormente se realizó una prueba glicerina-aire 930[cP], con el propósito de establecer y validar el desempeño del modelo propuesto. Finalmente se “extrapoló” el modelo para estimar el gradiente con crudo pesado con una viscosidad de 7500 [cP].

Partiendo de lo mencionado en el párrafo anterior se consideró adecuado dividir las conclusiones y observaciones finales en tres grupos. Estos tres grupos son los siguientes: parte experimental, desempeño de los modelos de Lockhart-Martinelli y modelo unificado TUFFP y finalmente, todo lo concerniente a la aplicación de la RNA.

## **5.2 Conclusiones.**

- a) De la revisión de experimentos reportados en la literatura, se aprecia que la distancia entre sensores de presión para la determinación en el gradiente de presión es arbitraria. Para flujos bifásicos donde el patrón de flujo es intermitente, se presenta una evolución espacial y temporal continuamente, por lo que tener un flujo “totalmente desarrollado”, como es en el caso monofásico no está bien definido, sin embargo con los resultados obtenidos en el presente trabajo, se concluye que existe una dependencia en el valor del gradiente de presión y la localización de

los elementos de medición, por lo tanto es importante reportar la ubicación donde se realiza la medición del gradiente de presión en el sistema experimental.

Así mismo se observó un comportamiento distinto en cuanto a las señales de presión típicamente reportadas para flujos con patrones intermitentes Nydal (1992) con sustancias de baja viscosidad y las señales obtenidas en los casos de glicerina aire. Denotando así la importancia de los efectos difusivos de cantidad de movimiento (viscosidad) en la evolución espacial de los flujos bifásicos.

- b) Para el caso específico del análisis y comparación de los modelos unificado TUFFP y el modelo de Lockhart-Martinelli (1949), que se desarrolló a lo largo del presente trabajo, se encontró que la correlación de Lockhart-Martinelli, a través de la ecuación analítica que describe el modelo propuesto por Chisholm (1967), muestra una adecuada aproximación en la predicción de la caída de presión, dentro de lo que se considera “aceptable” ( desviación < 12% ) en el diseño ingenieril . A su vez siendo sencilla y que describa el fenómeno físico de forma adecuada para este propósito. Sin embargo, es importante señalar las limitaciones que ofrece el modelo en cuanto al escalamiento de aplicabilidad en diámetros comúnmente utilizados en la industria (6 – 24 [in]) y por ende sería imperativo evaluarlo, no solo bajo condiciones que emulan las propiedades físicas del crudo pesado, mediante fluidos modelo (glicerina-aire), sino bajo condiciones de carácter dimensional cercanas a las habitualmente utilizadas en la industria petrolera.

Se concluye que la simplicidad y versatilidad del modelo de Lockhart-Martinelli lo coloca en una ventaja significativa en cuanto la aplicabilidad con respecto a otros modelos más complejos, como el modelo unificado TUFFP, que requiere de un mayor número de condiciones de cerradura para incrementa su exactitud, sin mencionar la sensibilidad y dependencia que presentan este tipo de modelos al buen manejo y aplicación de cada una de las condiciones necesarias para su buen desempeño. De igual forma es importante mencionar que el modelo TUFFP tiene la gran ventaja de calcular y entregar al usuario, una mayor cantidad de variables

propias del flujo bifásico, como lo son: mapa de patrón de flujo, frecuencia del bache (slug), longitud del bache, velocidad de deslizamiento, colgamiento del líquido y velocidad de transición.

No obstante, esta ventaja implica tener sistemas de medición o metodologías experimentales adicionales, con las que se compruebe el desempeño del modelo para cada variable adicional.

Otra ventaja importante que hay que mencionar que tiene este modelo, es su capacidad de acoplar modelos que involucran temperatura, al igual que no se restringe a conductos horizontales.

c)

En cuanto a la RNA se concluye que efectivamente por medio de esta herramienta y partiendo del “teorema fundamental de la aproximación” Hornik (1991) y Cybenko (1989), se puede obtener el multiplicador de fase adecuado para mejorar la predicción en la obtención del gradiente de presión en flujos bifásicos horizontales. Obteniendo una mejora significativa, con respecto al modelo Lockhart-Martinelli tradicional y ampliando el rango de aplicabilidad del modelo tradicional.

Es importante aseverar que la correlación es más sencilla debido a que la RNA generó un modelo de aproximación para el multiplicador de fase, como función de los números de Reynolds y el parámetro de Martinelli, por lo que de forma implícita se encuentran involucrados los regímenes de flujo de cada fase y no es necesario cambiar el valor de la constante, como en el modelo propuesto por Chisholm (1967) en el que se debe analizar previamente que régimen de flujo presenta cada fase y de esta forma se modifica de manera exógena la constante de Chisholm.

De igual forma es importante mencionar que la RNA ofrece una ventaja sobre los métodos basados en simulación de dinámica de fluidos, en cuanto al tiempo de cálculo y recursos computacionales, que se pueden ligar directamente a las necesidades tanto económicas como en tiempo de ejecución para la industria petrolera.

Como desventaja acerca de la RNA se puede concluir el hecho inequívoco de la dependencia existente entre el desempeño del método, la calidad

y extensión en cantidad de datos requeridos para su programación y entrenamiento. Es decir, presenta una dependencia de aplicabilidad en cuanto a los datos proporcionados, sin embargo, dicha desventaja podría solucionarse realizando los cálculos directamente en campo o instalaciones con la infraestructura y seguridad requerida para manejar hidrocarburos.

### **5.3 Recomendaciones y trabajo a futuro.**

A continuación, se presentan en forma de puntos clave, actividades a realizar con el objetivo de mejorar el modelo propuesto y continuar con la investigación que se presenta en este trabajo.

- Tener mediciones de viscosidad en línea para evitar errores debido al cambio de esta propiedad física a causa de la temperatura y humedad.
- Validar la RNA con crudo pesado en instalaciones del CICERM.
- Ampliar la cantidad de datos para generar la RNA
- Extender experimentos a diámetros mayores a tres pulgadas.
- Extender la RNA a casos con agente reductor de viscosidad.
- Estudiar a detalle y reunirse con los Autores del software modelo unificado, el Dr. Carlos F. Torres y el Dr. Eduardo Pereyra de la universidad de Tulsa. Con la finalidad de tener certeza en el manejo de su amplia cantidad de condiciones de cierre.
- Añadir un modelo de viscosidad en función de la temperatura.
- Generar datos con ductos que presenten orientaciones distintas a cero grados, con la finalidad de generalizar el modelo a ductos dentro del rango  $[0^\circ, 90^\circ]$ .

## 6. Referencias

- Attia, M & Abdulraheem, A & Mahmoud, Mohamed. (2015). Pressure Drop Due to Multiphase Flow Using Four Artificial Intelligence Methods. 10.2118/175724-MS.
- Awad, Maysaa & S. Muzychka, Y. (2010). Two-Phase Flow Modeling in Micro-channels and Minichannels. *Heat Transfer Engineering*. 31. 1023-1033.
- Baymani, M & Effati, Sohrab & Niazmand, Hamid & Kerayechian, A. (2014). Artificial neural network method for solving the Navier–Stokes equations. *Neural Computing and Applications*. 26. 765-773. 10.1007/s00521-014-1762-2.
- Bertola, V. (2004). *Modelling and experimentation in two-phase flow*. Wien: Springer.
- Brennen, C. (2009). *Fundamentals of multiphase flow*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Beggs, H. D.; Brill, J. P. (May 1973). "A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes" Paid subscription required. *Journal of Petroleum Technology*. AIME. 255 (SPE-4007-PA)
- Colebrook, C. F. (1938–1939). "Turbulent Flow in Pipes, With Particular Reference to the Transition Region Between the Smooth and Rough Pipe Laws" Paid subscription required. *Journal of the Institution of Civil Engineers*. London, England. 11: 133–156.
- Chisholm, D. (1967). A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow. *International Journal of Heat And Mass Transfer*, 10(12), 1767-1778. doi: 10.1016/0017-9310(67)90047-6
- Cybenko, George. (1989). Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Math Cont Sig Syst (MCSS)* 2:303-314. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*. 2. 303-314. 10.1007/BF02551274.
- Cravino, Annabella & Duban Pérez, Al & García, Francisco. (2007). *EVALUACIÓN DE MODELOS HOMOGÉNEOS, DE CORRELACIÓN Y MECANICISTAS EN LA PREDICCIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DE FLUJO BIFÁSICO DE GAS Y DE*

*LÍQUIDO EN TUBERÍAS VERTICALES*. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. 24.

Ronald Darby; Ron Darby; Raj P. Chhabra (Author). Chemical Engineering Fluid Mechanics, Revised and Expanded by Ronald Darby (2001-01-11)

Drew, D., & Passman, S. (2005). Theory of multicomponent fluids. New York: Springer.

Dukler, A., Wicks, M., & Cleveland, R. (1964). Frictional pressure drop in two-phase flow: A. A comparison of existing correlations for pressure loss and holdup. *Aiche Journal*, 10(1), 38-43. doi: 10.1002/aic.690100117

Domsch, Sebastian & Mürle, Bettina & Weingärtner, Sebastian & Zapp, Jascha & Wenz, Frederik & Schad, Lothar. (2017). Oxygen extraction fraction mapping at 3 Tesla using an artificial neural network: A feasibility study. *Magnetic resonance in medicine*. 79. 10.1002/mrm.26749.

Filip, A. (2013). Determination of Pressure Drop in Horizontal Pipes for Air – Water Two Phase Flow. *Mathematical Modelling In Civil Engineering*, 9(2), 1-8. doi: 10.2478/mmce-2013-0005

Farooqi, S.I. & Richardson, J.F.. (1982). *HORIZONTAL FLOW OF AIR AND LIQUID (NEWTONIAN AND NON-NEWTONIAN) IN A SMOOTH PIPE: PART II. AVERAGE PRESSURE DROP*. Transactions of the Institution of Chemical Engineers. 60. 323-333.

Hemeida, A., & Sumait, F. (1988). Petroleum Engineering Department, College of Engineering, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia. *J. Eng. Sci., King Saud Univ.*, 14(2), 1408/1988. doi: 10.1023/a:1009901115843

Hornik, Kurt. (1991). Hornik, K.: Approximation Capabilities of Multilayer Feedforward Network. *Neural Networks*, 251-257. *Neural Networks*. 4. 10.1016/0893-6080(91)90009-T.

Kim, T. (2015). *Horizontal Slug Flow Characteristics by Changing Pipe Diameter* (Doctorado). Seoul National University.

Liu, L. (2014). The phenomenon of negative frictional pressure drop in vertical two-phase flow. *International Journal Of Heat And Fluid Flow*, 45, 72-80. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.12.003

Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C. (1949) Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes. *Chemical Engineering Progress*, 45, 38-48.

Lu, C., Kong, R., Qiao, S., Larimer, J., Kim, S., & Bajorek, S. et al. (2018). Frictional pressure drop analysis for horizontal and vertical air-water two-phase flows in different pipe sizes. *Nuclear Engineering And Design*, 332, 147-161. doi: 10.1016/j.nucengdes.2018.03.036

Saporo, Agus. (2015). Reviews on drag reducing polymers. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 32. 1455-1476. 10.1007/s11814-015-0104-0.

S. Muzychka, Y & Awad, Maysaa. (2010). Asymptotic Generalizations of the Lockhart–Martinelli Method for Two Phase Flows. *Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme - J FLUID ENG*. 132. 10.1115/1.4001157. 10.1080/01457631003639059.

Swamee, D.K. and Jain, A.K. (1976) Explicit Equations for Pipe Flow Problems. *Journal of the Hydraulics Division*, 102, 657-664.

EJ SUÁREZ DOMÍNGUEZ .V GONZÁLEZ DÁVILA .Study of Sustainable Viscosity Reduction for Extra-Heavy Crude Oil: BRV Revista ENERLAC, 2012

Matsubara, H., & Naito, K. (2011). Effect of liquid viscosity on flow patterns of gas–liquid two-phase flow in a horizontal pipe. *International Journal Of Multiphase Flow*, 37(10), 1277-1281. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.08.001

Mekisso, H. (2013). Comparison of frictional pressure drop correlations for isothermal two-phase horizontal flow.

Müller-Steinhagen, H., & Heck, K. (1986). A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes. *Chemical Engineering And Processing: Process Intensification*, 20(6), 297-308. doi: 10.1016/0255-2701(86)80008-3

Mohammad Ali Ahmadi, Reza Soleimani, Moonyong Lee, Tomoaki Kashiwao, Alireza Bahadori. Determination of oil well production performance using artificial neural network (ANN) linked to the particle swarm optimization (PSO) tool, *Petroleum*, Volume 1, Issue 2, 2015, Pages 118-132, ISSN 2405-6561, <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2015.06.004>.

Nirjhar Bar, Manindra Nath Biswas, and Sudip Kumar Das. Prediction of Pressure Drop Using Artificial Neural Network for Gas Non-Newtonian Liquid Flow through Piping Components

*Industrial & Engineering Chemistry Research* 2010 49 (19), 9423-9429

DOI: 10.1021/ie1007739

Poesio, P., Strazza, D., & Sotgia, G. (2009). Very-viscous-oil/water/air flow through horizontal pipes: Pressure drop measurement and prediction. *Chemical Engineering Science*, 64(6), 1136-1142. doi: 10.1016/j.ces.2008.10.061

Rizaldy, Rizaldy & Zarrouk, Sadiq. (2016). *PRESSURE DROP IN LARGE DIAMETER GEOTHERMAL TWO-PHASE PIPELINES*. Conference: Proceedings the 38th New Zealand Geothermal Workshop.

Shoham, Ovadia. (2006). Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes.

Shen, X., Hibiki, T., & Nakamura, H. (2015). Bubbly-to-cap bubbly flow transition in a long-26m vertical large diameter pipe at low liquid flow rate. *International Journal Of Heat And Fluid Flow*, 52, 140-155. doi: 10.1016/j.ijheatfluid-flow.2015.01.001

Sardeshpande, Madhavi & Ranade, Vivek. (2013). Two-phase flow boiling in small channels: A brief review. *Sadhana*. 38. 10.1007/s12046-013-0192-7.

Spedding, P., Benard, E., & Donnelly, G. (2006). Prediction of pressure drop in multiphase horizontal pipe flow. *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 33(9), 1053-1062. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.05.004

Singh GG, Griffith PP. Determination of the Pressure Drop Optimum Pipe Size for a Two-Phase Slug Flow in an Inclined Pipe. ASME. J. Eng. Ind. 1970;92(4):717-726. doi:10.1115/1.3427837.

Taitel, Y. and Dukler, A. E. (1976), A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. AIChE J., 22: 47-55. doi:10.1002/aic.690220105

TV Santosh, Gopika Vinod, RK Saraf, AK Ghosh, HS Kushwaha Publication date 2007/10/1 Journal Reliability Engineering & System Safety Volume 92 Issue 10 Pages 1468-1472 .Elsevier

Ullmann, A., Goldstein, A., Zamir, M., & Brauner, N. (2004). Closure relations for the shear stresses in two-fluid models for laminar stratified flow. International Journal Of Multiphase Flow, 30(7-8), 877-900. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2004.03.008

Xu, Y., Fang, X., Su, X., Zhou, Z., & Chen, W. (2012). Evaluation of frictional pressure drop correlations for two-phase flow in pipes. *Nuclear Engineering And Design*, 253, 86-97. doi: 10.1016/j.nucengdes.2012.08.007

## 7. Apéndices.

### A. Leyes de conservación.

#### i. Conservación de masa.

La ley de conservación de masa para una fase  $k$  perteneciente un cuerpo  $\mathcal{C}$  en una referencia definida en el espacio y delimitado por un volumen  $\Omega$  y que posee una densidad  $\rho(r, t)$ , se postula de la siguiente manera.

Siendo  $\rho_{\underline{k}} = \alpha_k \rho_k$ .

$$\frac{D}{Dt} \int \rho_{\underline{k}} d\Omega - \int \Gamma_k d\Omega = 0 \quad (27)$$

En donde  $\Gamma$  representa la de tasa de generación de una fase debido a un cambio de fase.

Mediante el teorema de transporte de Reynolds se reescribe la ecuación (1) de la siguiente forma.

$$\int \frac{\partial \rho_{\underline{k}}}{\partial t} d\Omega + \oint \rho_{\underline{k}} U_k \mathbf{n} \cdot ds - \int \Gamma_k d\Omega = 0 \quad (28)$$

En la que se observa que la masa de cada fase  $k$  dentro de  $\Omega$ , puede cambiar debido a dos efectos diferentes. Primero la masa puede entrar o salir de  $\Omega$  a través las fronteras  $\partial\Omega$  debido al "flux" (masa por unidad de área, por unidad de tiempo) de cada fase a través de un elemento de la superficie con vector normal unitario  $\mathbf{n}$  y debido a cambios por reacciones químicas o cambios de fase.

#### ii. Conservación de cantidad de movimiento lineal.

El balance de momento del componente o fase  $k$  del cuerpo  $\mathcal{C}$  está definido de la siguiente forma.

$$\frac{D}{Dt} \int \rho_{\underline{k}} U_k d\Omega = F_k^c + F_k^s \quad (29)$$

En donde  $F_k^c$  son las fuentes de momento debido a fuerzas cuerpo y  $F_k^s$  la fuente de momento debido a fuerzas de superficie.

$$F_k^c = \int (\rho_k \mathbf{b} + \mathbf{A}_k + \mathbf{\Gamma}_k U_{ki}) d\Omega \quad (30)$$

Desglosando el término debido a las fuerzas de cuerpo, se observan tres términos. El primer término  $\mathbf{b}$  definido por unidad de masa y que se atribuye a las fuerzas externas de cuerpo que lo afectan. El término  $\mathbf{A}$  es la fuerza sobre la fase  $k$  dentro del cuerpo  $\mathcal{C}$  que es debida a la interacción con otras fases presentes. Por último, el término  $\mathbf{\Gamma}_k u_{ki}$  es la fuente de momento lineal asociada a la masa debido a reacciones químicas o cambios de fase.

En cuanto al término  $F_k^s$ , se escribe en términos del vector de esfuerzos  $\sigma_k$  de cada fase o elemento presente en el cuerpo  $\mathcal{C}$ . Siendo de forma análoga a la densidad  $\rho_k$  el vector de esfuerzos  $\alpha_k \sigma_k = \sigma_k$ . De igual forma el vector de esfuerzos es dependiente de la orientación de la superficie  $ds$  que puede denotarse como  $\sigma_k(r, t : \mathbf{n})$ , y por medio del cual se puede definir la existencia del tensor de esfuerzos de cada fase  $\sigma_k = \mathbf{n} \cdot \mathbf{T}_k$ .

$$F_k^s = \oint \sigma_k ds \quad (31)$$

Finalmente se toman la ecuación (4) y (5), para sustituir en (3).

$$\int \frac{\partial \rho_k}{\partial t} U_k d\Omega = \int (\rho_k \mathbf{b} + \mathbf{A}_k + \mathbf{\Gamma}_k U_{ki}) d\Omega + \oint \sigma_k ds \quad (32)$$

### iii. Conservación de energía.

La energía del componente  $k$  dentro del cuerpo  $\mathcal{C}$  dentro de  $\Omega$  se define de la siguiente forma.

$$\frac{D}{Dt} \int \rho_k u_k + \frac{1}{2} U_k^2 d\Omega = W_k^c + W_k^s \quad (33)$$

En donde  $u_k$  se representa la energía interna específica como y el término  $\frac{1}{2}U_k^2$  representa la energía cinética. De igual forma aparecen las fuentes de energía de cuerpo y de superficie respectivamente. El desarrollo y descripción respectiva a los términos debido a fuentes de energía de cuerpos y superficie se encuentra en la sección de apéndices, al igual que las ecuaciones de conservación promediadas, ya que como se observa en esta sección el estudio temporal-espacial de cada fase o componente es muy complicado para fines prácticos y a cada punto en el espacio  $r$  y para cada tiempo  $t$ , existen aglomeraciones de cada fase en todo  $C$  que forma un cuerpo compuesto. Por lo tanto, resulta de gran utilidad para el ámbito de diseño ingenieril que se considere un cuerpo que sea representado por el promediado de sus propiedades. No obstante, se mantiene la gran complejidad existente en flujos multifásicos, en si quiere demostrar la existencia de una solución continua y suave a las ecuaciones de Navier-Stokes.

## **B. RNA Complementos.**

### **i. Diagrama de flujo RNA.**

#### **1. Arquitectura**

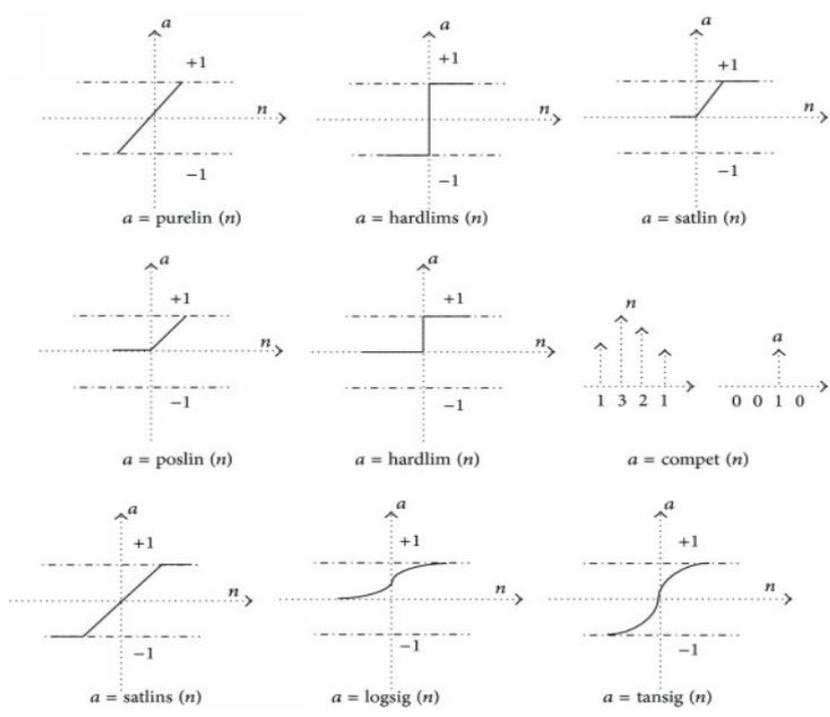
Como se menciona en el capítulo 2.5 del presente texto, se eligió una arquitectura del tipo PMC que se encuentra en la familia de RNA unidireccionales. A partir de los trabajos de Hornik (1989) y Cybenko(1989) que establecen esta arquitectura como la definición matemática de un “aproximador universal” en la que por medio de una capa de salida y una sola capa oculta es posible aproximar cualquier función hasta un grado de aproximación dado.

Es decir, el teorema del aproximador universal establece que al tener una capa de salida con una función de activación lineal para la salida que a su vez se encuentra conectada con al menos una capa oculta con “n”

neuronas y una función de activación apropiada, se podrá aproximar cualquier función hasta cualquier grado de precisión establecido.

2. Función de activación y número de neuronas en capa oculta.

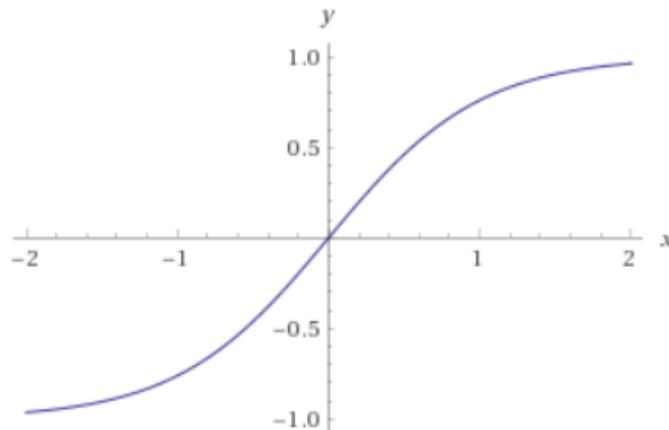
Existen distintos tipos de función de activación a continuación se muestran la utilizadas comúnmente.



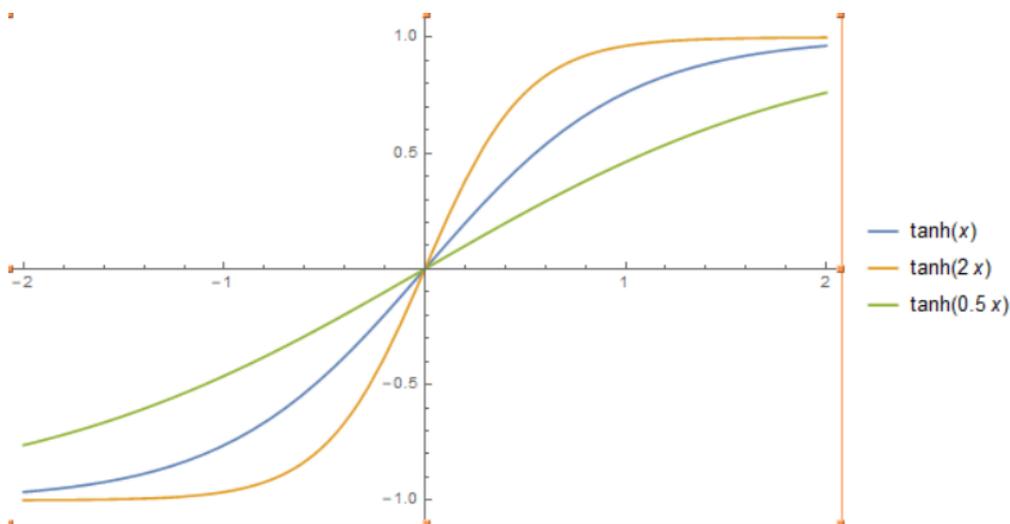
Como su nombre lo dice la función de activación  $f a = \tanh[In * W + b]$  “activa” las neuronas mediante las entradas  $In$  ya ponderadas ya  $(In * W) + b$  mediante los “pesos” y el término bias. Sin la función de activación la RNA se reduciría un conjunto de funciones lineales por lo que la RNA no podría “aprender” comportamientos no lineales. Este sería el primer criterio en general una función no lineal, diferenciable y continua.

Históricamente las funciones del tipo sigmoidea se aproximan al comportamiento biológico de las neuronas y a su vez cumple con los criterios descritos anteriormente, con una ventaja que la convierte en la elección ideal para el caso de aproximación de funciones y es la sensibilidad que tiene a pequeños cambios

en el intervalo de  $[-2,2]$ , como se observa en la gráfica. Esto para el caso particular de  $fa = \tanh[In * W + b]$ , que es la función utilizada en el presenta trabajo.



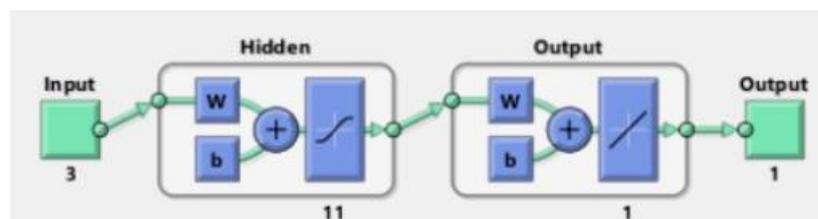
De igual forma es importante notar cual es el efecto que tienen los “pesos” o ponderadores sobre el comportamiento de la función de activación y básicamente los pesos actúan como si fueran la “sinapsis” es decir nos dicen la “intensidad” que tiene cada entrada, modificando así la función en el eje de las ordenadas y a su vez el término bias nos permite ajustas la función de activación en el eje de las abscisas, como se muestra a continuación.



Finalmente no existe una regla o teorema que indique cuantas neuronas en la capa oculta deben utilizarse de acuerdo al tipo de función o datos, sin embargo a mayor cantidad de neuronas en teoría la complejidad de la función que se puede aproximar es mayor, sin embargo como inicialmente no se conoce el comportamiento que tendrá dicha función al incrementar el número de neuronas se

puede caer en una saturación o sobre estimación en la aproximación, por ello en general el proceso de selección de neuronas se realiza a prueba y error.

En cuanto al presente trabajo se consideraron las prestaciones de la computadora y se consiguió el mejor desempeño con 11 neuronas en la capa oculta, quedando finalmente la arquitectura de la RNA propuesta como se muestra en el siguiente diagrama.



ii. Pre-proceso y obtención de valores de entrada RNA.

Como se mencionó los datos experimentales utilizados para la creación de la RNA fueron únicamente dos de los tres sets experimentales, se tomó el set de datos con pruebas de agua-aire y el set número uno de glicerina, buscando tener un dominio de Reynolds y parámetros de Martinelli para cada fase mayor y con ello obtener una relación que describa el comportamiento de forma más general.

1. Obtención de datos: partió del objetivo de tener un único valor del multiplicador bifásico para cada valor otorgado de números de Reynolds superficiales y el parámetro de Martinelli  $\varphi(Re_{sL}, Re_{sG}, \chi)$ , por ello a partir de los datos experimentales obtenidos para cada gradiente de presión, por lo que se realizó el procedimiento "inverso" al mostrado en el diagrama de la sección 4.3.1 del presente trabajo y a partir del gradiente de presión medido experimentalmente  $\frac{dP}{dL_f}$  y el calculado para la fase líquida  $\frac{dP}{dx_L}$  se despejó y se obtuvo el valor del multiplicado bifásico.

$$\sqrt{\frac{\frac{dP}{dx_L}}{\frac{dP}{dL_f}}} = \varphi$$

Y a partir de ello se generaron los datos que servirían como “entradas” ( $Re_{sL}, Re_{sG}, \chi$ ) y las “salida” de la RNA  $\varphi$  que se muestran en siguiente tabla.

Glicerina#1																		
XLM GLIC	48.2821213	49.8365678	50.2588704	26.1603528	26.0648448	26.0428126	92.0494557	93.7556185	93.856169	55.0341154	54.696494	54.6329282	145.920913	143.563808	146.66585	80.699641	79.8061284	80.251966
Phi	48.8878249	49.3969745	48.7278347	28.2022467	28.381428	28.2661298	95.3032449	96.731743	96.5077067	58.6879948	57.9484977	57.5915609	146.809965	143.395289	145.671898	81.7945649	80.4872652	80.5167629
Re_L	49.0601133	51.7337434	53.798234	50.8887601	49.8364603	50.3830114	135.243329	135.440169	135.601133	135.208539	136.052743	135.866493	220.62718	220.644392	220.761724	220.338709	220.529792	220.545476
Re_G	5048.44416	5028.0121	5087.29609	10763.1696	10666.6267	10767.5347	5638.09348	5513.34589	5498.55221	10408.7085	10492.9775	10458.6051	5115.6497	5181.93509	5033.34295	10198.5306	10290.9747	10184.2114
Agua																		
XLM	3.98415703	3.97070282	1.63796934	1.65671908	1.07604717	1.11078769	13.5866688	13.2631998	5.01111147	5.01833315	3.58981806	3.60965666	23.2301454	22.9343651	8.77544782	8.86349406	6.50973698	6.50791323
Phi	9.31234767	9.32539316	5.50160113	5.70115533	4.22687361	4.32829611	22.709958	22.0932253	12.3513806	12.3509843	10.2134646	10.2201147	33.8642956	33.5782615	17.6904232	17.8882804	14.7964032	14.8221767
Re_L	17165.6013	17176.0271	17109.5284	17140.5806	17099.4147	17108.293	51768.7338	51681.3741	51644.3575	51616.2213	51504.7791	51486.1245	86135.1988	86038.1903	85993.3565	85859.3162	85957.371	85643.9569
Re_Gas	6701.53688	6731.95809	18644.3293	18480.3563	30020.006	28982.9589	5465.63607	5606.56736	18328.3865	18278.2581	27533.9737	27290.4068	5437.31096	5516.43263	18293.1478	18057.734	26770.9824	26660.1079

2. Con la función mapminmax en Matlab se normalizaron los datos experimentales y se distribuyeron de manera aleatoria.
3. Finalmente se determinó el porcentaje de datos destinados para entrenamiento, validación y prueba (75%,20% y 5% respectivamente), siendo el mayor porcentaje destinado a entrenamiento ya que se cuenta con el set número dos de glicerina destinado únicamente a validación y prueba de la RNA.

### iii. Entrenamiento RNA.

En cuanto al entrenamiento se refiere o “aprendizaje” no es más que la evaluación entre los valores calculados por la RNA y “objetivo”, para ello se emplea una función de desempeño que este caso se trata del error cuadrático medio donde  $t_i$  es el vector de valores “objetivo” y  $a_i$  es el vector de valores calculados.

$$mse = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - a_i)^2$$

Y básicamente se utiliza un algoritmo de optimización sobre la función de desempeño, sin embargo cualquier método de optimización utiliza el cálculo del gradiente y el Jacobiano para llevar esto a cabo, en el presente trabajo se utilizó el algoritmo conocido como retro propagación “BackPropagation” P.J.Werbos (1974)<sup>4</sup>.

En el que básicamente:

- Calcula la salida de la red a partir de uno conjunto de valores de entrenamiento.
- Compara con la salida correcta y calcula el error “mse”
- Calcula las derivadas parciales del error con respecto a los  $W^2$  pesos que unen la última capa oculta con la de salida
- Calcula las derivadas parciales del error con respecto a los pesos  $W^1$  que unen la última capa de entrada con la oculta
- Ajustan los pesos de cada neurona para optimizar el error (buscar mínimo global)
- Iterar hasta alcanzar el desempeño deseado.

### iv. Parámetros de desempeño de la RNA.

Existen parámetros con los cuales se realiza la evaluación del desempeño de una RNA como lo son: grafica de desempeño de la RNA, graficas de correlación entre salida de la RNA y datos “objetivo” y finalmente el histograma de distribución de la diferencia entre valores “objetivo” y salidas obtenidas con RNA. Una ventaja que ofrece el software Matlab es que con una serie de comandos puedes extraer los gráficos más representativos para evaluar el desempeño y entrenamiento de una RNA.

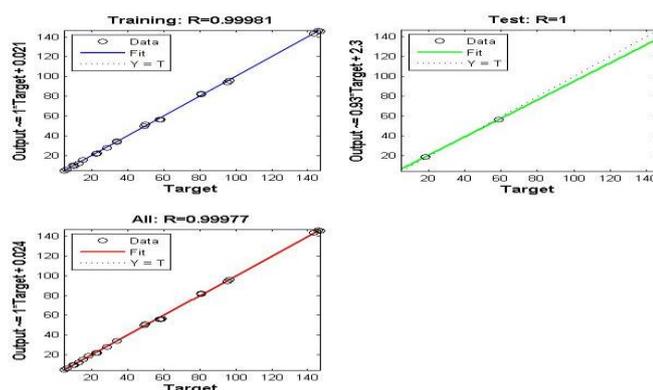
---

<sup>4</sup> P. Werbos, “Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences,” Ph.D. Thesis, Harvard University, Cambridge, 1974.

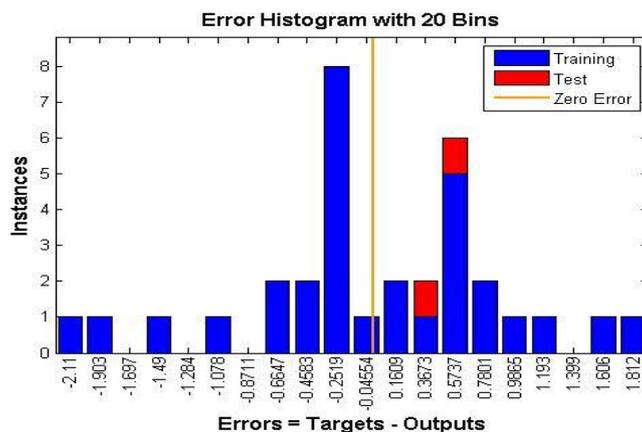
Uno de estos gráficos es el que sirve para realizar una valoración de la relación que presentan las salidas calculadas por la RNA una vez ha sido entrenada y los datos “objetivo” a los que se pretende aspirar.

Se exportan tres gráficos (datos de prueba, datos de entrenamiento y el total de datos experimentales) en los cuales se añade en la parte inferior el coeficiente de correlación en el cual es la correlación de excelencia.

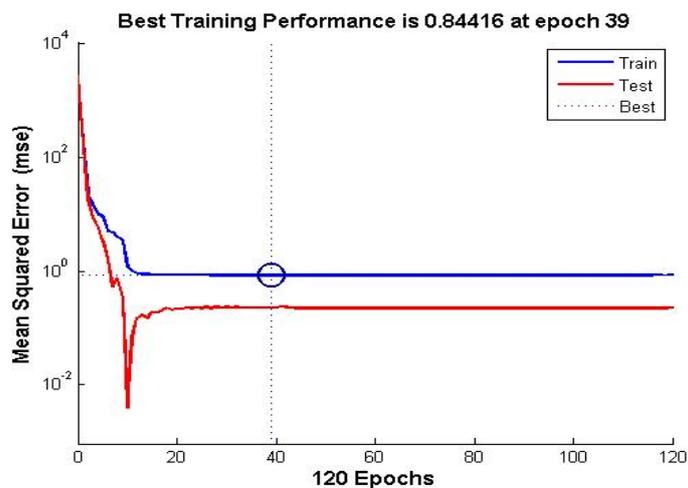
En el caso particular de la RNA diseñada, entrenada e implementada en el presente trabajo observamos que los coeficientes de correlación en el caso de los datos de prueba es de , lo cual nos indicaría que los datos proporcionados para el entrenamiento de la RNA existe casi una dependencia total entre las salidas de la RNA y los valores “objetivo” , en este caso observamos una dependencia perfecta para el caso de los datos de “prueba” sin embargo es importante mencionar que se le otorgaron solo dos datos para realizar este procesos a la RNA por ende la correlación tiene una dependencia perfecta, sin embargo se le otorgaron muy pocos datos ya que la “prueba” y validación de la red se realizó con un set de datos completamente destinado a este objetivo, es decir no se utilizaron los mismos datos experimentales para el entrenamiento que para validación y prueba.



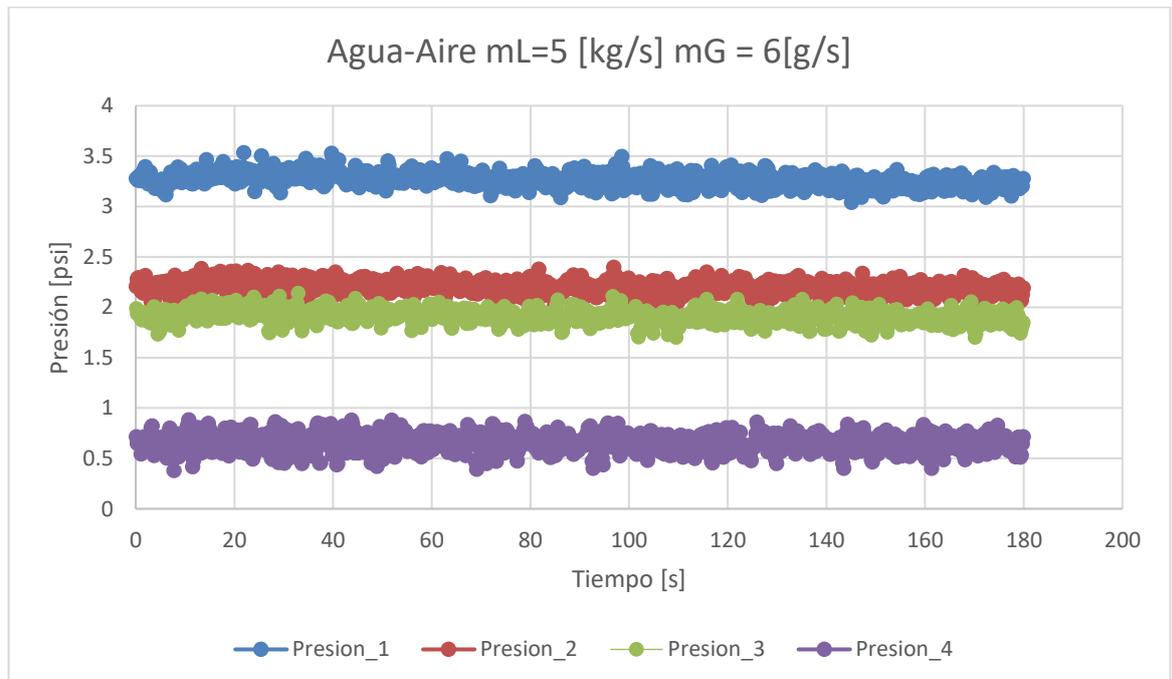
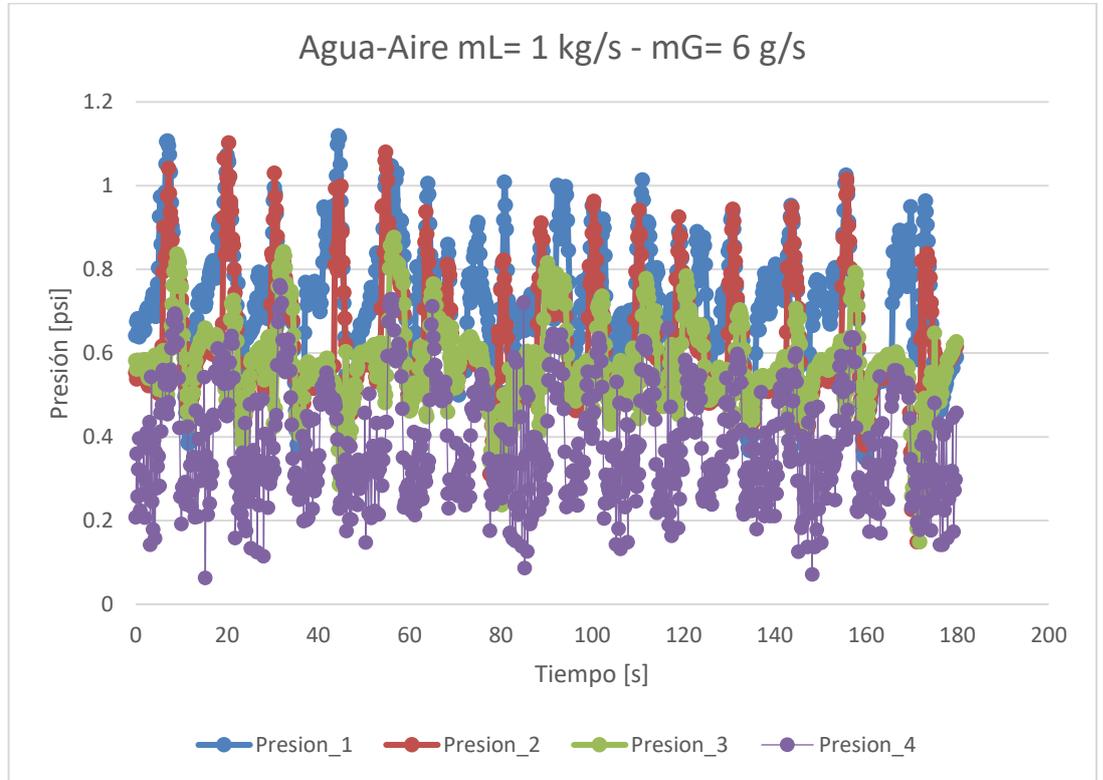
En cuanto al histograma de error que se encuentra dividido en 20 cuantiles con límites que van de -0.2222 hasta 0.1968 por lo que el “ancho” de cada cuantil es de  $W = \frac{0.1968 - (-0.2222)}{20} = 0.02095$  y en el cual podemos observar que tiene una distribución normal el 44% de los datos en el entrenamiento caen en dentro de los intervalos de 80% de precisión hasta el 64% de precisión entre los valores “objetivo” y los calculados por la RNA en el entrenamiento.

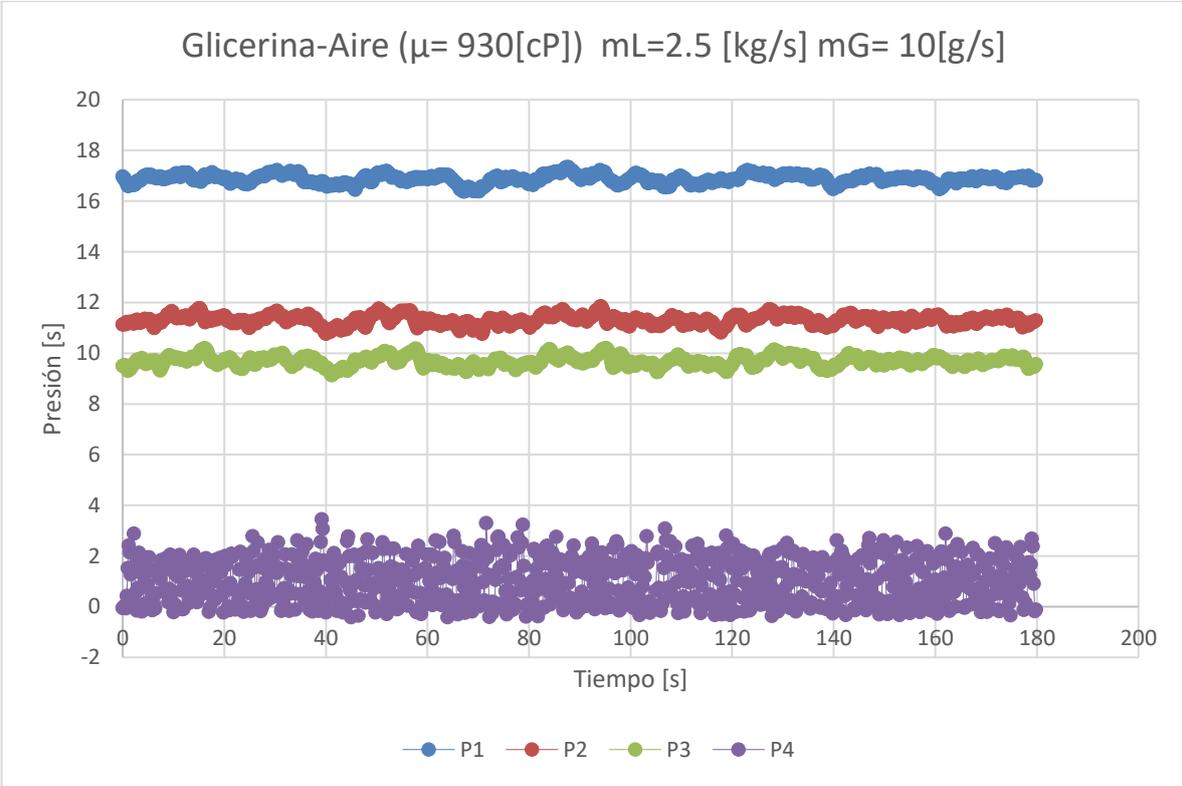
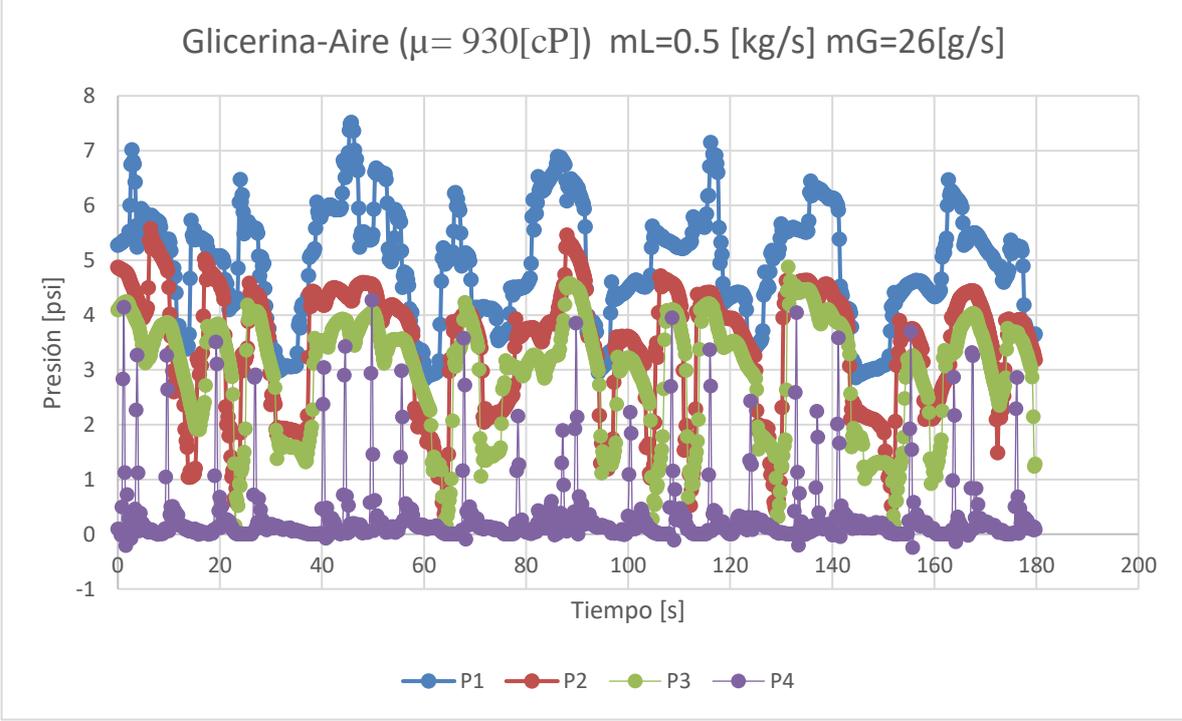


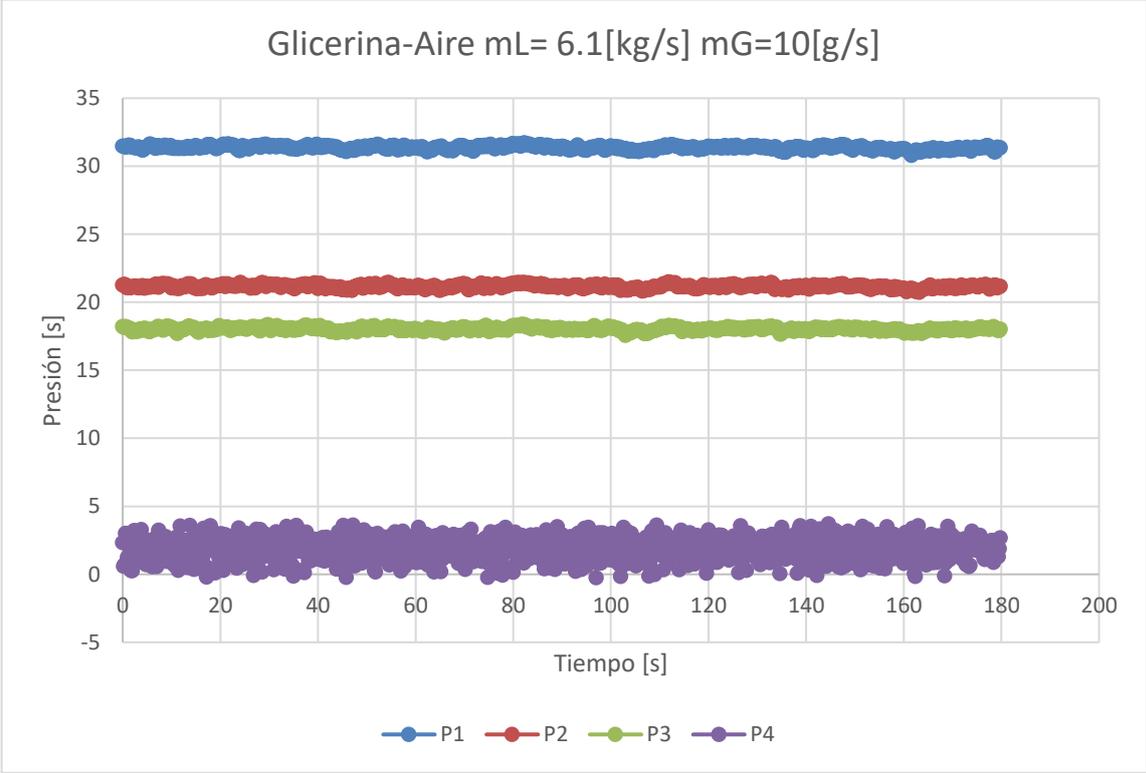
En cuanto a la gráfica de desempeño con respecto al error , después de tres configuraciones en cuanto a número de neuronas y esquema de entrenamiento se logró el mejor desempeño (para las capacidades de la maquina utilizada) el cual se muestra en la gráfica se encuentra en el orden de magnitud de  $10^{-1}$  , lo cual para efectos de este trabajo fue suficiente, dicho desempeño se logró aproximadamente en la iteración número 39 , que cuestiones de tiempo consto de aproximadamente 47 minutos alcanzar ese valor.



**C. Señales de presión e Incertidumbre experimental y propagación de error**







**Incertidumbre experimental.**

El análisis de error es la metodología encargada de estudiar las incertidumbres experimentales en las medidas.

En un procedimiento experimental, al valor de la diferencia de la propiedad obtenida experimentalmente  $Y_e$  y el valor  $Y_a$  "aceptado" o "real" se le denomina error  $\varepsilon$ .

$$\varepsilon = Y_e - Y_a$$

El error siempre es desconocido, sin embargo, se puede estimar mediante una cota superior para su valor absoluto. Esta cota es denominada como incertidumbre de la medida  $\Delta\varepsilon$ . Con ello se puede inferir que el valor real de la medida se encuentra en el intervalo:

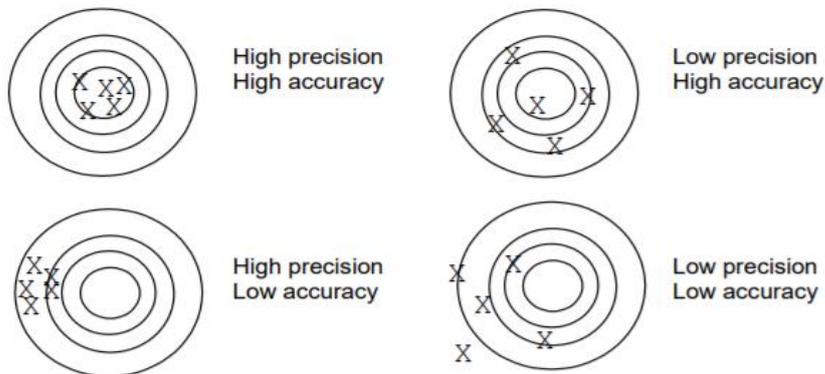
$$Y_a \in [Y_e - \Delta\varepsilon, Y_e + \Delta\varepsilon]$$



Por lo que el valor "real" o aceptado, se expresaría de la siguiente forma:

$$Y_a = Y_e \pm \Delta\varepsilon$$

Error {  
 Exactitud (Accuracy): Mide cuan cercano se encuentra el valor Medido al valor "real".  
 Precisión (Precision): Mide la repetitividad, es decir cuan cerca Se encuentran las mediciones }



Los errores de una medición en general se atribuyen a dos grupos de factores:

**Sistemáticos:** Son debidos principalmente a las prestaciones o utilización de los sistemas con los que se lleva a cabo la medición (calibración del sistema de medición, precisión del sistema de medición).

$$E_{S(x_1)}$$

Generalmente el error sistemático de la variable  $x_1$  se toma de datos provenientes de hojas de especificaciones del fabricante asociados a sensibilidad bajo ciertas condiciones o rangos de calibración.

**Aleatorios:** Debidos a factores ambientales no predecibles (vibraciones, pequeñas variaciones en la temperatura, etc.).

$$E_{a(x_1)} = t_{\theta,95\%} \frac{s}{\sqrt{n}}^5$$

Donde  $t_{\theta,95\%}$  es la función de probabilidad de la distribución t de student (bilateral) para un intervalo de confianza del 95% y con  $\theta$  grados de libertad y  $s$  es la desviación estándar de la variable  $x_1$  para  $n$  muestras experimentales.

Error total se calcula de la siguiente manera.

$$E_{T(x_1)} = \sqrt{E_{a(x_1)}^2 + E_{S(x_1)}^2}$$

Cabe señalar que las ecuaciones mostradas anteriormente se utilizan para el cálculo de las incertidumbres en medidas directas, si se tienen medidas indirectas se debe tomar en cuenta la propagación del error debido a cada variable involucrada a través de una relación funcional.

$$E_p^2 = \left(\frac{\delta f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\delta x_1} E_{T(x_1)}\right)^2 + \left(\frac{\delta f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\delta x_2} E_{T(x_2)}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\delta x_n} E_{T(x_n)}\right)^2$$

---

<sup>5</sup> Se partió del supuesto que las dispersiones de los datos experimentales tienen una distribución del tipo normal, y se utilizó t de Student bilateral debido a que a priori se desconocía el signo de la desviación.

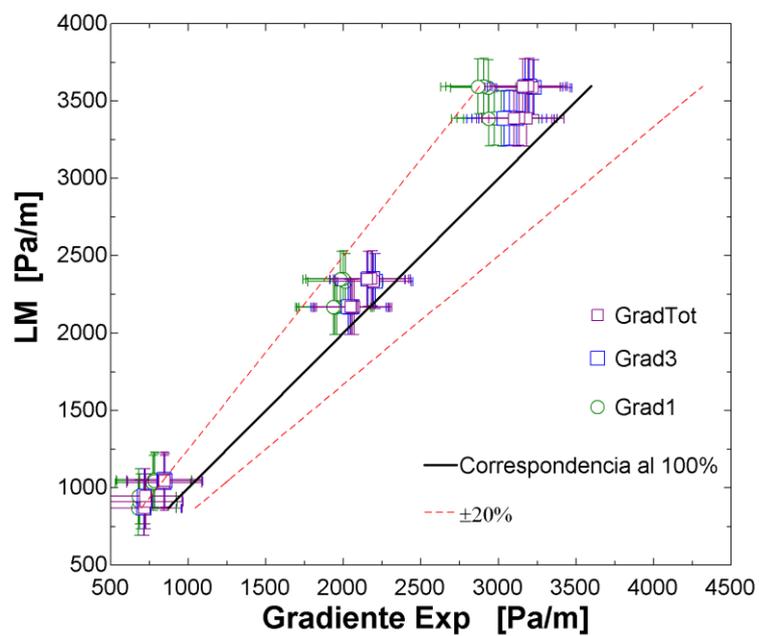
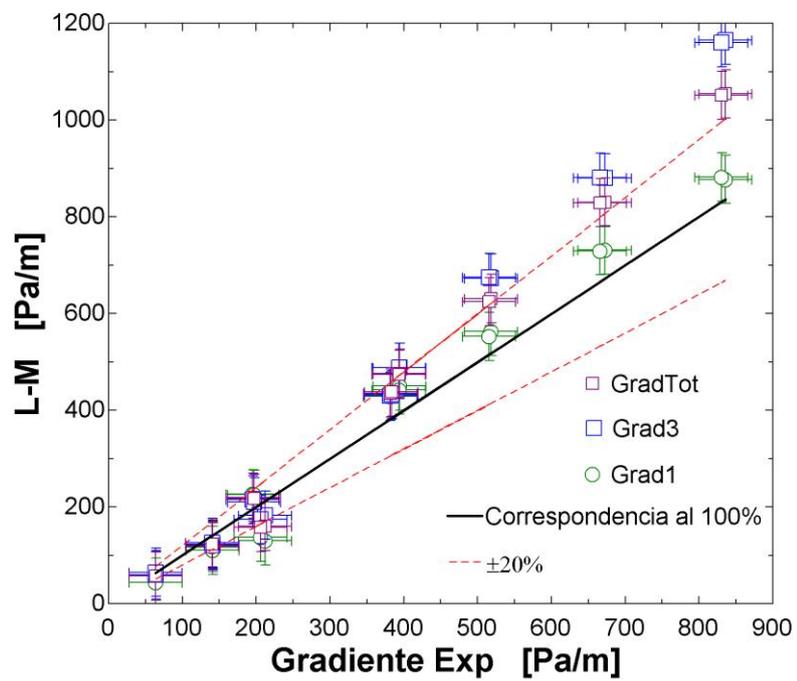
Para el presente trabajo se realizaron los cálculos de incertidumbre experimental de la siguiente manera:

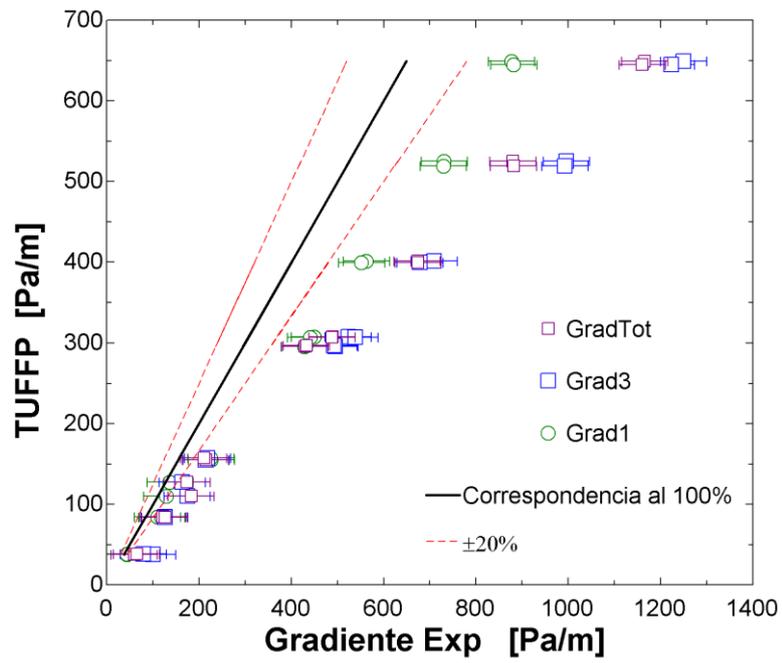
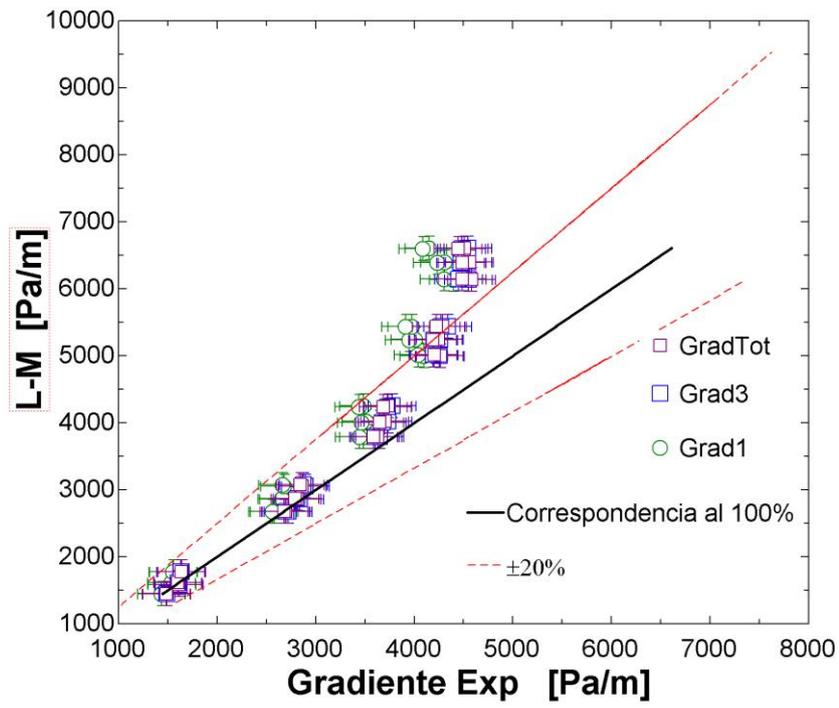
1. Se llevó a cabo el cálculo de error aleatorio para para cada valor de presión obtenida, obteniendo la desviación estándar de cada transductor de presión para cada experimento (900 datos por experimento) y se tomó un intervalo de confianza del 85% para la  $\theta = 3$  ya que se tienen 900 datos por evento con tres eventos por punto experimental, y la tabla a partir de  $n = 3$ , tiende al mismo valor  $t_{3,80\%} \approx 1.060$ .
2. Se obtuvo  $E_{S(p_k)}$  a partir de las especificaciones que provee el fabricante de los transductores (ver apéndice C).
3. Se obtuvo el error total  $E_{T(p_k)}$  donde k representa la posición de cada transductor.
4. A partir de la ecuación de gradiente de presión  $G_j = \frac{P_k - P_{k-1}}{L_r}$  donde j representa el gradiente 1, 3 y total, para las respectivas longitudes r, se calcula la propagación del error experimental.

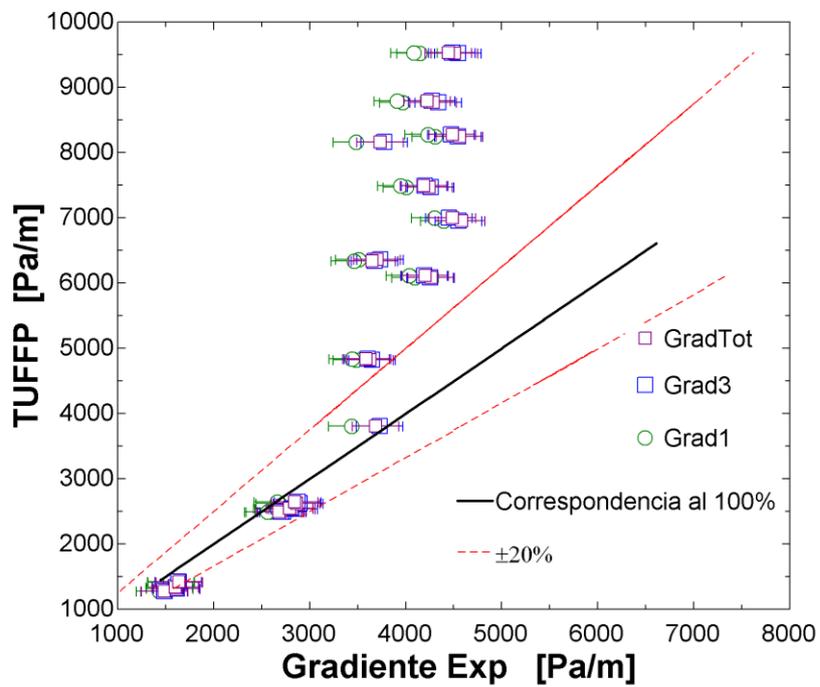
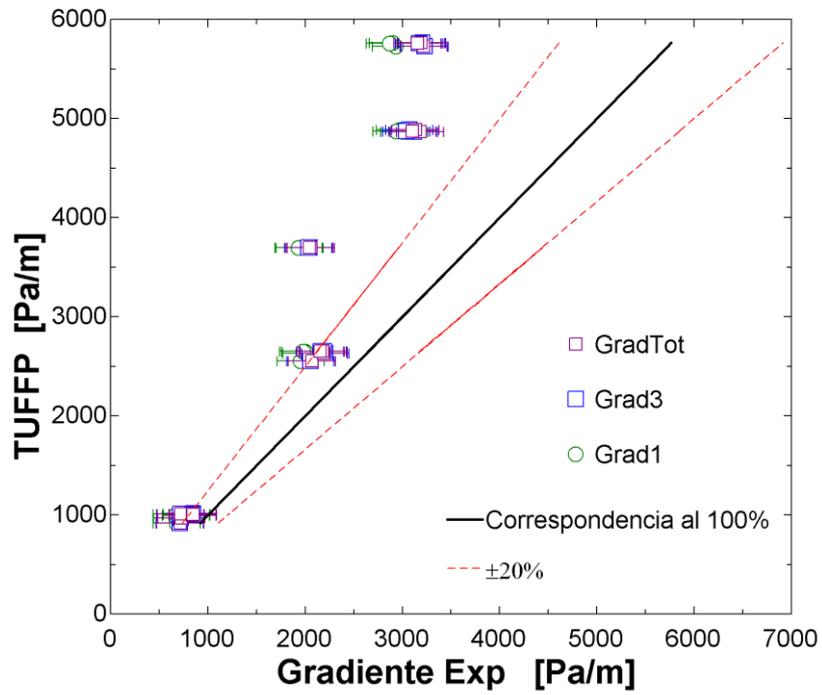
$$E_{P(G_j)}^2 = \left(\frac{\delta G}{\delta P_{k-1}} E_{T(p_{k-1})}\right)^2 + \left(\frac{\delta G}{\delta P_k} E_{T(p_k)}\right)^2 + \left(\frac{\delta G}{\delta L} E_{T(L)}\right)^2$$

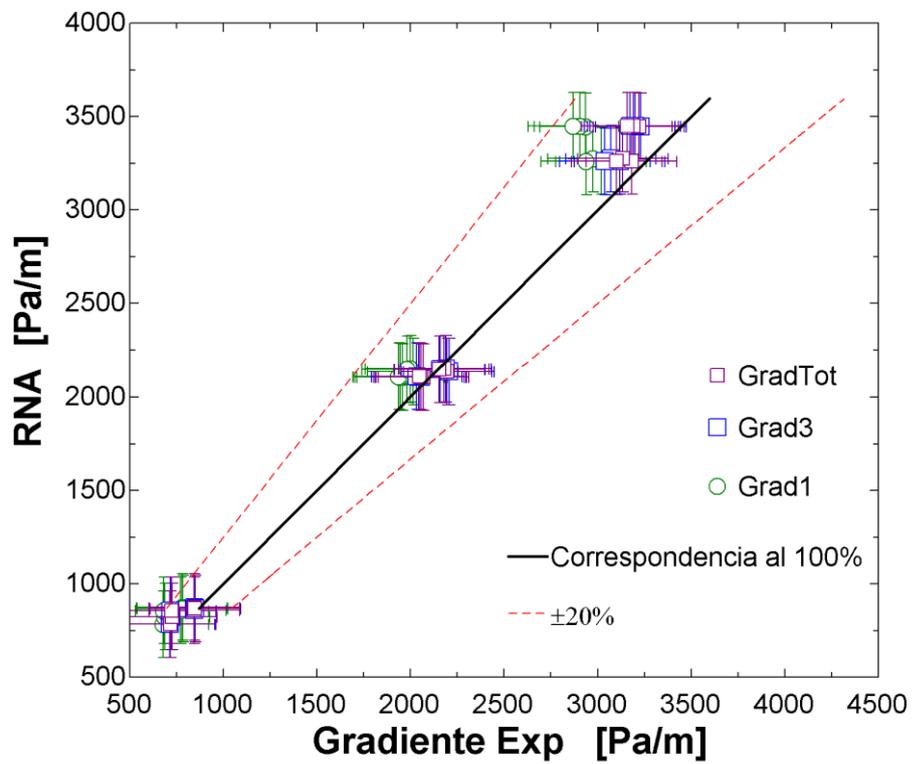
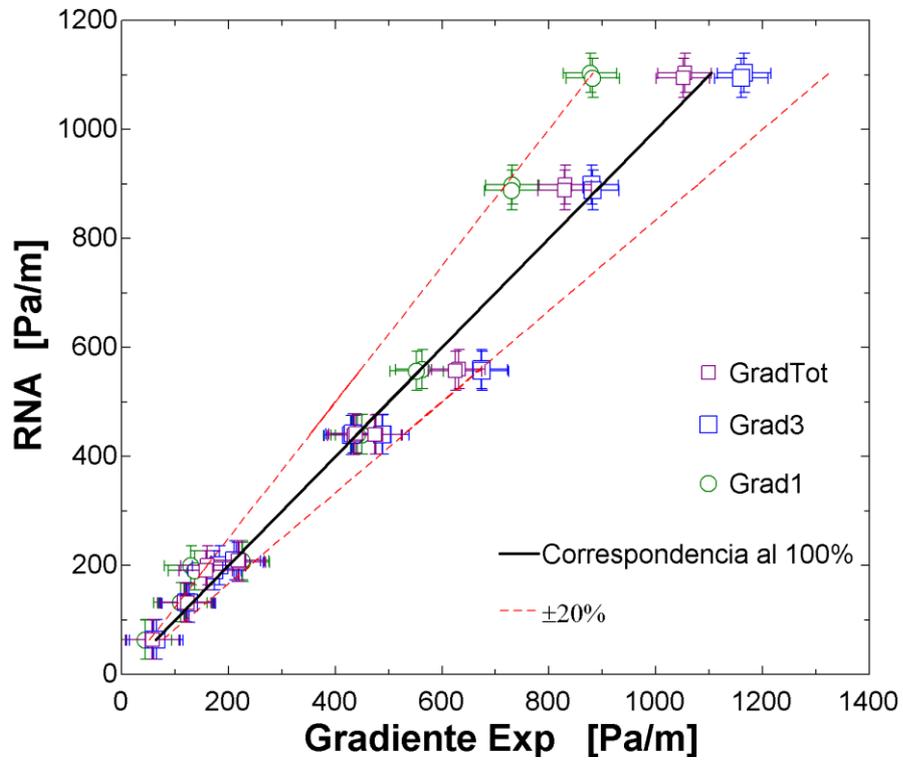
$$E_{P(G_j)}^2 = \left(\frac{1}{L_r} E_{T(p_k)}\right)^2 + \left(\frac{1}{L_r} E_{T(p_{k-1})}\right)^2 + \left(\frac{(p_k - p_{k-1})}{L_r^2} E_{T(L)}\right)^2$$

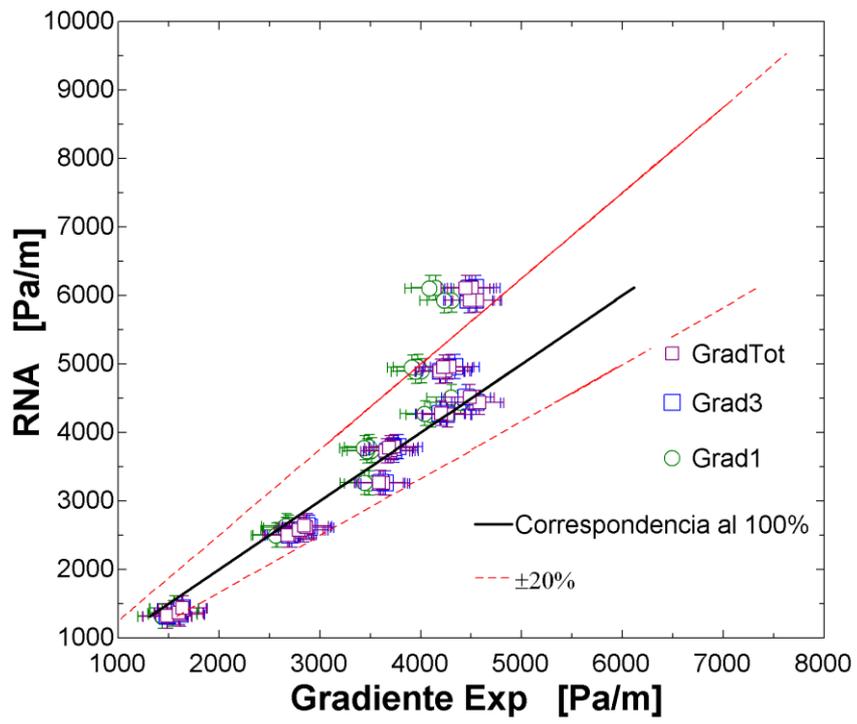
5. Finalmente se representa como intervalo al valor medido experimentalmente  $Gradiente_{medido} \pm E_{P(G_j)}^2$ .





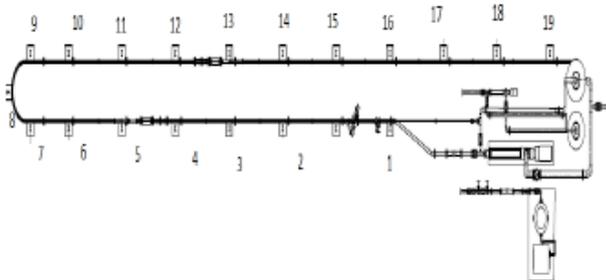






## D Bitácoras Experimentales

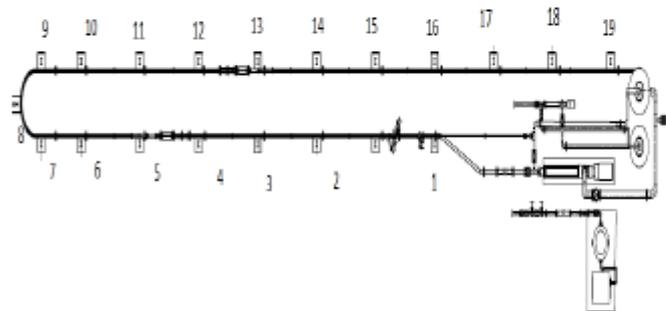
		CIPIA Laboratorio de Flujos multifásicos				
Fecha	Hora	Pruebas Experimentales llevadas a cargo de:	Series Experimentales		Tipo de Prueba	
Inicio: 13 / Oct /2017	12:00	Andrés Palacio-Johnatan Hernández - Diego Galevitz	No.	Exp. Por serie	Monofásica	
Termino: 13/Oct/2017			9	2	Bifásica <input checked="" type="checkbox"/>	
Substancias de Trabajo		Fase		Otra		
1.-Agua	Líquido	Condiciones Ambientales del Laboratorio		Observaciones Iniciales		
2.-Aire	Gas	Temperatura		22.5 C		
3.-		Presión Atm. (Tomada por sensor)		3.44 Vacuométrica		
Localización de Sensores y canales ver diagrama		Presión Atm. (Estación Meteorológica)		11.35PSI		
PROPIEDADES DE SUBSTANCIAS EXPERIMENTALES						
Propiedad	Substancia 1		Substancia 2		Substancia 3	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	998.06		13.4			
Viscosidad	NA					
Temperatura (°C)	inici 19.7-19.4final		22.4			
% De Agua en Volumen	100%					
OBSERVACIONES FINALES						
EL MODELO HIDRAULICO DE CRISTINA, LA TEMPERATURA DEL AIRE FUE DE						
TIPO Y MODE	NUMERO (Posicion)	CANAL ASOCIADO				
PRESOSPSIMA	2-0m-P1	Channel 9				
PRESOSPSIMA	6-17m-P2	Channel 10				
PRESOSPSIMA	9-4m-P3	Channel 11				
PRESOSPSIMA	16-20m-P4	Channel 12				
Termo-TK	7-18m-T1	Channel 13				
Termo-TK	16-40m-T2	Channel 14				
Termo-TK	0-0m-Tamb	Channel 15				
BA COLOCAR X EN CASO DE MONOFASICO O MULTIFASICO, PARA OTRA AÑADIR QUE TIPO, CALIBRACION, PRELI						
VARIABLES DE BOMBEO						
Frecuencia Hz	RPM	Tiempo de Operación (min)	Corriente (A)	Potencia (%)	Temperatura (°C)	Flujo másico (kg/s)
10	600	7	12.3	1.67		1
10	600	10	12.15	1.72		1
30	1800	4	13.2	3.80%		3.001
30	1800	3	13.14	3.90%		3.002
30	3000	5	13.08	6.20%		4.997
30	3000	8	13.12	6.40%		4.998
10	600	4	11.7	1.80%		0.991
10	600	7	12.24	1.70%		0.9999
30	1800	12	12.95	3.98%		3.003
30	1800	15	12.79	4.02%		3.001
30	3000	18	13.14	6.80%		5.003
30	3000	21	13	6.79%		5.001
10	600	5	12	1.83%		0.998
10	600	3	12.11	1.80%		0.998
30	1800	8	12.97	3.96%		3.001





Fecha	Hora	Pruebas Experimentales llevadas a cargo de:	Series Experimentales		Tipo de Prueba	
Inicio: 17 / Mayo / 2014	11:35	Johnatan Hernandez - Diego Galaviz	No.	Exp. Por serie	Monofásica	
Termino: 17 / Mayo / 2014	00:55		15	2	Bifásica	X
Substancias de Trabajo Fase		Condiciones Ambientales del Laboratorio		Observaciones Iniciales		
1.-Glicerina	Líquido	Temperatura		22		
2.-Gas	Líquido	Presion Atm. (Tomada por sensor)		3.44 Vacuométrica		
3.-		Presion Atm. (Estación Meteorológica)		11.35PSI		
Localización de Sensores y canales ver diagrama		Se encendieron los odos hidráulicos.				
Propiedades de Substancias Experimentales						
Propiedad	Substancia 1		Substancia 2		Substancia 3	
Densidad	1276					
Viscosidad	930					
Temperatura	20-					
% De Agua en Volumen	0%		0%			

## Observaciones Finales



DEI NUMERO (Posición)	CANAL ASOCIADO
VAJ 2-0m-P1	Channel 9
VAJ 6-17m-P2	Channel 10
VAJ 9-4m-P3	Channel 11
VAJ 16-20m-P4	Channel 12
VAJ 18-26m-P5	Channel 19
7-18m-T1	Channel 13
16-40m-T2	Channel 14
0-0m-Tamb	Channel 15

1. COLOCAR A EN CASO DE MULTIFÁSICO O MULTIFÁSICO, PARA UNA PRUEBA QUE TIPO CALIBRACIÓN, PUES

VARIABLES DE BOMBEO						
Frecuencia Hz	RPM	Tiempo de Operación min	Corriente A	Potencia %	Temperatura [C] Glicerina	Fujo másico kg/s
10	10	3	12.66	2.15	23	
10	10	6	12.05	2.16	23.3	
10	10	4	12.5	2.1	23.5	
10	10	7	12.4	1.9	23.6	
10	10	4	12.11	2.13	23.9	
10	10	7	12.36	2	23.9	
20	20	4	13.85	5.06	24.3	
20	20	7	13.24	4.81	24.4	
20	20	4	13.99	4.94	24.6	
20	20	7	13.9	5	24.7	
20	20	5	13.7	4.92	25	
20	20	8	13	5.1	25.1	
30	30	4	14.9	8.47	25.3	
30	30	7	14.22	8.16	25.5	
30	30	4	14.18	8.25	25.8	
30	30	7	14.9	8.36	26	

**E. Especificaciones de sensores y accesorios.**  
**Se anexan hojas de especificaciones.**  
**Transductor de presión.**

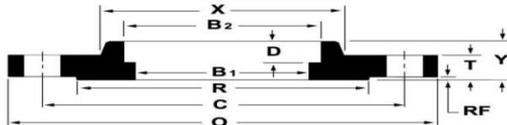
**PERFORMANCE SPECIFICATIONS**

Ambient Temperature: 25°C (unless otherwise specified)

PARAMETERS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Accuracy	-0.1		0.1	%F.S. BFSL	
(RSS of linearity, hysteresis, and repeatability)					
Isolation, Body to any Lead	100			MΩ	@500V <sub>cc</sub>
Dielectric Strength			2	mA	@500V <sub>ac</sub> , 1min
Pressure Cycles	1.00E+6			0-FS Cycles	
Proof Pressure	3X		20k psi	Rated	
Burst Pressure	4X		20k psi	Rated	
Long Term Stability (1 year)	-0.1		0.1	%F.S.	
Offset	-0.25		0.25	%F.S.	@25°C
Span	-0.25		0.25	%F.S.	@25°C
Total Error Band	-0.5		0.5	%F.S.	Over compensated temperature
Compensated Temperature	-20		+85	°C	
Operating Temperature	-40		+125	°C	Except cable 105°C max
Storage Temperature	-40		+125	°C	Except cable 105°C max
Load Resistance (R <sub>L</sub> )	R <sub>L</sub> > 100k			Ω	Voltage Output
	< (Supply Voltage -9V) / 0.02A			Ω	Current Output
Current Consumption			5	mA	Voltage Output
Rise Time (10% to 90%)	<2ms (Voltage Output); <3ms (Current Output); Without Snubber				
Pressure Port Material	316L Stainless Steel; 316L Stainless Steel Snubber				
Shock	50g, 11msec Half Sine Shock per MIL-STD-202G, Method 213B, Condition A				
Vibration	±20g, MIL-STD-810C, Procedure 514.2, Fig 514.2-2, Curve L				

For custom configurations, consult factory.

**Bridas y tubería**



All dimensions are in inches.  
 These flanges will be furnished with a 1/16" raised face unless otherwise specified.  
 Standard Bore will be furnished unless otherwise specified.

ANSI B16.5 CLASS 300 SOCKET-WELD FLANGES											
Nominal Pipe Size	Outside Diameter (O)	Thickness (T)	Length Thru Hub (Y)	Hub Diameter (X)	Bore (B <sub>1</sub> )	Bore (B <sub>2</sub> )	Depth of Socket (D)	Number of Holes	Diameter of Holes	Bolt Circle (C)	Approximate Weight (lbs)
1/2	3.75	0.56	0.88	1.50	0.62	0.68	0.38	4	0.63	2.63	2
3/4	4.63	0.63	1.00	1.88	0.82	1.09	0.44	4	0.75	3.25	3
1	4.88	0.69	1.06	2.13	1.05	1.36	0.50	4	0.75	3.50	3
1 1/4	5.25	0.75	1.06	2.50	1.38	1.70	0.56	4	0.75	3.88	4
1 1/2	6.13	0.81	1.19	2.75	1.61	1.95	0.63	4	0.88	4.50	6
2	6.50	0.88	1.31	3.31	2.07	2.44	0.69	8	0.75	5.00	7
2 1/2	7.50	1.00	1.50	3.94	2.47	2.94	0.75	8	0.88	5.88	10
3	8.25	1.13	1.69	4.63	3.07	3.57	0.81	8	0.88	6.63	13

## Viscosímetro.

### 1.2 Utilities

Input Voltage:	115 VAC or 230 VAC
Input Frequency:	50 or 60 Hz
Power Consumption:	Less than 20 WATTS

### 1.3 Specifications

Speeds:	<b>LVF:</b>	60, 30, 12, 6
	<b>LVT:</b>	60, 30, 12, 6, 3, 1.5, 0.6, 0.3
	<b>RVF:</b>	20, 10, 4, 2
	<b>RVT:</b>	100, 50, 20, 10, 5, 2.5, 1, 0.5
	<b>HAT:</b>	100, 50, 20, 10, 5, 2.5, 1, 0.5
	<b>HBT:</b>	100, 50, 20, 10, 5, 2.5, 1, 0.5

Accuracy:  $\pm 1\%$  of Full Scale Range in use  
(See Appendix D for details)

Repeatability:  $\pm 0.2\%$  of Full Scale Range in use

Weight:	Gross Weight	20 lb	9 kg
	Net Weight	17 lb	7.7 kg
	Carton Volume	1.65 cu ft	0.05 m <sup>3</sup>

Operating Temperature:  $-20^{\circ}\text{C}$  ( $-4^{\circ}\text{F}$ ) to  $65^{\circ}\text{C}$  ( $149^{\circ}\text{F}$ )

### 1.4 Set-Up

- 1) Assemble the laboratory stand. (Refer to Appendix E.)
- 2) Mount the Viscometer securely on a Brookfield laboratory stand. On some Viscometers, it may be necessary to unscrew the nut located at the point where the power cord enters the viscometer. This permits the metal handle to be inserted into the laboratory stand clamp.  
**Note:** The position of the laboratory stand clamp assembly is important. Refer to Appendix E for proper alignment and positioning of the clamp assembly.  
Level the viscometer, referring to the bubble level on the instrument. If the viscometer cannot be leveled, recheck the laboratory stand assembly, as shown on Sheet #82-0330 (supplied with Model A laboratory stand).
- 3) Verify that the viscometer's power requirements match your power source before connecting it to power.
- 4) For Cone/Plate models, refer to Appendix A.

## Medidores de flujo.

Proline Promass 80F, 83F

### Performance characteristics

#### Reference operating conditions

- Error limits following ISO/DIS 11631
- Water, typically +20 to +30 °C (+68 to +86 °F); 2 to 4 bar (30 to 60 psi)
- Data according to calibration protocol  $\pm 5$  °C ( $\pm 9$  °F) and  $\pm 2$  bar ( $\pm 30$  psi)
- Accuracy based on accredited calibration rigs according to ISO 17025

#### Maximum measured error

The following values refer to the pulse/frequency output. The additional measured error at the current output is typically  $\pm 5$   $\mu$ A. Design fundamentals → [17](#).

*o.r.* = of reading

#### Masse flow and volume flow (liquid)

Promass 83F:

- $\pm 0.05\%$  *o.r.* (PremiumCal, for mass flow)
- $\pm 0.10\%$  *o.r.*

Promass 80F:

- $\pm 0.10\%$  *o.r.* (optional)
- $\pm 0.15\%$  *o.r.*

#### Mass flow (gas)

Promass 83F, 80F:  $\pm 0.35\%$  *o.r.*

#### Density (liquid)

- $\pm 0.0005$  g/cc (under reference conditions)
- $\pm 0.0005$  g/cc (after field density calibration under process conditions)
- $\pm 0.001$  g/cc (after special density calibration)
- $\pm 0.01$  g/cc (over the entire measuring range of the sensor)

1 g/cc = 1 kg/l

Special density calibration (optional):

- Calibration range: 0.8 to 1.8 g/cc, +5 to +80 °C (+41 to +176 °F)
- Operation range: 0.0 to 5.0 g/cc, -50 to +200 °C (-58 to +392 °F)

#### Temperature

$\pm 0.5$  °C  $\pm 0.005 \cdot T$  °C

( $\pm 1$  °F  $\pm 0.003 \cdot (T - 32)$  °F)

T = medium temperature

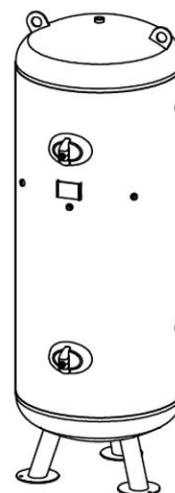
#### Zero point stability

Promass F (Standard)

DN		Zero point stability	
[mm]	[inch]	[kg/h] or [l/h]	[lb/min]
8	3/8"	0.030	0.001
15	1/2"	0.200	0.007
25	1"	0.540	0.019
40	1 1/2"	2.25	0.083
50	2"	3.50	0.129
80	3"	9.00	0.330
100	4"	14.00	0.514
150	6"	32.00	1.17
250	10"	88.00	3.23



## Tanque de aire comprimido



Datos principales	
Elemento	Tanque de aire comprimido
Marca	OKS Otto Klein GmbH
Modelo	D - 57223 Kreuztal

Datos técnicos							
Capacidad	Presión máx. de trabajo		Presión de prueba		Temp. Min.	Temp. Max	Peso
Its	bar	psig	bar	psig	°C	°C	kg
1000	16	232	23	333.5	-10	50	330

## Tolvas

Datos	
Elemento	Tolva 1
Marca	Rotoplas
Capacidad	1300 Its
Tipo	Fondo conico a 45°
Diametro	1.10 m
Altura	1.87 m



Datos	
Elemento	Tolva 2
Marca	Rotoplas
Capacidad	600 Its
Tipo	Fondo conico a 45°
Diametro	0.98 m
Altura	1.55 m



600 Its.



45°

1 300 Its.



Flange Size	Bolts Per Kit	Gasket Part Number		
		Buna-N	EPDM	FKM
1/2	4	GK1-005	GK2-005	GK3-005
3/4	4	GK1-007	GK2-007	GK3-007
1	4	GK1-010	GK2-010	GK3-010
1-1/4	4	GK1-012	GK2-012	GK3-012
1-1/2	4	GK1-015	GK2-015	GK3-015
2	4	GK1-020	GK2-020	GK3-020
2-1/2	4	GK1-025	GK2-025	GK3-025
3	4	GK1-030	GK2-030	GK3-030
4	8	GK1-040	GK2-040	GK3-040
5	8	GK1-050	GK2-050	GK3-050
6	8	GK1-060	GK2-060	GK3-060
8	8	GK1-080	GK2-080	GK3-080
10	12	GK1-100	GK2-100	GK3-100
12	12	GK1-120	GK2-120	GK3-120

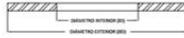
Full faced, 1/8" thick elastomer gaskets with a Shore 'A' Durometer of approximately 70 is recommended.

**General Comparison Overview**

Comparison Category	Elastomer		
	FKM	EPDM	Nitrile
Inorganic Chemicals			
Acids	1	1	2
Bases	4	1	2
Organic Chemicals			
Alcids	1	1	2
Alcohols	3	1	1
Aldehydes	3	1	3
Amines	4	1	4
Aromatic Hydrocarbons	1	4	3
Ethers	4	3	4
Halogenides	1	4	4
Paraffins	4	1	4
Water	1	1	1

Key: 1= Excellent, 2= Good, 3= Fair, 4= Poor

**MEDIDAS DE JUNTAS SEGÚN ASME B16.21, PARA BRIDAS SEGÚN ASME B16.5**



Medida (NPS)	Clase 150 libras	
	Díametro exterior (OD) Pulgadas mm	Díametro exterior (OD) Pulgadas mm
1/2	0.88 22	1.38 35
3/4	1.06 27	1.55 39
1	1.31 33	1.88 47
1 1/4	1.66 42	2.30 58
1 1/2	1.91 49	2.58 65
2	2.38 60	3.12 79
2 1/2	2.88 73	3.68 93
3	3.50 89	4.38 111
3 1/2	4.00 102	5.00 127
4	4.50 114	5.68 143
5	5.56 141	6.75 171
6	6.62 168	8.12 206
8	8.62 219	10.62 270
10	10.75 273	13.38 340
12	12.75 324	16.12 410
14	14.00 354	17.75 451
16	16.00 406	20.25 514
18	18.00 457	22.62 578
20	20.00 508	24.88 627
24	24.00 610	28.25 718

**MEDIDAS DE JUNTAS SEGÚN ASME B16.21, PARA BRIDAS SEGÚN ASME B16.5**



Medida (NPS)	Clase 300 libras	
	Díametro exterior (OD) Pulgadas mm	Díametro exterior (OD) Pulgadas mm
1/2	0.88 22	1.31 33
3/4	1.06 27	1.49 38
1	1.31 33	1.88 47
1 1/4	1.66 42	2.19 55
1 1/2	1.91 49	2.38 60
2	2.38 60	2.88 73
2 1/2	2.88 73	3.38 86
3	3.50 89	3.88 98
3 1/2	4.00 102	4.50 114
4	4.50 114	5.12 130
5	5.56 141	6.12 156
6	6.62 168	7.12 181
8	8.62 219	9.12 232
10	10.75 273	11.12 282
12	12.75 324	13.12 335
14	14.00 354	15.12 386
16	16.00 406	17.12 437
18	18.00 457	19.12 488
20	20.00 508	21.12 539
24	24.00 610	25.12 640

## F. Códigos.

```
%DIEGO GALAVIZ Funcion Lockhart-Martineli%

function [PtLPSI,uL,uG,rhoG,lambda,Phi_L,Phi_G,Re_L,Re_G,GradFL,GradPG]= Lockhart(mL,mG,Pair1,Tair)

%constantes
g=9.81;
R=286.9;

%Datos
L=1;%m
D=2.92*0.0254;%in a m
K0=0.00005;%rug abs m
RR=K0/D;%rug rela
A0=pi*(D^2/4);
%ml=Flujo masico Aire;
%mg=flujo masico de gas;
rhoL=998;
mu_L=1*0.001;%cP a Pa/s
nu_L=mu_L/rhoL;%viscosidad cinematica
%Datos aire
%Pair1;%PSI
Pair11=Pair1*6894.75728;%Pa
Pair111=Pair1*0.06895;%bar

%Tair=;%K
Zair = compressibility('air',Tair,Pair111);
%Calculo Liquido Re
GammaL=rhoL*g;%
gg=g*(pi^2/8);
QL=mL/rhoL;
uL=QL/A0;
Re_L=(4*QL)/(pi*D*nu_L);
%Calculo Gas Re

rhoG=(Pair11)/(Zair*R*Tair);
GammaG=rhoG*g;%
mu_G=1.81*10^(-5);% a Pa/s
nu_G=mu_G/rhoG;
QG=mG/rhoG;
uG=QG/A0;
Re_G=(4*QG)/(pi*D*nu_G);
%Ecuacion de Darcy Weisbach Liquido
if Re_L>2600

Para.d=D; Para.Re=Re_L; Para.eps=K0;

FL=(0.25)/(log10(((Para.eps)/(Para.d)/3.7)+(5.74/(Para.Re^0.9))))^2;%
F darcy
f_L=FL;
```

```

ResfL=f_L*((L)/(gg*(D^5)));%En forma de resistencia
hf_L=ResfL*QL^2;%Perdida de carga friccion
DeltaPL=hf_L*GammaL;%Pa
GradPL=DeltaPL/L;%Pa/m

else
DeltaPL=(32*mu_L*uL*L)/D^2;%Pa Eq Poiseulle
GradPL=DeltaPL/L;%Pa/m
end

%Ecuacion de Darcy Weisbach Gas

%F darcy
FG=(0.25)/(log10(((K0)/(D)/3.7)+(5.74/(Re_G^0.9))))^2;

ResfG=FG*((L)/(gg*D^5));%En forma de resistencia
hf_G=ResfG*QG^2;%Perdida de carga friccion
DeltaPG=hf_G*GammaG;%Pa

GradPG=DeltaPG/L;%Pa/m
%Lockhart-Martinelli
%chsilom-Darby Eq 15-74
%Parametro de martinelli
lambda=sqrt((GradPL)/(GradPG));
if Re_L >2600
    if Re_G >2600
        Ct=20;
    end
else
    if Re_G>2600
        Ct=12;
    else
        Ct=5;
    end
end
%multiplicadores
Phi_G= sqrt(1+Ct*lambda+lambda^2);
Phi_L= sqrt(1+(Ct/(lambda))+(1/(lambda^2)));
PtG=(Phi_G^2)*GradPG;
PtL=(Phi_L^2)*GradPL;

if PtL>PtG

    PtLPSI=PtL*0.000145038;%Factor de conversión para PSI
else
    PtLPSI=PtG*0.000145038;%Factor de conversión para PSI
end

```

**RNA.**

```

% Creacion red neuronal para ajuste de curva version 4.0
%
%DIEGO GALAVIZ 26-MARCH-2018 00:47:22
%
% Inp - input datos.
% Phi - target datos.

x = Inp;
t = Phi;

% Función de entrenamiento
%
% 'trainbr' takes longer but may be better for challenging problems.
trainFcn = 'trainbr'; % Bayesian Regularization

% Red de ajuste
% numero de neuronas
hiddenLayerSize = 11;
net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);

% Pre y post proceso de datos (normalizacion)y elimiencaion de valores
% constes

net.input.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
net.output.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};

% Configurar división de los datos y aociar porcentajes a
entrenamiento
%Validacion y prueba
net.divideFcn = 'dividerand'; % Division aleatoria
net.divideMode = 'sample'; % Divide cada muestra
net.divideParam.trainRatio = 75/100;
net.divideParam.valRatio = 20/100;
net.divideParam.testRatio = 5/100;

% Funcion de desempeño
net.performFcn = 'mae'; % Mean absolute error
%Funciones de graficas

net.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate','ploterrhist', ...
    'plotregression', 'plotfit'};

% Entrenamiento de la red
[net,tr] = train(net,x,t);

% Test de la red
y = net(x);
e = gsubtract(t,y);
performance = perform(net,t,y)

% Recalculate Training, Validation and Test Performance

```

```

trainTargets = t .* tr.trainMask{1};
valTargets = t .* tr.valMask{1};
testTargets = t .* tr.testMask{1};
trainPerformance = perform(net, trainTargets, y)
valPerformance = perform(net, valTargets, y)
testPerformance = perform(net, testTargets, y)

% Es un comando del Toolbox para generar una imagen con el diagrama de
la RNA-View the Network
view(net)

% Genera el modelo Final ya entrenado en una funcion que utiliza
matrices de
% entrada y salida

if (true)
    % Generate a matrix-only MATLAB function for neural network code
    % generation with MATLAB Coder tools.
    genFunction(net, 'ANN_LM4', 'MatrixOnly', 'yes');
    y = ANN_LM4(x);
end
if (false)
    % Genera el diagrama para simulink y poderlo utilizar en diagrama de
    % bloques
    gensim(net);
end

```

```

function [y1] = ANN_LM4(x1)
%ANN_LM4 neural network simulation function.
%
% Funcion entregada por la RNA cprogramada Diego Galaviz LM4.0- 30-
Apr-2018 10:44:21.
% genFunction, 27-March-2018 10:44:21.
%
% [y1] = ANN_LM4(x1) Argumentos de entrada:
%   x = 3xQ matriz, input #1-Re_L Re_G X
% and returns:
%   y = 1xQ matriz, output #1-Phi
%   donde Q es el numero de datos.

%#ok<*RPMT0>

% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====

% Input 1
x1_step1_xoffset = [1.07604717080806;49.0601132665098;
5028.01210100657];
x1_step1_gain = [0.0137372258192266;2.32325439356021e-05;
8.00256277602955e-05];
x1_step1_ymin = -1;

% Layer 1
b1 = [-0.034834635092498595;0.036876542311545135;
-0.03430353166525274;0.019257443243516453;0.056022849531246421;
-0.037089754276230798;0.033942844397761636;0.021495430506884353;
0.019684949596238958;-0.027913746483959907;0.040990605595345626];
IW1_1 = [-0.21014238969710758 -0.039101723969742673
0.050293346543101324;0.18693111084792643 0.041654964210583206
-0.064534282040495494;-0.20892353590489227 -0.039136682145893609
0.05079399266189253;-0.30470889386785172 -0.011195203597529988
-0.022748623608403542;0.60061329376877182 -0.096808268393564156
0.20124426651002478;-0.20074895083229757 -0.04086103314851619
0.056498407957169289;0.21276399564324178 0.038466158407461475
-0.048501754419232303;0.22837927280931411 0.032273574350492655
-0.035875708925209859;0.23352154100515318 0.030722856572870803
-0.032575338513787119;-0.16210656962401185 -0.039400782505536941
0.074269716686040418;0.19494292679560432 0.042224610525346748
-0.061497589992923554];

% Layer 2
b2 = -0.064868807031385908;
LW2_1 = [-0.30069339338035839 0.27338648022041812
-0.29866795492887804 -0.37401121009200428 0.6408527165272272
-0.29069921249239739 0.30328616284031812 0.31242162341668689
0.31748537342863692 -0.23582284843237353 0.2867848256114745];

% Output 1
y1_step1_ymin = -1;

```

```

y1_step1_gain = 0.0140269086982918;
y1_step1_xoffset = 4.22687361307201;

% ===== SIMULACION =====

% Dimensiones
Q = size(x1,2); % samples

% Input 1
xp1 = mapminmax_apply(x1,x1_step1_gain,x1_step1_xoffset,
x1_step1_ymin);

% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);

% Layer 2
a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;

% Output 1
y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1_gain,y1_step1_xoffset,
y1_step1_ymin);
end

% ===== SUB-FUNCIONES =====

function y = mapminmax_apply(x,settings_gain,settings_xoffset,
settings_ymin)
    y = bsxfun(@minus,x,settings_xoffset);
    y = bsxfun(@times,y,settings_gain);
    y = bsxfun(@plus,y,settings_ymin);
end

%Funcion de Transferencia
function a = tansig_apply(n)
    a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end

function x = mapminmax_reverse(y,settings_gain,settings_xoffset,
settings_ymin)
    x = bsxfun(@minus,y,settings_ymin);
    x = bsxfun(@rdivide,x,settings_gain);
    x = bsxfun(@plus,x,settings_xoffset);
end

```

## 8. Referencias bibliográficas

Bertola, V. (2004). Modelling and experimentation in two-phase flow. Wien: Springer.

Brennen, C. (2009). Fundamentals of multiphase flow. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Chisholm, D. (1967). A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow. *International Journal of Heat And Mass Transfer*, 10(12), 1767-1778. doi: 10.1016/0017-9310(67)90047-6

Drew, D., & Passman, S. (2005). Theory of multicomponent fluids. New York: Springer.

Dukler, A., Wicks, M., & Cleveland, R. (1964). Frictional pressure drop in two-phase flow: A. A comparison of existing correlations for pressure loss and holdup. *Aiche Journal*, 10(1), 38-43. doi: 10.1002/aic.690100117

Filip, A. (2013). Determination of Pressure Drop in Horizontal Pipes for Air – Water Two Phase Flow. *Mathematical Modelling In Civil Engineering*, 9(2), 1-8. doi: 10.2478/mmce-2013-0005

Hemeida, A., & Sumait, F. (1988). Petroleum Engineering Department, College of Engineering, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia. *J. Eng. Sci., King Saud Univ.*, 14(2), 1408/1988. doi: 10.1023/a:1009901115843

Kim, T. (2015). *Horizontal Slug Flow Characteristics by Changing Pipe Diameter* (Doctorado). Seoul National University.

Liu, L. (2014). The phenomenon of negative frictional pressure drop in vertical two-phase flow. *International Journal Of Heat And Fluid Flow*, 45, 72-80. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.12.003

Lu, C., Kong, R., Qiao, S., Larimer, J., Kim, S., & Bajorek, S. et al. (2018). Frictional pressure drop analysis for horizontal and vertical air-water two-phase flows in different pipe sizes. *Nuclear Engineering And Design*, 332, 147-161. doi: 10.1016/j.nucengdes.2018.03.036

Mateos Mekisso, H. (2004). *COMPARISON OF FRICTIONAL PRESSURE DROP CORRELATIONS FOR ISOTHERMAL TWO-PHASE HORIZONTAL FLOW* (Licenciatura). Bahir Dar University.

Matsubara, H., & Naito, K. (2011). Effect of liquid viscosity on flow patterns of gas–liquid two-phase flow in a horizontal pipe. *International Journal Of Multiphase Flow*, 37(10), 1277-1281. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.08.001

Mekisso, H. (2013). Comparison of frictional pressure drop correlations for isothermal two-phase horizontal flow.

Müller-Steinhagen, H., & Heck, K. (1986). A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes. *Chemical Engineering And Processing: Process Intensification*, 20(6), 297-308. doi: 10.1016/0255-2701(86)80008-3

Poesio, P., Strazza, D., & Sotgia, G. (2009). Very-viscous-oil/water/air flow through horizontal pipes: Pressure drop measurement and prediction. *Chemical Engineering Science*, 64(6), 1136-1142. doi: 10.1016/j.ces.2008.10.061

Shen, X., Hibiki, T., & Nakamura, H. (2015). Bubbly-to-cap bubbly flow transition in a long-26m vertical large diameter pipe at low liquid flow rate. *International Journal Of Heat And Fluid Flow*, 52, 140-155. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.01.001

Spedding, P., Benard, E., & Donnelly, G. (2006). Prediction of pressure drop in multiphase horizontal pipe flow. *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 33(9), 1053-1062. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.05.004

Ullmann, A., Goldstein, A., Zamir, M., & Brauner, N. (2004). Closure relations for the shear stresses in two-fluid models for laminar stratified flow. *International Journal Of Multiphase Flow*, 30(7-8), 877-900. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2004.03.008

Xu, Y., Fang, X., Su, X., Zhou, Z., & Chen, W. (2012). Evaluation of frictional pressure drop correlations for two-phase flow in pipes. *Nuclear Engineering And Design*, 253, 86-97. doi: 10.1016/j.nucengdes.2012.08.007