



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

“ANÁLISIS DE FLUJO EN UN CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO CON
ESFERAS PARA FOTOCATÁLISIS EN LA PLANTA SOLAR DEL INSTITUTO DE
INGENIERÍA”

Tesis que para obtener el Título de
Ingeniero Mecánico

PRESENTA:

David Eduardo Ascencio San Pedro

Tutor:

Dr. Rafael Almanza Salgado



2011



En el comienzo todo era más fácil

No había esa preocupación de que iba a ser mañana.

En un comienzo solo había grandes ideas sin limitantes.

Y se podía llegar tan alto como se quisiera llegar.

Todo estaba en la imaginación.

Y así debe de ser la investigación.

David Eduardo Ascencio San Pedro

Agradecimientos.

A mis padres Adela y David por apoyarme todo este tiempo en la culminación de mi educación, así como por ser unos grandes guías en mi desarrollo como persona.

A mi hermana Gabriela por su valioso apoyo en el desarrollo de la tesis, porque sin ella hubiera sido más difícil acabar con todo el presente trabajo, así como su gran amistad y comprensión a lo largo de todos estos años y aunque este lejos ahora es como si estuviera aquí.

A mi hermana Lucero por todas las cosas que hemos pasado juntos desde la niñez hasta esta fecha, y todas las reuniones (fiestas) que hemos tenido porque esto también influye en la vida de las personas.

Al Dr. Rafael Almanza Salgado por todas las prestaciones y desarrollo experimental de esta tesis, así como su amistad y sus consejos.

Al M.I. Lauro Santiago Cruz por su apoyo en el desarrollo de la instrumentación y en el programa utilizado en el presente trabajo y su muy valiosa y entusiasta participación en la revisión de la misma, sin él hubiera sido muy difícil darle forma a este trabajo.

A Rigoberto Domínguez Suriano por ser un gran amigo y compañero tanto en la planta solar como en el trabajo, porque las ideas que teníamos de cómo hacer los experimentos resultaron muy valiosas, y como suele decir: lento pero seguro.

Al M.I. Esteban Barrios Bonilla porque gracias a las bases con las que me educó cuatro años en diferentes materias, se realizó esta tesis y como amigo ha sido muy valioso debido a todas las pláticas que hemos tenido.

Al M.I. Julio Cesar Morales Mejía por ser un compañero en el Instituto de Ingeniería y su cooperación en la revisión del presente trabajo.

Al M.I. Felipe Muñoz Gutiérrez por la revisión del presente trabajo.

A Ceferino Figueroa Hernández por su amistad y ayuda en la fase de las pruebas.

A Pedro Demian Muñoz Villegas al igual le agradezco su amistad y colaboración en toda la fase de las pruebas realizadas.

Al PAPPIT con el número de proyecto 01109 (Desintoxicación solar de aguas contaminadas a gran escala en la planta solar mediante el uso de sonogeles), por la aportación económica en todo el proyecto.

A Eunice Fabiola García Velasco porque es mi compañera desde hace más de cuatro años y hemos pasado momentos malos y buenos, pero en si estamos juntos y como decía Aldous Huxley: recoge hasta que el tiempo y los tiempos acaben con las doradas manzanas del sol las plateadas manzanas de la luna...

A mi abuelo Agustín Ascencio Alonso porque gracias a la educación que le dio a mi padre, espero aportar algo bueno a la sociedad.

En memoria de mi abuela Maurilia Rivera Mayora[†] por que la había invitado desde hace mucho cuando decía que iba acabar y ella estaba esperando el día que dijera que iba a ser mi examen y conocer Ciudad Universitaria, solo me queda agradecer por todo el apoyo que me brindo.

En memoria de mi abuela y abuelo María Martínez Girón[†] y José San Pedro Bautista[†] porque gracias a ellos estoy vivo.

A mis tías Esperanza y Rita por todo lo que hemos vividos juntos desde que tengo recuerdos de la niñez y hasta este tiempo gracias por su confianza y su apoyo.

| | |
|---|-----------|
| Lista de figuras y tablas | iii |
| Nomenclatura | vii |
| Resumen | ix |
| Objetivos y alcances..... | xi |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1 CONTAMINACIÓN EN EL AGUA Y SUS SOLUCIONES | 4 |
| 1.1 Tratamiento de aguas residuales | 4 |
| 1.2 Panorama del agua en el mundo | 5 |
| 1.3 Panorama del agua en México..... | 6 |
| 1.4 Métodos empleados para desinfección de aguas | 9 |
| 1.5 Descontaminación y desintoxicación de agua con energía solar | 11 |
| 2 DESARROLLO TEÓRICO | 15 |
| 2.1. Accesorios en tuberías..... | 15 |
| 2.2 Flujos..... | 16 |
| 2.2.1 Flujo laminar | 16 |
| 2.2.2 Flujo turbulento | 17 |
| 2.2.3 Formas experimentales para determinar el tipo de régimen | 18 |
| 2.3 Número de Reynolds y factor de fricción..... | 20 |
| 3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO | 24 |
| 3.1 Los Concentradores parabólicos compuestos..... | 24 |
| 3.2 Diseño geométrico de los CPC | 25 |
| 3.3 Dispositivo experimental | 34 |
| 3.4 Adquisición de datos | 44 |
| 3.5 Prueba de longitud equivalente para tubo de vidrio tipo boro-silicato de 10 [mm] de diámetro con esferas de 6 [mm] de diámetro..... | 54 |

| | |
|---|-----------|
| 3.6 Prueba de longitud equivalente para el tubo de vidrio tipo boro-silicato de 25.4 [mm] de diámetro con esferas de 10 [mm] de diámetro | 57 |
| 4 RESULTADOS | 60 |
| 4.1 Longitud equivalente de la curva en U de vidrio tipo boro-silicato de 10 [mm] de diámetro y esferas de 6 [mm] de diámetro..... | 60 |
| 4.1.1 Comportamiento en una sola gráfica | 63 |
| 4.2 Longitud equivalente de la curva en U de vidrio tipo boro-silicato y de plástico ambas de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm] de diámetro..... | 64 |
| 4.2.1. Comportamiento en una sola gráfica | 67 |
| 4.3 Número de Reynolds y factor de fricción..... | 68 |
| 4.3.1 Tubería de 10 [mm] de diámetro y esferas de 6 [mm] de diámetro..... | 69 |
| 4.3.2 Tubería de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm] de diámetro..... | 76 |
| 4.3.3 Comportamiento en una sola gráfica | 80 |
| 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 82 |
| 5.1 Conclusiones..... | 82 |
| 5.2 Recomendaciones..... | 84 |
| Referencias..... | 85 |
| ANEXO. Pantallas de la geometría del CPC en Maple | 88 |

Lista de figuras y tablas

| | |
|---|----|
| Fig.1.0. Mapa de radiación promedio mundial..... | 2 |
| Fig.2.0. Ejemplo de flujo laminar. | 17 |
| Fig.2.1. Ejemplo de flujo turbulento. | 18 |
| Fig.2.2. Líneas de traza en un flujo laminar..... | 18 |
| Fig.2.3. Líneas de traza en un flujo con zona de transición..... | 19 |
| Fig.2.4. Líneas de traza para un flujo en régimen turbulento..... | 19 |
| Fig.2.5. Porosidad (X), coeficiente correctivo del número de Reynolds (F_{Re}) y esfericidad (ψ). | 21 |
| Fig.2.6. Porosidad (X), coeficiente correctivo del coeficiente de frotamiento (F_f) y esfericidad (ψ). | 23 |
| Fig.3.0. Parámetros importantes para el diseño geométrico de un CPC..... | 25 |
| Fig.3.1. Involuta generada en Maple. | 26 |
| Fig.3.2. Parábola con eje focal en el eje “y”..... | 27 |
| Fig.3.3. Elementos geométricos que constituye un CPC..... | 31 |
| Fig.3.4. Parámetros para obtener el factor de concentración en un CPC. | 32 |
| Fig.3.5. Corte transversal de un CPC con $C=1$ | 34 |
| Fig.3.6. Bomba de agua utilizada. | 37 |
| Fig.3.7. Variador de velocidad marca SIEMENS..... | 38 |
| Fig.3.8. Medidor de flujo. | 40 |
| Fig.3.9. Transductor de presión..... | 41 |
| Fig.3.10. Tarjeta de adquisición de datos..... | 42 |
| Fig.3.11. Tinaco..... | 43 |
| Fig.3.12. Sistema para el proceso de fotocatalisis. | 44 |
| Fig.3.13. Pantalla de inicio del programa. | 45 |

| | |
|--|----|
| Fig.3.14. Opciones de configuración. | 46 |
| Fig.3.15. Pestaña de opciones de adquisición. | 47 |
| Fig.3.16. Pestaña de procesamiento de presión y Reynolds..... | 47 |
| Fig.3.17. Pantalla de ingreso de datos. | 48 |
| Fig.3.18. Pantalla tipo de muestras y amplitud. | 48 |
| Fig.3.19. Pantalla tipo de muestras y flujo. | 49 |
| Fig.3.20. Pantalla que muestra fecha, hora y flujo..... | 49 |
| Fig.3.21. Pantalla que muestra el flujo. | 50 |
| Fig.3.22. Pantalla tipo del número de Reynolds y flujo. | 50 |
| Fig.3.23. Gráfica que muestra el número de Reynolds y el flujo de las muestras. | 51 |
| Fig.3.24. Presión de entrada, salida y diferencial de presiones..... | 52 |
| Fig.3.25. Factor de fricción y diferencial de presión. | 52 |
| Fig.3.26. Pantalla tipo del diferencial de presión y factor de fricción. | 53 |
| Fig.3.27. Número de Reynolds y factor de fricción. | 53 |
| Fig.3.28. Pantalla tipo de Reynolds y factor de fricción. | 54 |
| Fig.3.29. Curva en U de vidrio tipo boro-silicato. | 56 |
| Fig.3.30. Tubo lineal de vidrio tipo boro-silicato..... | 56 |
| Fig.3.31. Curva en U de vidrio tipo boro-silicato de 25.4 [mm] de diámetro. | 58 |
| Fig.3.32. Curva en U de plástico. | 58 |
| Fig.3.33. Tubo lineal de 185 [mm] y 70 esferas..... | 59 |
| Fig.4.0. Flujo y diferencial de presión para la curva en U. | 61 |
| Fig.4.1. Flujo y diferencial de presión para el tubo de 100 [mm] con 19 esferas. | 61 |
| Fig.4.2. Flujo y diferencial de presión para el tubo de 200 [mm] con 40 esferas. | 62 |
| Fig.4.3. Flujo y diferencial de presión para el tubo de 300 [mm] con 59 esferas. | 62 |
| Fig.4.4. Flujo y diferencial de presión para las diferentes pruebas de longitud equivalente. ... | 63 |
| Fig.4.5. Flujo y diferencial de presión para la curva en U de vidrio tipo boro-silicato. | 64 |

| | |
|--|----|
| Fig.4.6. Flujo y diferencial de presión para la curva en U de plástico..... | 65 |
| Fig.4.7. Flujo y diferencial de presión para el del tubo de 93 [mm] de longitud con 30 esferas. | 66 |
| Fig.4.8. Flujo y diferencial de presión para el tubo 185 [mm] de longitud con 70 esferas. | 66 |
| Fig.4.9. Flujo y diferencial de presión para el del tubo de 370 [mm] de longitud con 130 esferas..... | 67 |
| Fig.4.10. Flujo y diferencial de presión para las diferentes configuraciones..... | 68 |
| Fig.4.11. CPC con tubería de vidrio tipo boro-silicato..... | 70 |
| Fig.4.12. Gráfica con líneas rectas que muestran la porosidad en intersección con la esfericidad y valor del coeficiente correctivo del coeficiente de frotamiento para el tubo de 10 [mm] y esferas de 6 [mm]. | 73 |
| Fig.4.13. Gráfica con líneas rectas que muestran la porosidad en intersección con la esfericidad y valor del coeficiente correctivo del número de Reynolds, para el tubo de 10 [mm] y esferas de 6 [mm]. | 74 |
| Fig.4.14. Gráfica del flujo y diferencial de presión para el CPC con tubería de 10 [mm] de diámetro y esferas de 6 [mm]. | 75 |
| Fig.4.15. Gráfica del número de Reynolds y factor de fricción para el CPC con tubería de 10 [mm] de diámetro y esferas de 6 [mm]. | 76 |
| Fig.4.16. CPC con tubos de vidrio tipo boro-silicato de 25.4 [mm] de diámetro, esferas de 10 [mm] de diámetro y curvas de plástico. | 78 |
| Fig.4.17. Gráfica de flujo y diferencial de presión para el tubo de 25.4 [mm] y esferas de 10 [mm] de diámetro..... | 79 |
| Fig.4.18. Gráfica de Reynolds y factor de fricción para el tubo de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm] de diámetro. | 80 |
| Fig.4.19. Gráfica de Reynolds y factor de fricción. | 81 |
| Tabla 1.0. Plantas potabilizadoras en México. | 7 |
| Tabla 2.0. Accesorios más comunes empleados en tuberías..... | 15 |
| Tabla 3.0. Diámetro de la tubería y factor de concentración. | 35 |

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1. Parámetros con símbolos y unidades empleadas. | 35 |
| Tabla 3.2. Parámetros que se obtienen de tablas con símbolos y unidades. | 36 |
| Tabla 3.3. Algunas características y valores de la bomba. | 36 |
| Tabla 3.4. Algunas características y valores del variador de velocidad. | 38 |
| Tabla 3.5. Características y valores del medidor de flujo. | 39 |
| Tabla 3.6. Características y valores del transductor de presión. | 40 |
| Tabla 3.7. Características principales de la tarjeta de adquisición de datos. | 42 |
| Tabla 3.8. Longitud de la tubería y esferas. | 55 |
| Tabla 3.9. Longitud de la tubería y esferas para las diferentes pruebas de longitud equivalente. | 57 |
| Tabla 4.0. Datos que se utilizan en el programa de adquisición de datos. | 69 |
| Tabla 4.1. Datos que se utilizan en el programa de adquisición de datos, los cuales se deben de conocer antes de iniciar el procesamiento para el tubo de 25.4 [mm] y esferas de 10 [mm]. | 77 |
| Tabla 4.2. Parámetros para la prueba con el tubo de 25.4 [mm]. | 79 |

Nomenclatura

| | |
|---------------|---|
| a | Apertura del concentrador [m] |
| A_e | Área superficial esfera [m ²] |
| C | Factor de concentración [Adimensional] |
| d | Diámetro del cilindro [m] |
| D_p | Diámetro de la partícula [m] |
| D_e | Diámetro de las esferas [m] |
| F_f | Coefficiente correctivo del coeficiente de frotamiento [Adimensional] |
| F_{Re} | Coefficiente correctivo del número de Reynolds [Adimensional] |
| g | Gravedad [m/s ²] |
| L | Longitud de la tubería [m] |
| L_{totalT} | Longitud total de la tubería [m] |
| N_{ele} | Número de esferas en la longitud equivalente [Adimensional] |
| N_{etubo} | Número de esferas en el tubo [Adimensional] |
| N_{tubos} | Número de tubos [Adimensional] |
| N_{Te} | Número total de esferas [Adimensional] |
| $N_{tubosle}$ | Número de tubos en la longitud equivalente [Adimensional] |
| v | Velocidad [m/s] |
| V_{Tt} | Volumen total de la tubería [m ³] |

V_{T_e} Volumen total de esferas [m^3]

X Porosidad [Adimensional]

Letras griegas

$(-\Delta P)_f$ Pérdida de presión [Pa]

μ Viscosidad dinámica [Ns/m^2]

Π Número Pi [Adimensional]

ψ Esfericidad [Adimensional]

ρ Densidad [kg/m^3]

Resumen

En el presente trabajo se realizó el análisis de flujo y presión para obtener el factor de fricción y el número de Reynolds en un Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) con esferas y tubos de vidrio tipo boro-silicato para fotocatalisis, utilizando agua como fluido de trabajo. Se montaron dos configuraciones diferentes las cuales dependen del diámetro de la tubería de vidrio tipo Boro-Silicato y del diámetro de las esferas.

La primera configuración consistió en la tubería de vidrio tipo boro-silicato de 10 [mm] de diámetro, con esferas en su interior de 6 [mm] de diámetro, la segunda configuración fue con la tubería de vidrio tipo boro-silicato de 25.4 [mm] y esferas de 10 [mm] de diámetro.

En la primera parte de este experimento se obtuvo la longitud equivalente debido a que dentro del sistema CPC existían curvas en U de vidrio tipo boro-silicato y en otra configuración se sustituyeron por codos de plástico ambos llenos de esferas, se midió la presión y el flujo que pasaba por dichos codos con esferas, posteriormente se hizo lo mismo para tramos de tubería recta

El primer experimento de longitud equivalente, se realizó con la configuración del codo de vidrio tipo boro-silicato de 10 [mm] de diámetro con 40 esferas en su interior de 6 [mm] de diámetro, como resultado se obtuvo que tiene un comportamiento similar a un tubo lineal de vidrio tipo boro-silicato del mismo diámetro, con una longitud de 200 [mm] y 39 esferas de 6 [mm] de diámetro.

El segundo experimento de longitud equivalente se realizó con la configuración del codo de vidrio tipo boro-silicato de 25.4 [mm] de diámetro con 66 esferas en su interior de 10 [mm] de diámetro, se observó que su comportamiento se encuentra, entre el comportamiento del tubo de 185 [mm] con 70 esferas y el tubo de 93 [mm] con 30 esferas, ambos de vidrio tipo boro-silicato.

El tercer experimento de longitud equivalente se realizó con un codo de plástico de 25.4 [mm] de diámetro con 60 esferas en su interior de 10 [mm] de diámetro, como resultado se obtuvo que tiene un comportamiento similar a un tubo lineal del mismo diámetro de vidrio tipo boro-silicato con una longitud de 93 [mm] y 30 esferas.

Por último se obtuvo el factor de fricción y el número de Reynolds para el CPC, con el tubo de vidrio tipo boro-silicato de 10 [mm] de diámetro y esferas en su interior de 6 [mm] de diámetro y con la tubería de vidrio tipo boro-silicato de 25.4 [mm] y esferas en su interior de 10 [mm] de diámetro.

Objetivos y alcances

Objetivo general

El objetivo básico del proyecto fue determinar el número de Reynolds y el factor de fricción en un CPC con tubos de vidrio tipo boro-silicato y esferas del mismo material para fotocatalisis, con dos configuraciones diferentes, la primera con tubo de vidrio tipo boro-silicato de 10 [mm] de diámetro y esferas en su interior de 6 [mm] de diámetro, la segunda con tubería de vidrio tipo boro-silicato de 25.4 [mm] y esferas de 10 [mm] de diámetro.

Objetivos específicos

El proyecto se enfocó en lo siguiente:

Acoplar el CPC a la tubería de vidrio boro-silicato.

Determinar la longitud equivalente para las curvas en U de vidrio tipo boro-silicato y curva en U de plástico, todas con esferas de vidrio en su interior.

Alcances

En la literatura no se ha encontrado ninguna propuesta de análisis de flujo en un CPC con esferas. En este proyecto se propuso analizar el factor de fricción y número de Reynolds, para dos configuraciones diferentes de tubería de vidrio tipo boro-silicato.

En particular se pretende alcanzar las siguientes metas específicas:

- Obtener dos configuraciones del CPC, las cuales dependen del diámetro de la tubería y de las esferas.

- Determinar la longitud equivalente para las curvas en U de vidrio tipo boro-silicato y de plástico.
- Obtener la gráfica del número de Reynolds y factor de fricción para dos configuraciones diferentes de tubería de vidrio tipo boro-silicato.

INTRODUCCIÓN

Los fluidos han estado presentes en nuestro entorno desde los inicios de la formación de la Tierra; todos los seres vivos habitantes de este planeta estamos inmersos en ellos y los utilizamos de manera inconsciente en actividades que son vitales para nuestra existencia, como respirar. Con el desarrollo de tecnología se comenzaron a utilizar de una forma racional y se comenzaron a explotar.

Debida la gran importancia que tienen los fluidos en esta tesis se estudiará el comportamiento de un fluido en específico, el agua. Se analizará el comportamiento de este fluido dentro de tubos de vidrio tipo boro-silicato, los cuales en su interior tendrán unas esferas de vidrio; las esferas posteriormente servirán para hacer una reacción fotocatalítica, con dióxido de titanio como catalizador y los rayos ultravioleta del Sol. Aunque no se estudiará todo lo que se refiere a la fotocatalisis, el estudio de la misma será de gran apoyo para este experimento. Por ello es necesario destacar la importancia que tendrán la relevancia del Sol y la radiación.

La radiación solar es un elemento absolutamente indispensable para la existencia de la vida sobre la tierra, es el resultado continuo de fusión nuclear que tiene lugar en el Sol. Debido a la importancia que tiene como recurso energético, se puede decir que hoy día es prácticamente conocida en todo el mundo, los mapas de la radiación se pueden encontrar en diversos lugares, así como también por medio de Internet como se muestra en la fig.1.0 [1], en donde la zona morada y azul tiene una radiación menor la cual tiene un valor de 0 hasta 150 [W/m²], la zona verde y amarillo tiene una radiación de 150 hasta 250 [W/m²], mientras que la zona naranja y rojo alcanza una radiación de 250 hasta 350 [W/m²].

La fuente de la radiación es el Sol, una estrella enana poco evolucionada, con una edad de unos 5,000 millones de años y que puede ser tratada como una estrella de materia gaseosa. Su diámetro es de 1.39×10^6 [km], su masa es de 1.99×10^{30} [kg] y se encuentra a una distancia media de la Tierra, a unos 1.5×10^8 [km]. En cuanto a su composición química el hidrógeno constituye el 74% de su masa, el Helio el 25% y el 1% restante está formado por una pequeña cantidad de elementos pesados como el hierro, silicio, neón y carbono. [2]

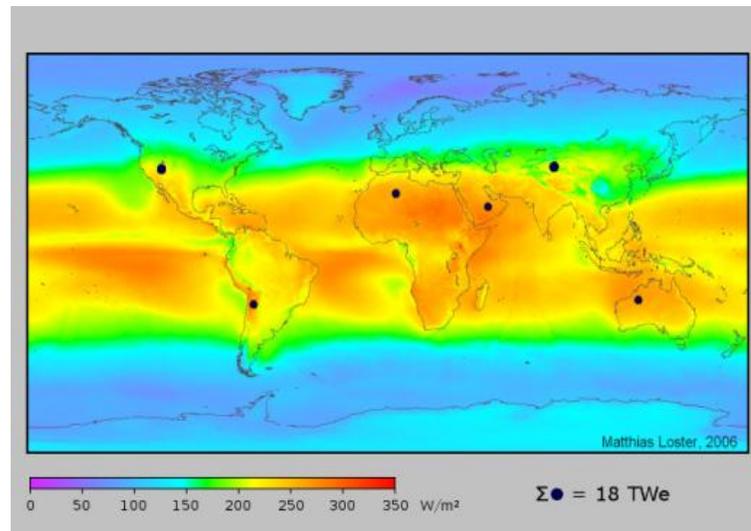


Fig.1.0. Mapa de radiación promedio mundial.

Para aprovechar esta energía se disponen de varias tecnologías, por ejemplo los CPC (Concentradores Parabólicos Compuestos). Estos son ampliamente utilizados, son una combinación interesante entre concentradores parabólicos y sistemas planos estáticos que constituyen una buena opción para aplicaciones de fotoquímica solar. [3]

Los CPC son colectores estáticos con una superficie reflejante que sigue una involuta alrededor de un reactor cilíndrico.

Los CPC surgieron en los años 70 [4] para conseguir concentración solar mediante dispositivos estáticos [5], ya que consiguen concentrar sobre el receptor toda aquella radiación que llega dentro del denominado “ángulo de aceptación” del colector. Estos dispositivos concentradores han demostrado poseer una de las mejores ópticas para sistemas de baja concentración.

La presente tesis surgió a partir del proyecto del PAPIIT¹ 01109 (Desintoxicación solar de aguas contaminadas a gran escala en la planta solar mediante el uso de sonogeles), por lo

¹ Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica

cual se decidió que para un mejor estudio de esta desintoxicación, se analizara primeramente el flujo y la presión en el CPC, con la finalidad obtener diferentes valores de flujos y presiones con los que puede trabajar y por medio de estos, conocer el factor de fricción y el número de Reynolds

La presente tesis consta de 5 capítulos, en los cuales el primero habla de los contaminantes en el agua y sus soluciones, presentando un panorama en México, en el mundo, métodos empleados para la desinfección de aguas, descontaminación y desintoxicación con energía solar.

El segundo capítulo aborda el desarrollo teórico donde se habla brevemente del flujo en tuberías, los diferentes tipos de flujos, las formas experimentales para determinar el tipo de flujo, ecuaciones empleadas para flujos en lechos porosos y las gráficas del coeficiente correctivo del número de Reynolds y el coeficiente correctivo del factor de fricción.

El tercer capítulo habla de los CPC, las ecuaciones para la obtención de estos con su geometría, dispositivo experimental, programa de adquisición de datos y las pruebas de longitud equivalente para la configuración de tubería de 10 [mm] de diámetro y esferas de 6 [mm] de diámetro así como de la tubería de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm] de diámetro.

En el cuarto capítulo se abordan los resultados de la prueba de longitud equivalente para la tubería de 10 [mm] de diámetro con esferas de 6 [mm] de diámetro así como de la tubería de 25.4 [mm] de diámetro con esferas de 10 [mm] de diámetro, por último se presenta el factor de fricción y número de Reynolds para las dos configuraciones mencionadas anteriormente.

En el quinto capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo presentado.

1 CONTAMINACIÓN EN EL AGUA Y SUS SOLUCIONES

En este capítulo se presentan los tipos de tratamiento de aguas residuales. Un análisis del agua en el mundo y en México, así mismo se presentan algunos métodos de desinfección, descontaminación y desintoxicación de agua por medio de diferentes procesos, incluyendo el de la energía solar.

1.1 Tratamiento de aguas residuales

Los tratamientos de aguas residuales son muy importantes, debido a que varios desechos que se producen en la industria y hogares son vertidos a ríos, lo que afecta considerablemente al ser humano.

Existen tres tipos de tratamiento de aguas residuales [6], lo cuales son: primarios, secundarios y terciarios. Estos tipos de tratamientos sirven para obtener una mejor calidad del agua.

Los tratamientos primarios o pretratamientos implican la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga bien en los receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una neutralización u homogenización. Los métodos más empleados en este tipo de tratamiento son: el cribado, la sedimentación, la flotación y la neutralización y homogenización.

Los tratamientos secundarios se refieren a todos los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales tanto industriales como urbanas. El método más empleado en este tipo de tratamiento es el de lodos activados, del cual existen algunas modificaciones, estas son: aireación prolongada, contacto estabilización, aireación escalonada, procesos de lodos activos por mezcla completa y aireación con oxígeno puro. Así mismo existen otros procesos

los cuales ya no dependen de los lodos activados, estos son: lagunas aireadas, balsas de estabilización, filtros precoladores y biodiscos.

El tratamiento terciario es la serie de procesos destinados a conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario, existen diferentes procesos los cuales son: separación de sólidos en suspensión, adsorción en carbón activo, intercambio iónico, osmosis inversa, electrodiálisis, oxidación química y métodos de eliminación de nutrientes, entre otros.

1.2 Panorama del agua en el mundo

El agua es el elemento más abundante en la Tierra, desgraciadamente del 70 % con el que está cubierto el mundo, sólo el 2.5 % total es agua dulce, mientras que el restante 97.5 % es agua salada. De ese porcentaje de agua dulce todavía se sabe que el 70 % está congelada en los casquetes polares y del resto se presenta como humedad del suelo o se encuentra en lo profundo de acuíferos inaccesibles. Por lo que menos del 1 % de los recursos del agua dulce está al alcance del consumo humano.

Esto es de vasta importancia y se trata en la cumbre de las Naciones Unidas cada año para dar a conocer cifras que pueden llevar a conflictos entre naciones por agua, aparte de este panorama y del mal uso que se le da para consumo humano en casi todos los países, tanto que se prevé que para el año 2025 posiblemente dos tercios de la población del mundo vivan en países en donde la escasez del agua sea entre moderada y grave.

Al ritmo actual se piensa que no habrá acceso al agua potable en África antes del 2050, en Asia antes del 2025, y en América Latina y el Caribe antes del 2040. En estas tres regiones es donde vive el 82.5 % de la población mundial, según cifras de la ONU en la cumbre de Johannesburgo 2002 [7].

Otro problema que tiene la humanidad es que el desarrollo industrial, representa un gran problema en la contaminación del agua y afecta más a los países en desarrollo, según cifras de la misma cumbre antes mencionada, reportan que entre el 90% y 95 % de las aguas

residuales y el 70 % de los desechos industriales se vierten sin tratar y contaminan las reservas utilizables del agua.

Aunque hoy en día existen diversas formas de ahorro de agua en todo el mundo, tales como sanitarios con cajas más pequeñas, regaderas que ahorran agua o sistemas de casas ecológicas, en la cumbre mencionada anteriormente se propuso que se necesitaba una inversión de hasta 180 000 millones de dólares USA, para la compra de estos tipos de sistemas.

Este panorama mundial es relevante, tal y como se observan las cifras, por eso se deben proponer alternativas que sean ecológicas para poder tratar las aguas contaminadas por un lado y la conciencia por cada persona en las formas de ahorrar ésta en el mundo.

1.3 Panorama del agua en México

En México el panorama del agua es demasiado preocupante, según cifras de CONAGUA [8], el país tiene una disponibilidad natural media de agua de 474 mil 637 hm³ al año, por lo cual está catalogado en disponibilidad baja de este líquido. La disponibilidad de esta depende principalmente del ciclo hidrológico; aunque el hombre ha alterado dicho ciclo para satisfacer diversas necesidades, principalmente las tres fundamentales, que son: uso doméstico, agropecuario e industrial. En nuestro país las actividades agropecuarias consumen aproximadamente el 76 % del agua dulce.

En el 2004, según cifras del INEGI, la extracción bruta de agua ascendió a 75 mil 430 hm³ de la cual el 64% fue de origen superficial y el 36 % de origen subterráneo.

Las formas de potabilización y tratamiento de agua es muy importante dado el déficit que se tiene registrado en el país, en la tabla 1.0 se muestran las plantas potabilizadoras que se encuentran en nuestra nación, datos CONAGUA, Subdirección de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, 2008.[9]

| Entidad Federativa | Número de plantas en operación | Capacidad instalada [m ³ /s] | Caudal potabilizado [m ³ /s] |
|-------------------------|--------------------------------|---|---|
| 1. Aguascalientes | 3 | 0.04 | 0.03 |
| 2. Baja California | 26 | 10.7 | 5.31 |
| 3. Baja California Sur | 15 | 0.22 | 0.22 |
| 4. Campeche | 2 | 0.03 | 0.02 |
| 5. Coahuila de Zaragoza | 18 | 2.13 | 1.71 |
| 6. Colima | 33 | 0.01 | 0 |
| 7. Chiapas | 4 | 4.5 | 2.51 |
| 8. Chihuahua | 4 | 0.65 | 0.38 |
| 9. Distrito Federal | 36 | 4.62 | 3.64 |
| 10. Durango | 30 | 0.03 | 0.02 |
| 11. Guanajuato | 27 | 0.37 | 0.31 |
| 12. Guerrero | 11 | 3.28 | 2.97 |
| 13. Hidalgo | 2 | 0.13 | 0.13 |
| 14. Jalisco | 24 | 16.2 | 9.49 |
| 15. México | 11 | 22.16 | 16.74 |
| 16. Michoacán de Ocampo | 6 | 2.95 | 2.5 |
| 17. Morelos | 0 | 0 | 0 |
| 18. Nayarit | 0 | 0 | 0 |
| 19. Nuevo León | 8 | 14.4 | 7.09 |
| 20. Oaxaca | 6 | 1.29 | 0.77 |
| 21. Puebla | 4 | 0.72 | 0.55 |
| 22. Querétaro | 6 | 0.27 | 0.21 |
| 23. Quintana Roo | 0 | 0 | 0 |
| 24. San Luis Potosí | 14 | 1.31 | 0.96 |
| 25. Sinaloa | 142 | 9.07 | 7.22 |
| 26. Sonora | 24 | 4.13 | 2.01 |

Tabla 1.0. Plantas potabilizadoras en México.

| | | | |
|------------------------------------|-----|--------|-------|
| 27.Tabasco | 37 | 10.41 | 6.6 |
| 28.Tamaulipas | 54 | 14.35 | 11.44 |
| 29.Tlaxcala | 0 | 0 | 0 |
| 30.Veracruz de Ignacio de la Llave | 13 | 6.91 | 4.39 |
| 31.Yucatán | 0 | 0 | 0 |
| 32.Zacatecas | 44 | 0.007 | 0.007 |
| Nacional | 604 | 130.88 | 87.31 |

Tabla 1.0. (Continuación).

Como se observa en la tabla anterior solo contempla la potabilización más importante que hay en el país. Los métodos de potabilización que utilizan estas plantas son: clarificación convencional, clarificación de patente, membrana, filtración directa y remoción de fierro y magnesio.

En la fig. 1.1 [10] se muestra en porcentaje algunos de los principales métodos de tratamiento de aguas residuales municipales en el país, en donde el caudal total anual en el 2008 fue de 83.6 [m³/s]; CONAGUA, 2010.

En cuanto al agua utilizada en la industria, se sabe que ésta genera mayores descargas que el agua desechada por el uso doméstico, en general, el volumen de descarga de uso doméstico es de 205 m³/s y por la industria es de 258 m³/s, datos del año 2003 por el INEGI, el tratamiento que se da al agua es de vital importancia para los desechos industriales porque en lo general éstos los vierten en ríos, mientras que el agua de uso doméstico pasa por alcantarillados antes y se le puede dar un mayor tratamiento. En México sólo el 20 % de agua recibe algún método de tratamiento y esto tiene como consecuencia que el 80 % del agua que no es tratada es vertida directamente a ríos, lagos o lagunas y zonas costeras

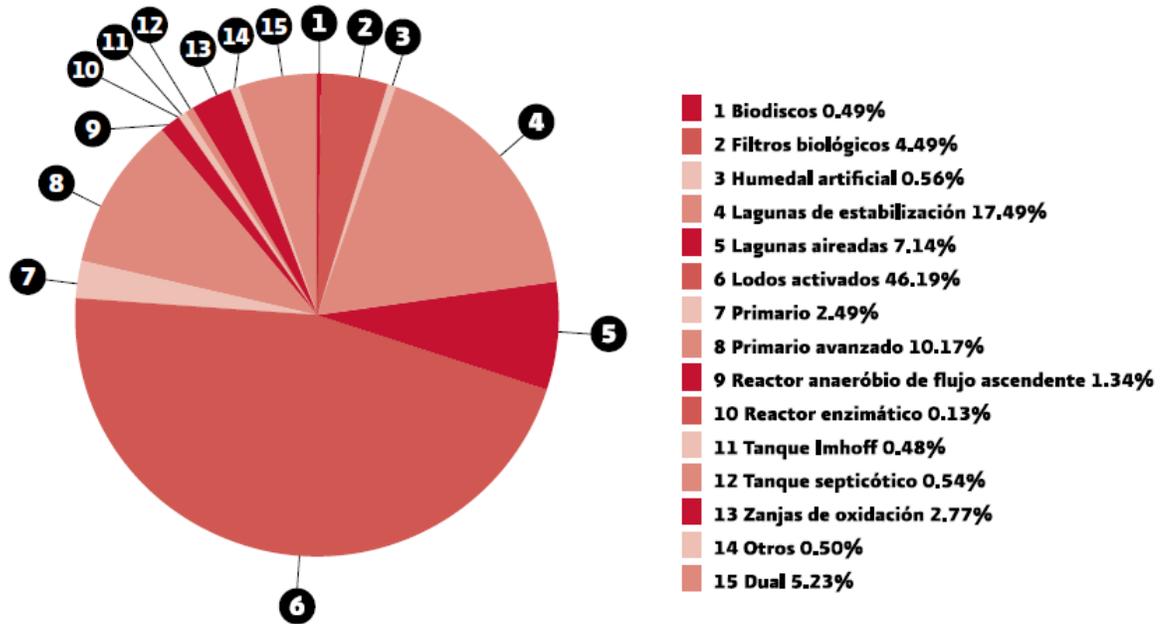


Fig.1.1. Distribución porcentual de agua residual municipal tratada.

1.4 Métodos empleados para desinfección de aguas

Existen diferentes métodos para desinfectar el agua, no todos tienen un mismo objetivo y cada uno de estos eliminan diferentes microorganismos, los más ocupados con sus características generales son:

Hervir el agua: Este método es uno de los más seguros para desinfectar agua, logra matar todos los microorganismos presentes en ella. Consiste en que una vez lograda la temperatura de saturación (temperatura a la cual se presenta el cambio de fase de líquido a vapor), se debe de dejar un minuto más para garantizar que no hay microorganismos presentes. Este método requiere de un gran consumo de energía primeramente para

alcanzar la temperatura de saturación o ebullición y después para dejarla a esta temperatura durante un minuto más, por lo que es relativamente caro y su costo depende de la forma de energía que se esté utilizando, por eso puede ser un método no tanto accesible para la mayoría de la población.

Pasteurización: Este método es uno de los más conocidos y es muy similar al método de hervir el agua, sólo que a temperaturas en un rango de 70 a 75 [°C] y necesita un tiempo de exposición de 10 minutos, por lo que este proceso también requiere de demasiada energía.

Filtración: Existen diversas formas de filtración y cada uno depende de la calidad de agua que se quiera obtener como producto final, la filtración se hace desde filtros caseros (cerámica, capas de arena y grava, etc); los filtros comerciales son un tanto más confiables, sin embargo son relativamente caros, por lo que todos los procesos de filtración tienen una eficiencia limitada y muchos de estos todavía dejan pasar materia sólida por lo que no ayudan de gran manera a una eliminación microbiológica del agua.

Cloración: Es un método muy utilizado para matar microorganismos, sin embargo depende de diversos factores para inactivar parásitos patógenos. Este tratamiento requiere del abastecimiento del cloro en forma líquida o en polvo. Se requiere además de capacitación para llevar a cabo este método. Una de las mayores desventajas de este método es que deja el sabor a cloro por lo que muchas personas pueden tener problemas de rechazo. Puede ser cancerígeno, si se generan compuestos como cloraminas.

Desinfección solar de agua: Es un método utilizado para desinfectar el agua utilizando simplemente radiación solar para destruir bacterias y virus patogénicos presentes en el agua. Este método y su eficiencia depende de la temperatura alcanzada en el agua durante el tiempo de exposición, tiene un costo relativamente bajo para su construcción y operación por lo que lo hace muy accesible.

Ozonólisis: Es un método muy veloz, inclusive es mucho más rápido que el de cloración; éste consiste en matar a la bacteria por medio de la ruptura de la membrana celular, se utiliza para el pre tratamiento de agua para la reducción de metales disueltos y la remoción de materia orgánica, las ventajas de este proceso es que no deja color, olor ni sabor, en cantidades adecuadas para el proceso.

Electrolisis: Este método consiste en exponer al agua a una corriente baja por medio de 2 electrodos, que convierte algunos elementos del agua en partículas oxigenadas y desinfectantes; la ventaja de este método es que no necesita agregarse nada al agua.

1.5 Descontaminación y desintoxicación de agua con energía solar

Se han utilizado diferentes métodos de descontaminación de agua con diferentes prototipos de concentradores solares, para diferentes aplicaciones, cada uno con sus particularidades aunque sean demasiado distintos entre sí, se sustentan en una misma teoría para un mismo propósito. En la referencia [11] se presenta uno de estos métodos, en él se hicieron experimentos en diferentes comunidades de Chihuahua para desinfección de agua, utilizando diferentes prototipos de concentradores. El experimento consiste en 2 concentradores rectangulares con diferentes recubrimientos (espejo y papel aluminio), y un tercero con un concentrador de doble parábola, recubierto de aluminio autoadherible.

El primer experimento consistió en recubrir un concentrador cuadrado con papel aluminio, el concentrador contenía en su interior tres botellas de plástico de 2 [l] cada una con diferente recubrimiento, la primera sin recubrir, la segunda pintada de negro traslucido y la tercera totalmente pintada de negro, como se muestra en la fig.1.2.

El segundo experimento consistió en otro concentrador cuadrado con espejos, el cual tenía en su interior cuatro botellas de plástico de 2 [l] cada una, estas botellas no se recubrieron, como se muestra en la fig.1.3.

El tercer experimento consistió en un concentrador de doble parábola con dos botellas de plástico de 2 [l] cada una sin recubrimiento, como se muestra en la fig. 1.4.

Estos experimentos arrojan como resultado que sólo el 25 % del agua fue desinfectada; este método consiste solamente en calentar el agua dentro de las botellas de plástico, por lo que sería muy parecido al método de hervir el agua.



Fig.1.2. Concentrador cuadrado con 3 envases de plástico.

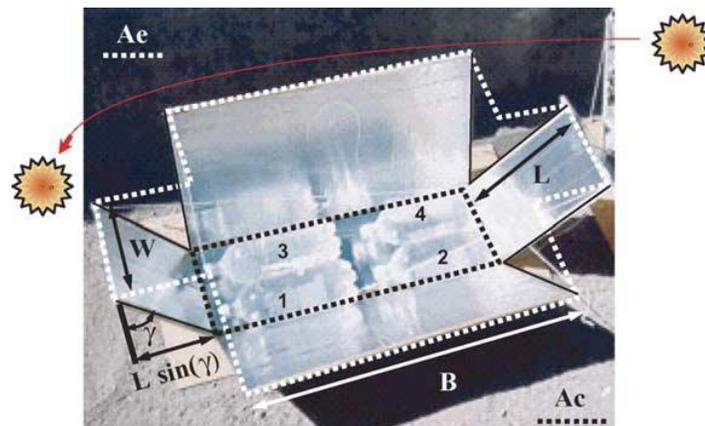


Fig.1.3. Concentrador cuadrado con 4 envases de plástico.

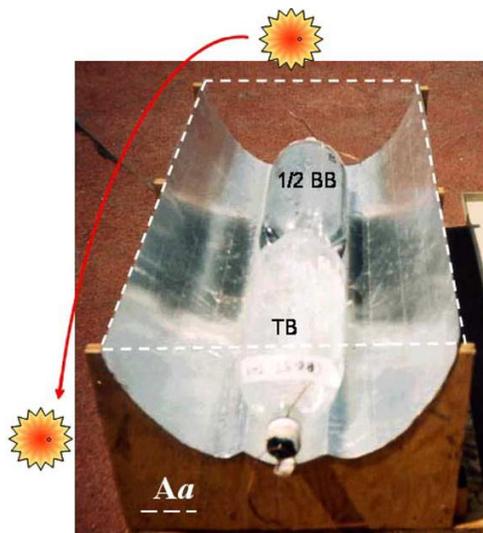


Fig.1.4. Concentrador de doble parábola con 2 envases de plástico.

Otro experimento [12], en el cual se eliminaron diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos, también está basado en el uso de la energía solar pero en este caso al contrario del anterior, en un proceso que se llama fotocatalisis, este proceso se basa en el uso de los huecos de los electrones pares que se producen en un semiconductor por medio de la banda ultravioleta del espectro solar, la cual es capturada por colectores solares. Lo que permite el salto de valencia de los electrones a la banda de conducción. Estos electrones móviles se pueden separar y ser transferidos a la superficie del semiconductor, obteniendo reacciones tipo redox y por medio de estas se pueden oxidar o reducir compuestos contaminantes tales como los orgánicos e inorgánicos. El semiconductor más utilizado es el dióxido de titanio debido a su bajo costo.

En este experimento se utilizaron 12 colectores con dos grados de libertad conectados en serie. La longitud de cada tubo es de 16.3 [m] con un diámetro de 56 [mm]; en este experimento, se obtuvieron como resultado un 98 % de degradación de los contaminantes por lo que el proceso puede ser muy apropiado para degradar compuestos orgánicos tóxicos.

Otro experimento realizado en la planta solar de Almería en España [13], que también es un proceso fotocatalítico al igual que el anterior, se muestra en la fig. 1.4. En este también se

incluye un pequeño análisis del flujo, éstos reportan que en experiencias previas se debe de tener un flujo turbulento, por lo que ellos utilizaron un número de $Re > 4,000$, para tuberías comunes y $Re > 10,000$ para tuberías de pequeño diámetro, por medio de esto se puede conocer el caudal más apropiado para la puesta del experimento. En este experimento se logra hacer una buena fotocatalisis y degradación de contaminantes en el agua.

Los artículos publicados y algunos de los que se han hablado aquí todos concluyen que este proceso fotocatalítico es bastante efectivo para cumplir con la descontaminación de ciertos agentes en el agua.

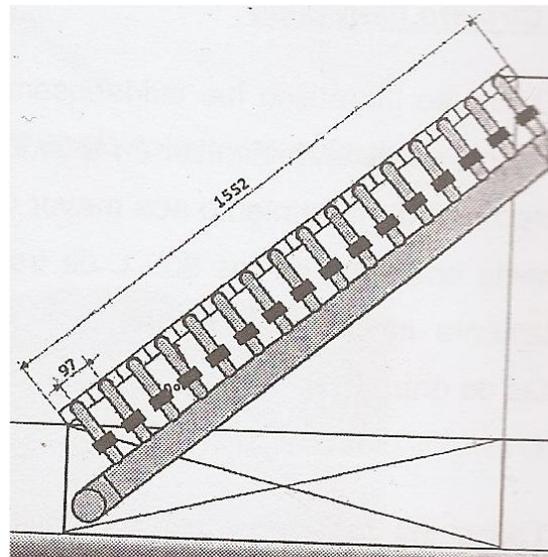


Fig.1.5. Dispositivo experimental en la planta solar de Almería (España).

2 DESARROLLO TEÓRICO

En este capítulo se presenta la base teórica para el experimento, los accesorios que se emplean en tuberías, los tipos de flujos y las formas experimentales para saber cuándo un flujo es laminar, turbulento o se encuentra en la zona de transición. Por último, se presentan las ecuaciones que se utilizan para determinar el número de Reynolds y el factor de fricción en los lechos porosos o empaquetados.

Es de importancia el número de Reynolds y el factor de fricción porque ayudan al proceso de fotocatalisis, con esto se puede saber con cuanta cantidad de flujo el régimen es laminar, turbulento o si se encuentra en la zona de transición y por medio de esto lograr un mejor proceso fotocatalítico.

2.1. Accesorios en tuberías

Los accesorios más comunes empleados en tubería se pueden clasificar en dos ramas muy generales, accesorios de derivación y accesorios de reducción a ampliación, en la tabla 2.0 se muestran estos.

| Accesorios de derivación | Accesorios de reducción o ampliación |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Tés | Curvas |
| Cruces | Codos |
| Codos con salida lateral | Curvas en U |

Tabla. 2.0. Accesorios más comunes empleados en tuberías.

Aunque esta clasificación es muy general, sirve para tener una idea donde se presentan las pérdidas cuando pasan los flujos a través de las tuberías.

Cuando algún fluido se desplaza por un tramo recto de tubería, la velocidad adopta una forma característica. Cualquier obstáculo en la tubería cambia la configuración de flujo y esto ocasiona una turbulencia, las válvulas y accesorios en una línea de tubería producen una pérdida de presión total.

En el libro de Crane [14] habla de la relación L/D , que es la longitud equivalente en tramos de tubería recta que causa la misma pérdida de presión que el obstáculo (válvula o accesorio), en las mismas condiciones de flujo. Donde L es la longitud de la tubería y D es el diámetro de la misma, este concepto es muy importante debido a que se puede sustituir un codo por un tramo de tubería recta para simplificar cálculos en tuberías.

2.2 Flujos

Los flujos dentro de las tuberías se pueden clasificar en flujo laminar o turbulento, esto dependiendo de la velocidad con que se desplace el fluido dentro de ésta, así mismo existe una zona de transición que es cuando el fluido pasa a un régimen en el que su comportamiento no es laminar ni turbulento. Existen formas experimentales para determinar el tipo de flujo así como valores del número de Reynolds en tuberías de acero o PVC, que son las que se tienen en diversos libros.

2.2.1 Flujo laminar

Un flujo laminar es aquél que está asociado con magnitudes de velocidades de flujo pequeñas y las partículas que pasan a través del fluido siguen una misma trayectoria, como se muestra en la fig. 2.0. Un parámetro matemático que sirve para saber si el flujo es laminar es el número de Reynolds, en experimentos en tuberías se ha demostrado que si $Re < 2000$ el flujo es laminar; este número se llama así en honor a Osborne Reynolds, quién hizo

experimentos con flujos para saber su comportamiento de una manera experimental y después relacionó diversas variables del flujo, dichas variables son:

- ρ Densidad del fluido [kg/m^3]
- v Velocidad media del flujo [m/s]
- d Diámetro de la tubería [m]
- μ Viscosidad dinámica del fluido [Ns/m^2]

La ecuación desarrollada por Reynolds es la ecuación (2.0)[15].

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2.0)$$

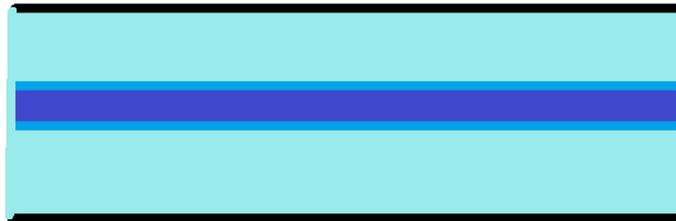


Fig.2.0. Ejemplo de flujo laminar.

2.2.2 Flujo turbulento

El flujo se denomina turbulento cuando hay un movimiento irregular en las partículas del fluido y éstas se mueven en direcciones transversales a la dirección en que se mueve el flujo (dirección principal); como consecuencia de esto existe un gradiente de velocidad más uniforme que en el flujo laminar, aunque debido a las fluctuaciones y la turbulencia generada

se requiere de métodos estadísticos para su estudio en algunos casos, en la fig. 2.1 se muestra un ejemplo de un flujo turbulento.



Fig.2.1. Ejemplo de flujo turbulento.

2.2.3 Formas experimentales para determinar el tipo de régimen

Existen maneras experimentales [16] para saber si un flujo es laminar, algunos de los procedimientos son la utilización de corrientes de tintura, o partículas flotantes o inmersas.

La técnica de corriente de tintura consiste en inyectar tinta en un punto dado en el campo del flujo y observar el rastro que deja la tinta a medida que se desplaza corriente abajo. Este trazo se denomina línea de traza; en una tubería de cristal este experimento puede ser muy fácil de visualizar. Si la descarga o velocidad media es pequeña, las láminas de fluido coloreado se desplazan en líneas rectas como se muestra en la fig. 2.2; a este régimen se le conoce como laminar o régimen viscoso.

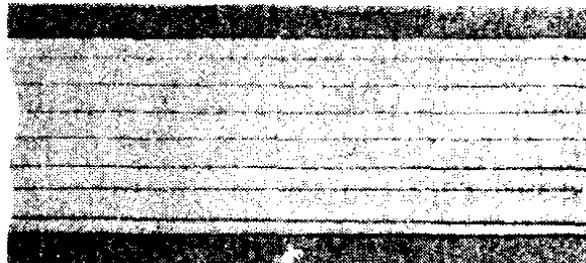


Fig.2.2. Líneas de traza en un flujo laminar.

Si las líneas continúan moviéndose en líneas rectas hasta que alcanzan una velocidad en donde las láminas comienzan a ondularse y se rompen de forma brusca y difusa como se muestra en la fig. 2.3, entonces a este régimen se le llama de transición que es el intermedio entre el régimen laminar y el turbulento.

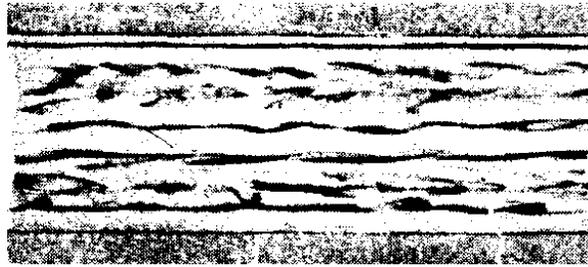


Fig.2.3. Líneas de traza en un flujo con zona de transición.

Por último si las líneas se dispersan de manera indeterminada como en la fig.2.4, a través de toda la corriente se le conoce como régimen turbulento.

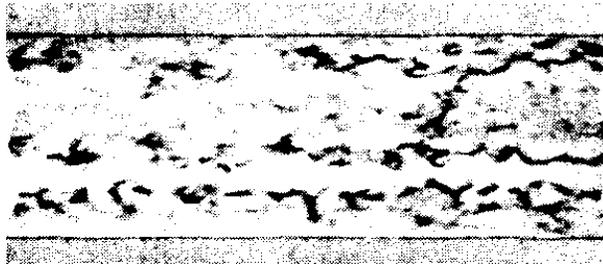


Fig.2.4. Líneas de traza para un flujo en régimen turbulento.

2.3 Número de Reynolds y factor de fricción

Para el presente trabajo es importante determinar el número de Reynolds y el factor de fricción para flujos en lechos porosos. Un lecho poroso [17] se puede describir como un conjunto de partículas en contacto que dejan espacios o huecos por el cual se desplaza el fluido, esto quiere decir que las partículas están estáticas cuando el sistema trabaja en régimen permanente, aunque se permita un ligero desplazamiento de éstas al comienzo del proceso. El número de Reynolds cambia considerablemente, porque ahora no sólo depende, como se dijo antes, del fluido y de la tubería, si no que ahora también depende de las esferas que están dentro de ésta.

Por consiguiente el número de Reynolds puede escribirse como [18]:

$$Re_p = \frac{D_p F_{Re} v \rho}{\mu} \quad (2.1)$$

Dónde:

D_p -Diámetro de las partículas [m]

F_{Re} -Coeficiente correctivo del número de Reynolds [Adimensional]

v - Velocidad superficial [m/s]

ρ -Densidad del fluido [kg/m^3]

μ - Viscosidad fluido [Ns/m^2]

Para la determinación del valor del parámetro F_{Re} existe una gráfica, mostrada en la fig.2.5 [18], de donde se obtiene el valor para diferentes condiciones de porosidad y teniendo como dato la esfericidad.

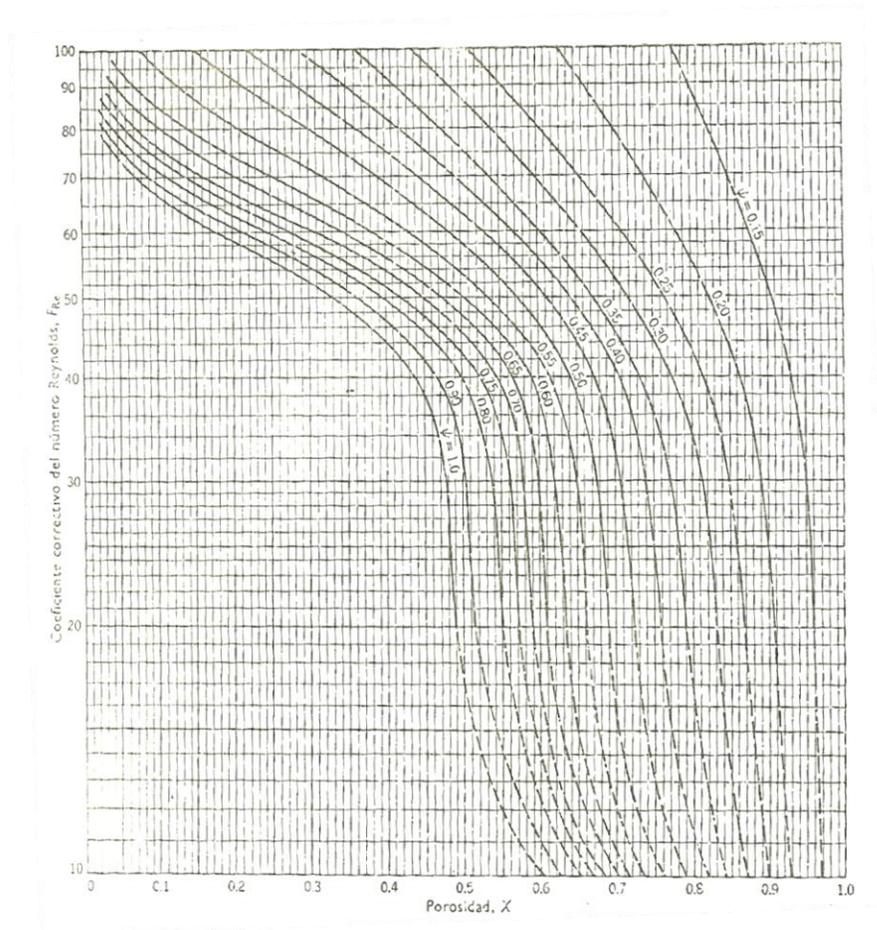


Fig.2.5. Porosidad (X), coeficiente correctivo del número de Reynolds (F_{Re}) y esfericidad (ψ).

Lo que tiene más relevancia en la ecuación (2.1) es la porosidad; ésta se puede describir como la relación entre el volumen hueco existente entre las partículas del lecho y el volumen global del mismo.

La expresión que se emplea para calcular la porosidad se muestra en la ecuación (2.2).

$$\text{Porosidad, } X = \frac{\text{Volumen ocupado por los huecos}}{\text{Volumen total del lecho}} \quad (2.2)$$

Así mismo la ecuación (2.3) es la esfericidad, la cual se define como el área de la superficie de las esferas de volumen igual al de la partícula entre al área de la superficie de la partícula.

$$\text{Esfericidad, } \Psi = \frac{\text{Área de la superficie de las esferas, de volumen igual al de la partícula}}{\text{Área de la superficie de la partícula}} \quad (2.3)$$

El factor de fricción [18] para lechos porosos está definido por la ecuación (2.4).

$$f = \frac{2gD_p(-\Delta P)_f}{F_f L v^2 \rho} \quad (2.4)$$

Dónde:

| | |
|-----------------|---|
| g | Gravedad [m/s ²] |
| D_p | Diámetro de las partículas [m] |
| $(-\Delta P)_f$ | Disminución de la presión debida a las pérdidas por frotamiento [Pa] |
| F_f | Coefficiente correctivo del coeficiente de frotamiento [Adimensional] |
| L | Longitud de la tubería [m] |
| v | Velocidad del fluido como si las esferas no estuvieran [m/s] |
| ρ | Densidad del fluido [kg/m ³] |

En donde el valor del coeficiente correctivo del coeficiente de frotamiento (F_f), se obtiene de la fig.2.6, el cual depende también de la porosidad y la esfericidad.

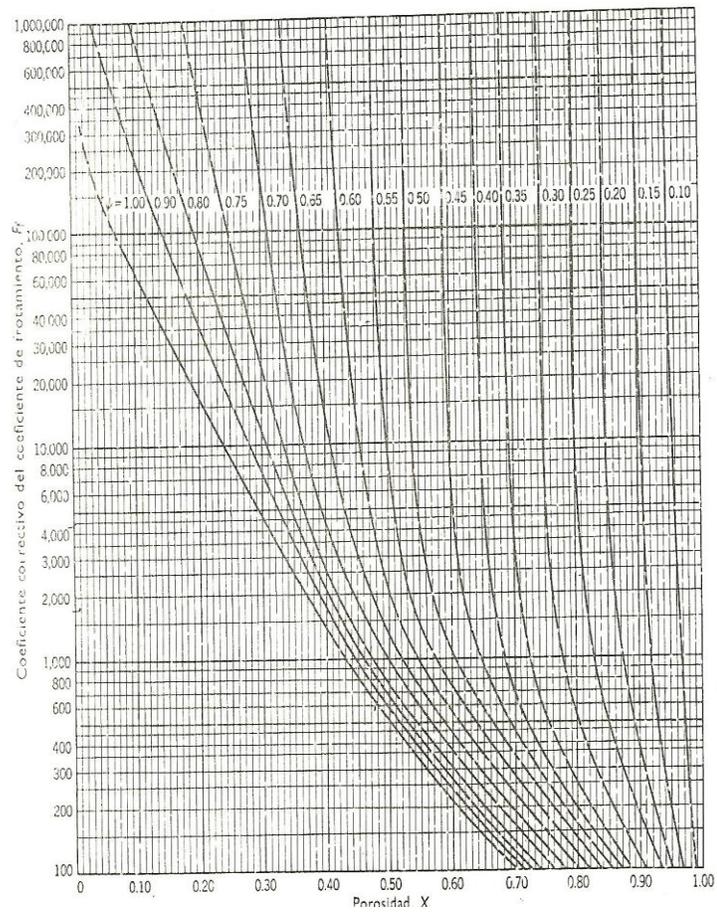


Fig.2.6. Porosidad (X), coeficiente correctivo del coeficiente de frotamiento (F_f) y esfericidad (ψ).

3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

En este capítulo se describen en general los Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC), su historia, su geometría y las ecuaciones para generarlos. También se muestran los diferentes dispositivos utilizados para la realización del experimento y algunos parámetros de éstos.

Así mismo, se describe el programa de adquisición de datos que se utilizó para obtener los resultados de la experimentación, por último se presenta la descripción de la experimentación para obtener la longitud equivalente con esferas y distintas configuraciones.

3.1 Los Concentradores parabólicos compuestos

Desde 1974 se ha trabajado para obtener una óptica no formadora de imagen para la concentración de energía solar. Los primeros CPC que se utilizaron fueron para el calentamiento de agua estos eran efectivos dada su geometría ya que podían captar tanto la **irradiancia directa** como la **irradiancia difusa**, aunque en su mayoría captan más la directa. Estos concentradores se componen en sus paredes por superficies con acabado espejo, se pueden utilizar materiales como aluminio con acabado espejo, acero con acabado espejo o en si un espejo, esto depende del costo de fabricación que tengan los materiales.

En la actualidad y por su costo, los CPC más comerciales que se venden en el mercado son de aluminio con acabado espejo, también debido a la maleabilidad que presenta el material.

Los sistemas basados en Concentradores Parabólicos Compuestos por su ventaja que tienen al captar la irradiancia directa y difusa, se utilizan para procesos fotocatalíticos.

3.2 Diseño geométrico de los CPC

Los CPC se han diseñado geoméricamente para que todos los rayos que entran en este concentrador se reflejen sobre el foco de la parábola fig.3.0 , todos los rayos que entran se miden con respecto a un ángulo que se llama ángulo de aceptación Θ_a . Este ángulo es el que se mide con respecto a una línea imaginaria que parte a la mitad la geometría del CPC, de forma que éste sea simétrico con respecto a dicha línea así mismo, también cuenta con un radio que es el radio del tubo absorbedor (r), una línea tangente que va desde la circunferencia del tubo hasta la involuta (β) y el ángulo que se forma entre las líneas COB (θ_{COB}). Las variables descritas se tienen que tomar en consideración para el diseño de los CPC.

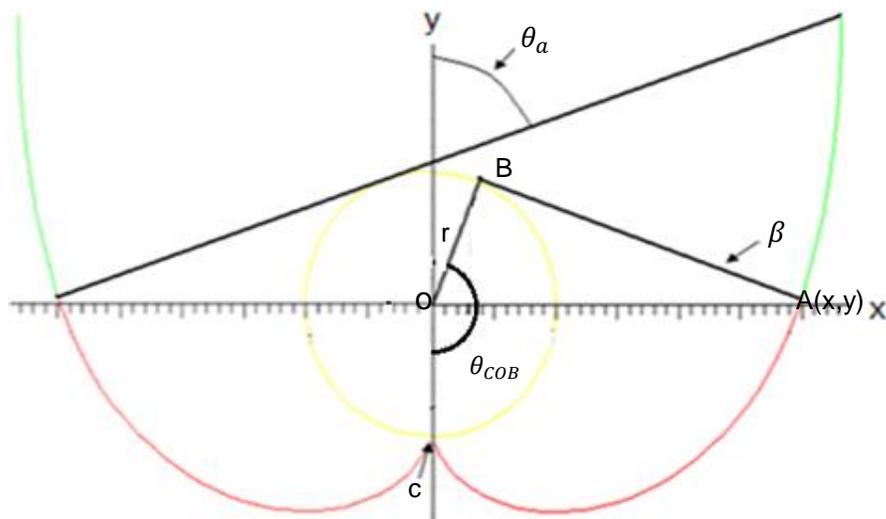


Fig.3.0. Parámetros importantes para el diseño geométrico de un CPC.

Aunque existen varias formas geométricas de los CPC, tales como los absorbedores de placas planas, tubos o aletas, en nuestro caso se abordará solamente la configuración del CPC con un tubo absorbedor tubular. La mayoría si no es que casi todos los concentradores

de este tipo se componen de una parte que es una involuta ordinaria y una parábola, que aunque se le llame parábola no es exactamente esto, si no, una curva muy parecida a ésta.

Una involuta es *el lugar geométrico que describe la punta de una cuerda que se desenrolla, manteniéndola tensa, a partir del círculo correspondiente, este círculo se conoce como círculo base* [19]. Su ecuación geométrica es $\mu=r\Theta$ en coordenadas polares, y graficando la ecuación para $r=5$ y $0\leq\Theta\leq 2\pi$ en Maple, se obtiene la fig.3.1.

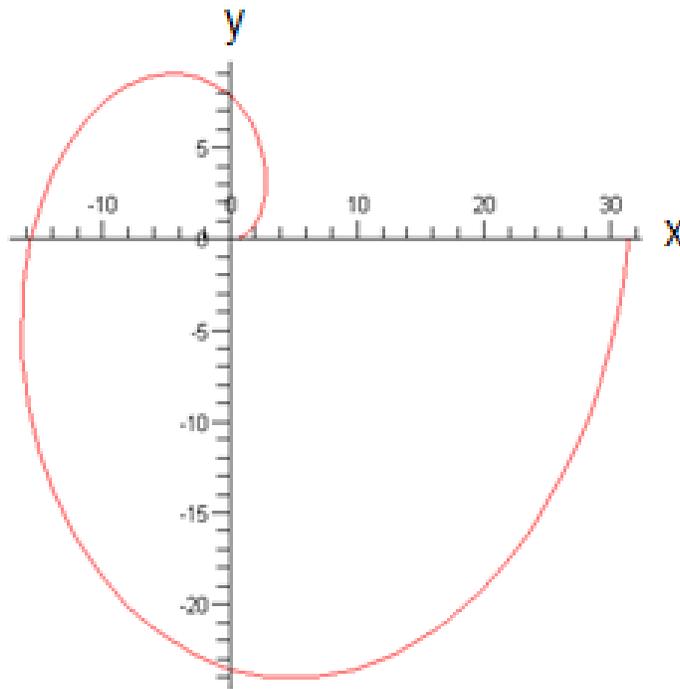


Fig.3.1. Involuta generada en Maple.

Una parábola, según la definición de Lehmann [20] es: “Un lugar geométrico de un punto que se mueve en un plano de tal manera que su distancia de una recta fija, situada en el plano, es siempre igual a su distancia de un punto fijo del plano y que no pertenece a la recta”.

La ecuación de una parábola en coordenadas polares es:

$$r = \frac{ep}{1 \pm e \cos(t)} \quad (3.0)$$

Donde e es la excentricidad y p es el valor absoluto de la distancia entre el foco y la directriz. Esta ecuación es para una parábola con el eje focal coincidente con el eje y . En la fig.3.2 se muestra su gráfica correspondiente para $e=1$, $p=3$ y un ángulo que va de 0 a 180° , generada mediante maple.

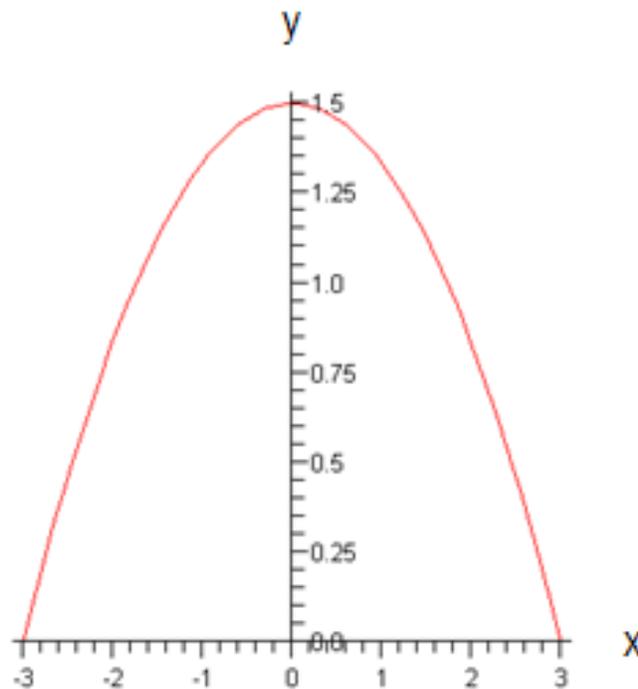


Fig.3.2. Parábola con eje focal en el eje "y".

Una circunferencia según Lehmann [21] es: "El lugar geométrico de un punto que se mueve en un plano de tal manera que se conserva siempre a una distancia constante de un punto fijo en ese plano. El punto fijo se llama centro de la circunferencia, y la distancia constante se llama radio".

La ecuación de la circunferencia con centro en el origen, en coordenadas paramétricas es:

$$x = r \cos(\theta) \quad (3.1)$$

$$y = r \sin(\theta)$$

Las figs. 3.1 y 3.2 son importantes para el diseño del CPC, aunque se ha documentado en la literatura [22] las siguientes ecuaciones:

$$\beta = r \left[\frac{\theta_{COB} + \theta_a + \frac{\pi}{2} - \cos(\theta_{COB} - \theta_a)}{1 + \sin(\theta_{COB} - \theta_a)} \right] \quad \text{Ecuación de la parábola para la distancia AB} \quad (3.2)$$

Aunque la ecuación (3.3) no es una parábola, sino una curva semejante a ésta, sirve para generar la geometría del CPC.

$$\beta = r \theta_{COB} \dots \text{Ecuación de la involuta para la distancia AB} \quad (3.3)$$

De aquí se parte que las ecuaciones paramétricas son:

$$x = r \sin \theta_a - \beta \cos \theta_a \quad (3.4)$$

$$y = -r \cos \theta_a - \beta \sin \theta_a$$

Estas ecuaciones tienen sus restricciones que son:

$$|\theta_{COB} \leq \theta_a + \pi/2| \dots \text{Para la parte de la involuta} \quad (3.5)$$

$$\theta_a + \frac{\pi}{2} \leq \theta_{COB} \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a \dots \text{Para la parte de la parábola} \quad (3.6)$$

Simplificando estas ecuaciones nos da como resultado que las ecuaciones paramétricas para la involuta son:

$$x = r(\text{sen}\theta_{COB} - \theta_{COB}\text{cos}\theta_{COB})$$

$$y = -r(\theta_{COB}\text{sen}\theta_{COB} + \text{cos}\theta_{COB}) \quad (3.7)$$

$$0 \leq \theta_{COB} \leq \frac{\pi}{2} + \theta_a$$

Y para la parte de la parábola son las siguientes:

$$x = r(\text{sen}\theta_{COB} - A\text{cos}\theta_{COB}) \quad (3.8)$$

$$y = -r(\theta_{COB}\text{sen}\theta_{COB} + \text{cos}\theta_{COB})$$

Dónde:

$$A = \frac{\frac{\pi}{2} + \theta_{COB} + \theta_a - \text{cos}(\theta_{COB} - \theta_a)}{1 + \text{sen}(\theta_{COB} - \theta_a)} \quad (3.9)$$

Ahora, si se grafican las ecuaciones (3.1, 3.7 y 3.8) con un radio de 5 [mm] ($r=5$ [mm]) y un ángulo de aceptación de 71.34° ($\theta_a = 71.34^\circ$), que son los valores del concentrador que se tiene en el Instituto de Ingeniería de la UNAM y con el que se está haciendo el experimento, se obtiene la fig.3.3 que además muestra la circunferencia (tubo), la involuta y la parábola para estos valores.

$$e2 := [5 * \sin(t) - 5 * t * \cos(t), -5 * t * \sin(t) - 5 \cos(t), t = 0..0.896 * Pi] \quad (3.10)$$

$$e3 := \left[5 * \sin(y) - \frac{5(0.896*Pi+y-\cos(y-0.396*Pi)) \cos(y)}{1+\sin(y-0.396*Pi)}, -\frac{5(0.896*Pi+y-\cos(y-0.369*Pi))*\sin(y)}{1+\sin(y-0.396*Pi)} - 5 * \cos(y), y = 0.896 * Pi..1.104 * Pi \right], \quad (3.11)$$

$$e5 := \left[5 * \cos(n), 5 * \sin(n), n = \frac{3*Pi}{2} .. \frac{5*Pi}{2} \right] \quad (3.12)$$

Con la opción de Graficar en maple la cual es el comando plot, se obtiene la ecuación (3.13).

$$plot([e2, e3, e5]); \quad (3.13)$$

En la fig.3.3 se muestra la mitad de la circunferencia en amarillo que corresponde al tubo del concentrador, la involuta se muestra en color rojo y la parábola en color verde, esta figura se obtiene de las ecuaciones (3.10, 3.11 y 3.12), las cuales a su vez se obtienen de las ecuaciones (3.7,3.8 y 3.1). Se puede observar que las ecuaciones sólo sirven para obtener la mitad del concentrador parabólico compuesto, debido a las restricciones de la función de la parábola y el ángulo, pero tomando en cuenta que el concentrador es simétrico con respecto al eje "y", se puede obtener la geometría total.

Un parámetro de mucho interés en la geometría de los CPC es el factor de concentración "C" [23], que se puede definir como la apertura total del concentrador entre el perímetro del cilindro, ecuación (3.14), estas variables se muestran en la fig.3.4. Esta figura también fue generada en maple.

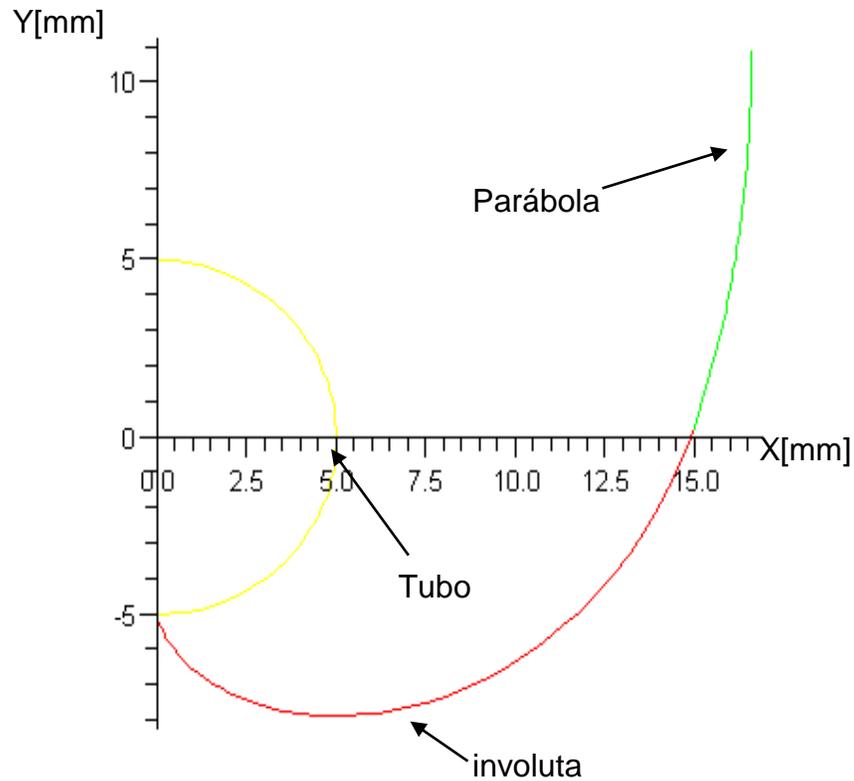


Fig.3.3. Elementos geométricos que constituye un CPC.

$$C = \frac{2a}{\pi d} \quad (3.14)$$

Sustituyendo el valor del diámetro de la tubería, el cual es de 10[mm] ($d=10$ [mm]), y la apertura encontrada en maple, mostrada en la fig.3.4, la cual tiene un valor de 16.6 [mm] ($a=16.6$ [mm]), en la ecuación (3.14), obtenemos:

$$2a=(16.6[\text{mm}])(2)=33.2[\text{mm}]$$

$$d=10[\text{mm}]$$

$$C=33.2 [\text{mm}]/((10[\text{mm}])(\pi))= 1.05$$

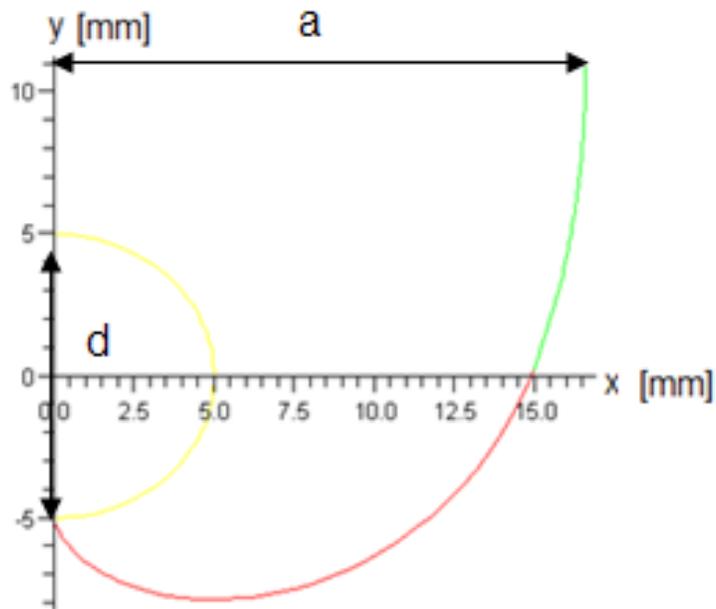


Fig.3.4. Parámetros para obtener el factor de concentración en un CPC.

Se ha demostrado en investigaciones anteriores [24] que para procesos fotocatalíticos el factor de concentración debe de ser $C=1$, también con esto se comprueba que sólo debe de ser la parte de la involuta la que debería de estar presente.

El valor antes encontrado para este diseño del CPC es el ideal tomando como referencia el valor del ángulo de aceptación del concentrador que se tiene en el II de la UNAM.

Para obtener el factor de concentración del CPC que se tiene en la planta solar del Instituto de Ingeniería, se emplea la ecuación (3.14) el cual cuenta con una apertura de 74 [mm] ($a=74$) y un diámetro de 10 [mm] ($d=10$ [mm]), sustituyendo estos valores se obtiene:

$$2a=148 \text{ [mm]}$$

$$d=10 \text{ [mm]}$$

$$C=2a/(\pi d)=148/(\pi * 10)=4.71$$

Este valor es muy alto para la aplicación de fotocatalisis.

Ahora cambiando la tubería con un diámetro de 25.4 [mm] y el ángulo igual que en el ejemplo anterior se obtiene la mitad del CPC, que es el ideal para el proceso de fotocatalisis esto se muestra en la fig.3.5. En la figura se muestra un corte transversal del CPC con un factor de concentración aproximadamente de uno ($C \approx 1$).

Dónde:

$$a=42.1 \text{ [mm]}$$

$$d= 25.4 \text{ [mm]}$$

$$C=((42.1)(2)[\text{mm}])/((\pi)(25.4))=1.05$$

$$e2 := [12.7 * \sin(t) - 12.7 * t * \cos(t), -12.7 * t * \sin(t) - 12.7 * \cos(t), t = 0..0.896 * Pi] \quad (3.15)$$

$$e3 := \left[12.7 * \sin(y) - \frac{12.7(0.896*Pi+y-\cos(y-0.396*Pi)) \cos(y)}{1+\sin(y-0.396*Pi)}, -\frac{12.7(0.896*Pi+y-\cos(y-0.369*Pi))*\sin(y)}{1+\sin(y-0.396*Pi)} - 12.7 * \cos(y), y = 0.896 * Pi..1.104 * Pi \right]; \quad (3.16)$$

$$e5 := \left[12.7 * \cos(n), 12.7 * \sin(n), n = \frac{3*Pi}{2} .. \frac{5*Pi}{2} \right] \quad (3.17)$$

$$\text{plot}([e2,e3,e5]); \quad (3.18)$$

Este valor sería el aproximado al ideal para esta tubería de una pulgada y el ángulo de aceptación, por lo que se tendría que construir un CPC con estas características. Para el CPC que se tiene en el II de la UNAM para el tubo de una pulgada se tiene:

$$2a=148 \text{ [mm]}$$

$$D=25.4 \text{ [mm]}$$

$$C=(148)[\text{mm}]/((\pi)(25.4)[\text{mm}])=1.85$$

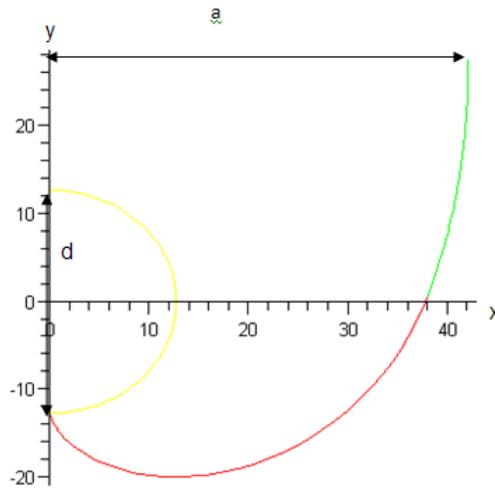


Fig.3.5. Corte transversal de un CPC con $C=1$.

Este valor se aproxima más al factor de concentración que debe de tener un CPC para el proceso fotocatalítico.

3.3 Dispositivo experimental

Para el desarrollo de la fase experimental se diseñó un sistema que se adecuara a un proceso fotocatalítico, basándose en estudios previos que se tienen en la literatura, y asemejándose al que se tiene en la planta solar de Almería, sólo que en este se utilizaron esferas para generar la fotocatalisis; como ya se describió en el apartado anterior, la geometría de los CPC ya se ha estudiado bastante y lo más relevante a partir de la geometría, es el factor de concentración que pueda aportar.

Los diámetros de tubo y los factores de concentración utilizados en el experimento se muestran en la tabla 3.0.

| Diámetro del tubo [mm] | Factor de concentración (C) |
|------------------------|-----------------------------|
| 10 | 4.71 |
| 25.4 | 1.85 |

Tabla 3.0. Diámetro de la tubería y factor de concentración.

Ahora, antes de entrar al proceso de fotocatalisis es necesario conocer el comportamiento del flujo que se tiene en este sistema, que es en lo que se enfocó esta tesis. Los parámetros más importantes a medir en el experimento se muestran en la tabla 3.1, con sus respectivos símbolos y unidades.

| Parámetro | Símbolo | Unidades |
|-------------------------|-------------|-------------------|
| Presión | P | Pa |
| Flujo | Q | m ³ /s |
| Área de la tubería | A | m ² |
| Longitud de la tubería | L | m |
| Número total de esferas | N_{T_e} | Adimensional |
| Diámetro de las esferas | D_e | Adimensional |
| Numero de tubos | N_{tubos} | Adimensional |

Tabla 3.1. Parámetros con símbolos y unidades empleadas.

Otros parámetros que se van a evaluar se muestran en la tabla 3.2, los cuales se obtienen de diferentes libros de fluidos.

| Parámetro | Símbolo | Unidades |
|--------------------------------|---------|-------------------|
| Densidad | ρ | kg/m ³ |
| Viscosidad dinámica del fluido | μ | Ns/m ² |

Tabla 3.2. Parámetros que se obtienen de tablas con símbolos y unidades.

-Bomba de agua

Se empleó una bomba de agua marca ABB, como la mostrada en la fig.3.6; algunas de sus características se muestran en la tabla 3.3, esta bomba consta de un sistema eléctrico que se conecta con un regulador de velocidad, la cual se fija a un valor y se puede cambiar a otro cuando se desee. Se eligió esta bomba por que puede entregar flujos bajos y altos.

| Característica | Valor |
|-----------------------------|-----------------|
| Alimentación | 208-230/460 [V] |
| Corriente | 4.0/2.0 [A] |
| RPM | 1720 |
| Temperatura ambiente máxima | 40 [°C] |
| CP | 1.5 |

Tabla 3.3. Algunas características y valores de la bomba.



Fig.3.6. Bomba de agua utilizada.

- Regulador de velocidad

Se utilizó un variador de velocidad marca SIEMENS, lo que permite a través de la bomba entregar velocidades bajas y altas según se desea, esto por medio de unos botones donde se puede aumentar o disminuir la frecuencia, dicho valor se observa en un display o pantalla, también tiene un botón a donde se pudo cambiar el valor de la frecuencia a valores negativos o positivos, con lo cual provoca que gire la flecha en sentido de las manecillas del reloj o contrario a esto, en la fig. 3.7 se muestra los botones y el display del variador.

En la tabla 3.4 se muestra algunas características con valores de este variador de velocidad.

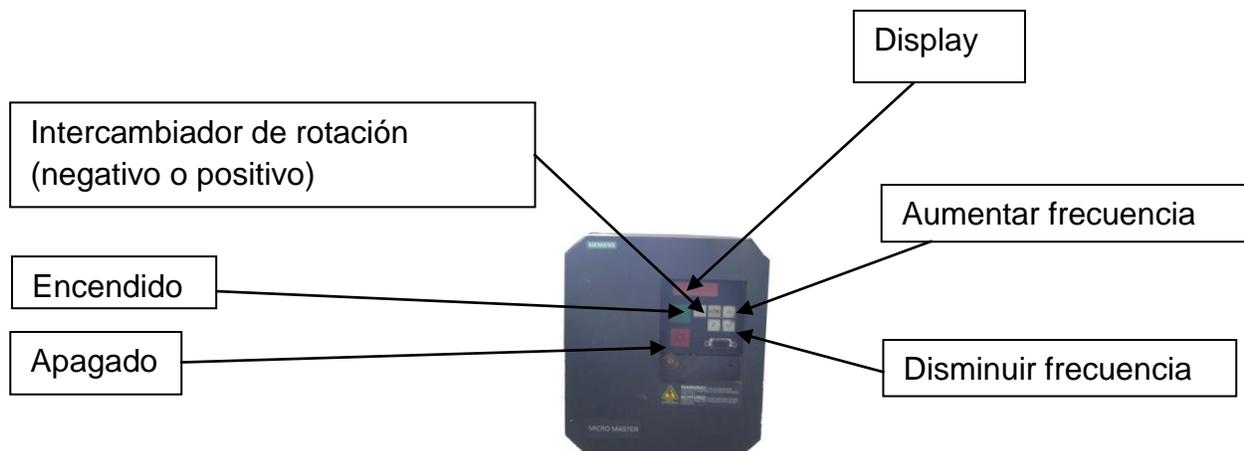


Fig.3.7. Variador de velocidad marca SIEMENS.

| Característica | Valor |
|------------------------------|-------------------------|
| Alimentación entrada | 1-3 AC, 230 V, 47-63 Hz |
| Potencia de salida | 2.2 kW |
| Corriente continua de salida | 4 kVA |
| Corriente de salida (nom) | 9 A |
| Potencia motor salida | 3.0 HP |

Tabla 3.4. Algunas características y valores del variador de velocidad.

-Medidor de flujo

Para medir el flujo se utilizó un medidor de flujo electromagnético SIGNET 2551, éste mide el caudal en un tubo lleno, monitorizando para ello el voltaje producido cuando el líquido circula por un campo magnético.

La salida eléctrica del medidor de flujo se conecta a la tarjeta de adquisición de datos, la cual adquiere el valor de la variable eléctrica para los diferentes valores de flujo. Los valores adquiridos mediante la tarjeta se envían a una computadora personal (PC) a través de una conexión USB (bus universal en serie). Las características de este medidor se muestran en la tabla 3.5.

| Característica | Valor |
|-------------------------|--|
| Corriente | 4 A 20 [mA] |
| Voltaje | 21.6 A 26.4 VCC |
| Tamaños de tubo | ½ A 8 [In] |
| Intervalos de velocidad | Mínimo: 0.05 [m/s] Máximo: 10 [m/s] |

Tabla 3.5. Características y valores del medidor de flujo.

El medidor de flujo se conectó en la tubería tomando en cuenta la dirección del flujo dentro de la tubería, esta dirección se debe de poner en manera paralela con una flecha colocada en la parte inferior del medidor como se muestra en la fig.3.8. También se calibro antes de ponerlo a funcionar para una mejor lectura, precisión y exactitud de los datos.

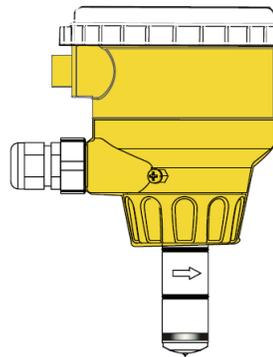


Fig.3.8. Medidor de flujo.

-Transductores de Presión

Se utilizaron dos transductores de presión de la marca MSI y están fabricados en acero; una de sus aplicaciones son los sistemas hidráulicos, entre muchos otros, tal como el que se tiene en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería.

La señal eléctrica de salida de los transductores de presión, al igual que la del medidor de flujo, se conectan a la tarjeta de adquisición de datos. Los datos de presión adquiridos son enviados a la PC. En la tabla 3.6 se muestran algunas características de estos transductores.

Así mismo en la fig. 3.9 se muestra el transductor de presión utilizado en el proceso.

| Característica | Valor |
|--------------------------|----------------|
| Precisión | +/- 0.25% |
| Ciclos de presión | 10 millones |
| Temperatura de operación | -40 A 125 [°C] |
| Voltaje | 0.5 A 5 [V] |

Tabla 3.6. Características y valores del transductor de presión.



Fig.3.9. Transductor de presión.

-Tarjeta de Adquisición de datos

Se utilizó una tarjeta de adquisición de datos de la compañía National Instruments modelo NI-USB-6216. A esta tarjeta van conectados los dos transductores de presión y el medidor de flujo, esta por medio de los diferentes valores de voltaje que obtiene de los dispositivos (transductores de presión y medidor de flujo), envía los datos a una PC por medio de un cable USB.

Una vez enviado los valores de voltaje (datos), por medio de un programa la PC se encarga de transformar estos voltajes a valores de presión y flujo los cuales están en [Pa] y [m^3/s] respectivamente. Algunas características de la Tarjeta de adquisición de datos se muestran en la tabla 3.7 y en la fig.3.10 las tarjetas del modelo mencionado.

-Depósito de agua

Como depósito de agua se utilizó un tinaco con capacidad para almacenar 600 [l], como el que se muestra en la fig.3.11, por medio de este se recirculó el agua en el proceso. No se requería un tinaco de más capacidad por que el agua entra en proceso de recirculación.

| Característica | Valor |
|---------------------------|--------------|
| Canales | 16,8 |
| Resolución | 16 bits |
| Voltaje máximo de entrada | -10 A 10 [V] |
| Voltaje máximo de salida | -10 A 10 [V] |
| Sistema operativo | Windows |

Tabla 3.7. Características principales de la tarjeta de adquisición de datos.



Fig.3.10. Tarjeta de adquisición de datos.



Fig.3.11. Tinaco.

- Integración del sistema hidráulico

La forma en que se integró el sistema hidráulico se muestra en la fig.3.12, ahí se observa el tinaco, la bomba, el medidor de flujo, el sistema CPC y los dos transductores de presión. Las señales eléctricas de los transductores de presión y de flujo son enviados a la tarjeta de adquisición de datos.

En la integración del sistema se ha considerado la recirculación del agua.

SISTEMA CPC

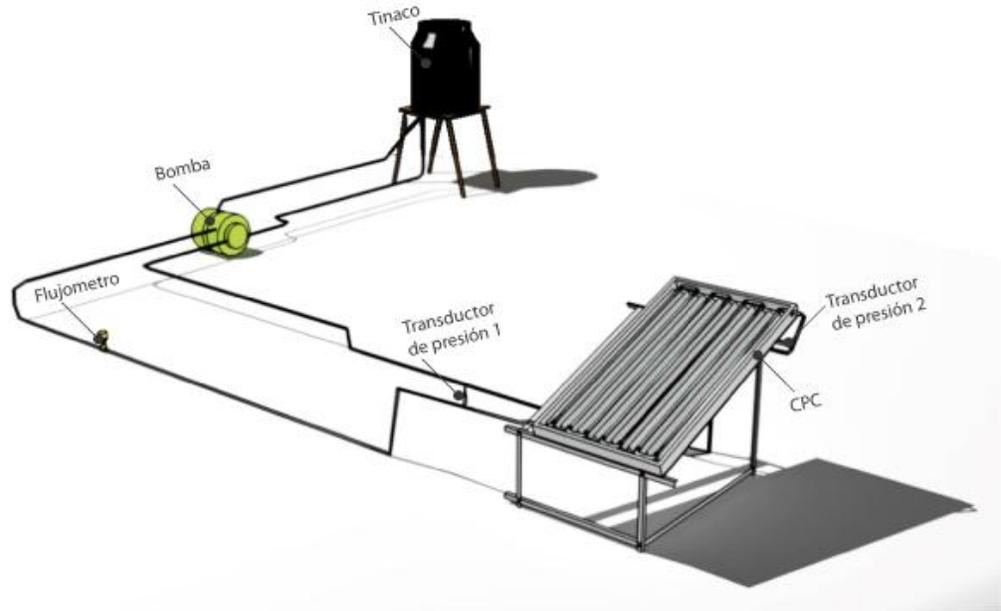


Fig.3.12. Sistema para el proceso de fotocatalisis.

3.4 Adquisición de datos

Para monitorear el comportamiento del sistema se desarrolló un programa que permite adquirir los datos de las variables, de presión y gasto. Los datos adquiridos son posteriormente procesados, este programa fue desarrollado por el M.I. Lauro Santiago Cruz de la Coordinación de Instrumentación del Instituto de Ingeniería, ubicada en el edificio 12, el programa consta de los siguientes pasos:

1.-Una vez conectado la tarjeta de adquisición de datos, y puesto en operación el software denominado CPC-David, a través de un programa ejecutable, se muestra la pantalla

presentada en la figura 3.13. En ella se observan, en la barra superior, las siguientes opciones:

- Configuración.
- Adquisición.
- Procesamiento.
- Acerca de

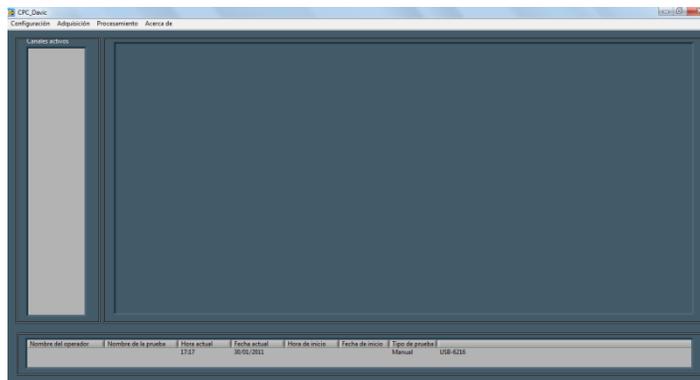


Fig.3.13. Pantalla de inicio del programa.

2.-Dentro de la opción configuración, como se muestra en la fig.3.14, se despliega un menú, que contiene las siguientes opciones:

-Directorio base: Esta opción nos solicita el nombre de la carpeta donde se van a guardar los datos y en que directorio base. Lo más aconsejable es que se guarde la carpeta en el directorio base C.

-Canales: Mediante esta opción se pueden activar los canales en donde se encuentran conectados los dos sensores de presión y el de gasto, en este caso es el canal 1,2 y 3.

Datos de Operación: Ponemos el nombre del operador y el de la prueba.

-Datos de Adquisición: Esta opción pone el tiempo entre las muestras y el tiempo total que va a durar la prueba.

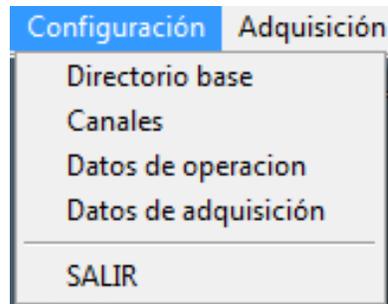


Fig.3.14. Opciones de configuración.

3.- Dentro de la opción Adquisición, como se muestra en la fig.3.15, se despliegan las siguientes opciones:

-Normal: Se utiliza principalmente para iniciar la prueba, de acuerdo con el tiempo de muestras que se eligió y el tiempo de adquisición. En esta opción los archivos de los canales son guardados automáticamente en la carpeta que se creó por medio de un archivo .txt y el programa se detiene automáticamente en el tiempo establecido.

-Prueba: Al igual que en el modo normal se puede iniciar o parar la prueba, con la única diferencia que aquí los archivos no son guardados en un formato .txt, y sólo sirve para ver el comportamiento de los sensores.

-Separar/agrupar gráficas: Esta opción es sólo para que las gráficas de los canales salgan en una sola pantalla o se divida en varias.

Abrir grafica por canales: Aquí sólo sirvió para ver las gráficas de los canales una vez guardado los archivos durante la operación Normal.

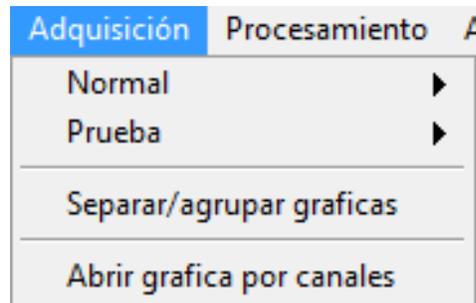


Fig.3.15. Pestaña de opciones de adquisición.

Una vez registrados los datos se requiere procesarlos, para ello se ejecuta la pestaña correspondiente a Procesamiento, fig.3.16. Al seleccionar la opción Reynolds, fig.3.17, para obtener este se requiere proporcionar los siguientes datos:

-Velocidad mínima [m/s].

-Velocidad máxima [m/s]

-Diámetro de la tubería en donde se encuentra acoplada el medidor de flujo en pulgadas [in].

-Diámetro de las esferas [m].

- F_{Re} (Coeficiente correctivo del número de Reynolds) [adimensional]

-Densidad [kg/m^3]



Fig.3.16. Pestaña de procesamiento de presión y Reynolds.

-También se piden los datos que almaceno el programa en extensión .txt, los cuales para este caso corresponden al sensor marcado con el canal número 2, el cual es el medidor de flujo.

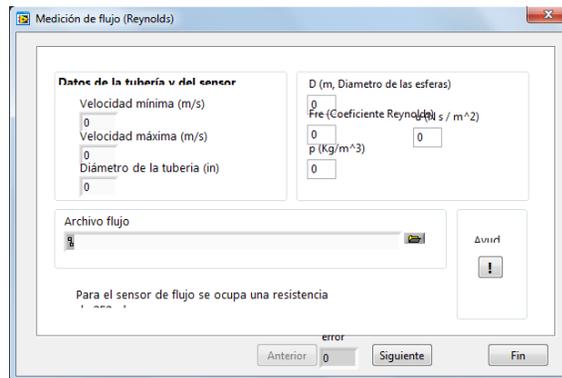


Fig.3.17. Pantalla de ingreso de datos.

En la pantalla de la fig.3.18 se muestra la pantalla tipo de la gráfica del número de muestras y amplitud, en donde la amplitud es el voltaje registrado por el sensor.

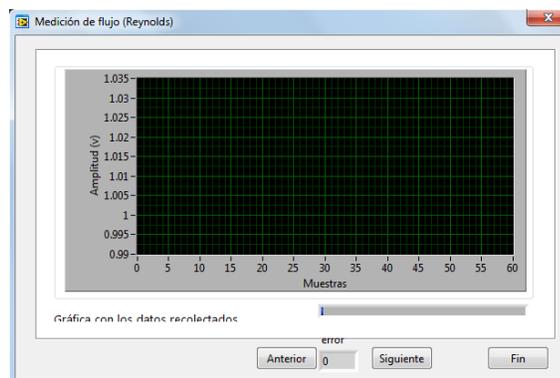


Fig.3.18. Pantalla tipo de muestras y amplitud.

En la pantalla de la fig.3.19, se muestra la pantalla tipo de la gráfica del número de muestras y gasto.

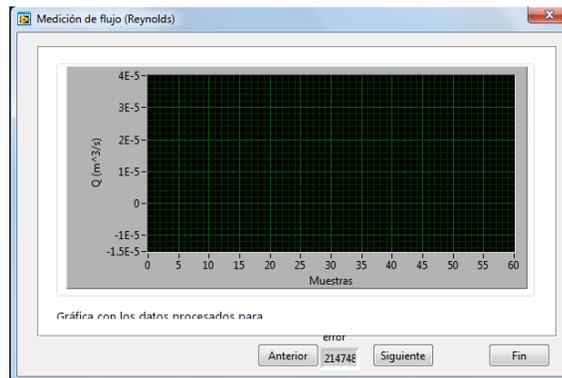


Fig.3.19. Pantalla tipo de muestras y flujo.

En la pantalla tipo de la fig.3.20 se despliega la fecha en la primera columna, la hora en la segunda columna y el gasto en la tercera columna, de la prueba que se realizó, en esta misma pantalla se puede guardar los datos en un archivo con extensión .txt, para su posterior procesamiento en otro programa si se desea, además también nos muestra el diámetro de la tubería y el número de muestras.

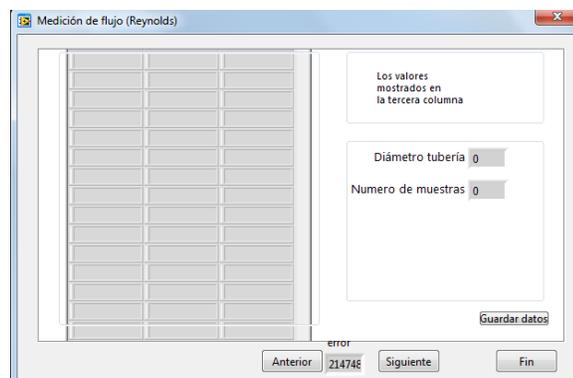


Fig.3.20. Pantalla que muestra fecha, hora y flujo.

En la fig.3.21, se muestra la pantalla tipo que contiene los datos de las mediciones del flujo en una sola columna.

La siguiente pantalla tipo como se muestra en la fig.3.22, despliega una tabla del flujo en la primera columna y el número de Reynolds en la segunda columna, los cuales se pueden guardar en un archivo con extensión .txt. Así como también el promedio de la velocidad y el promedio del Reynolds, los también se pueden guardar en un archivo con extensión .txt.

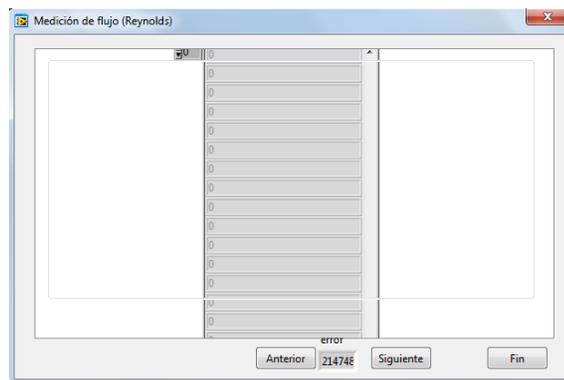


Fig.3.21. Pantalla que muestra el flujo.

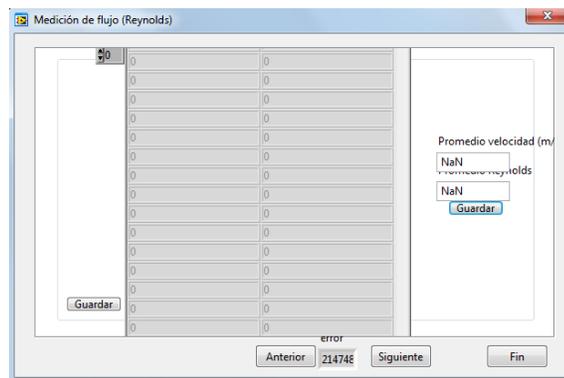


Fig.3.22. Pantalla tipo del número de Reynolds y flujo.

Por último, como se muestra en la fig.3.23, donde se presenta pantalla tipo de la gráfica de flujo vs. Reynolds.

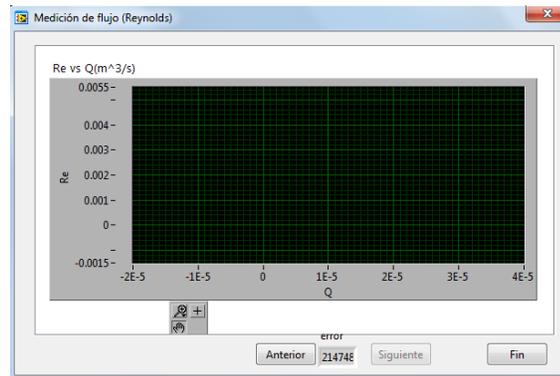


Fig.3.23. Gráfica que muestra el número de Reynolds y el flujo de las muestras.

Para el procesamiento del factor de fricción se tomó de la pestaña de la fig.3.16, la opción presión la cual consta de los siguientes pasos:

Se introdujeron los datos correspondientes a:

- Diámetro de las esferas [m]
- Longitud de la tubería, en el tramo comprendido en la entrada y salida de los sensores. [m]
- Densidad del fluido de trabajo [kg/m^3].
- Gravedad [m/s^2].
- Coeficiente de fricción corregido y/o coeficiente de frotamiento, los cuales se obtienen de tablas [adimensional].
- Diámetro de la tubería [m].

En la fig.3.24, se muestran los datos de presión registrados en donde la primera columna corresponde a la presión de entrada, la segunda columna a la presión de salida, así como el diferencial de estos mostrados en la tercera columna.

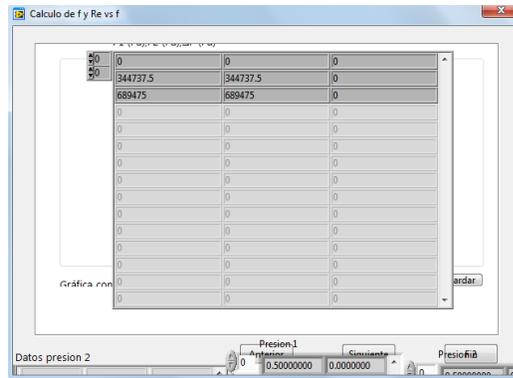


Fig.3.24. Presión de entrada, salida y diferencial de presiones.

En la fig.3.25 se muestra la pantalla tipo de los datos de fricción en la primera columna y el diferencial de presión en la segunda columna. Estos datos se pueden almacenar en un archivo con extensión .txt, según se requiera o no.

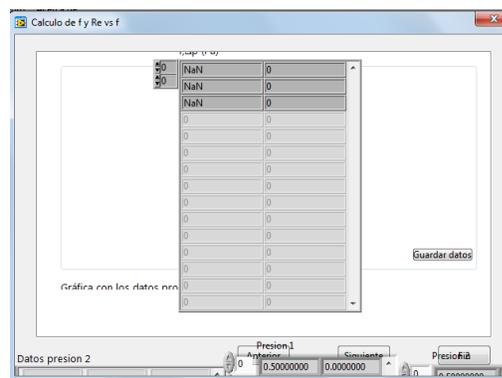


Fig.3.25. Factor de fricción y diferencial de presión.

En la fig.3.26 se muestra la pantalla tipo en donde se obtiene la gráfica del factor de fricción y el diferencial de presión.

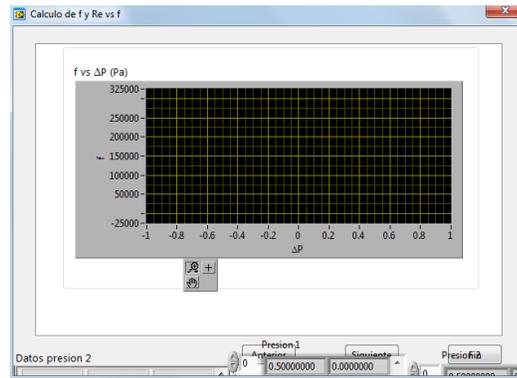


Fig.3.26. Pantalla tipo del diferencial de presión y factor de fricción.

En la pantalla tipo presentada en la fig.3.27 se muestran los datos del factor de fricción en la primera columna y el número de Reynolds en la segunda columna.

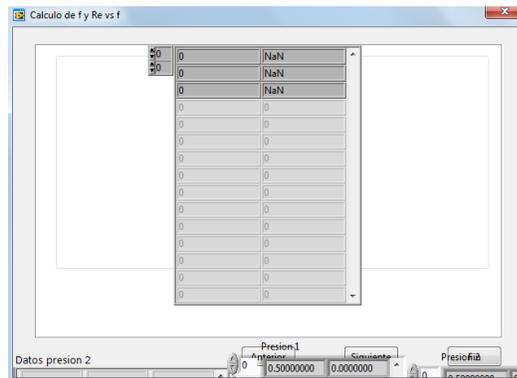


Fig.3.27. Número de Reynolds y factor de fricción.

Por último, en la pantalla tipo como se muestra en la fig.3.28, se obtuvo la gráfica del número de Reynolds vs factor de fricción.

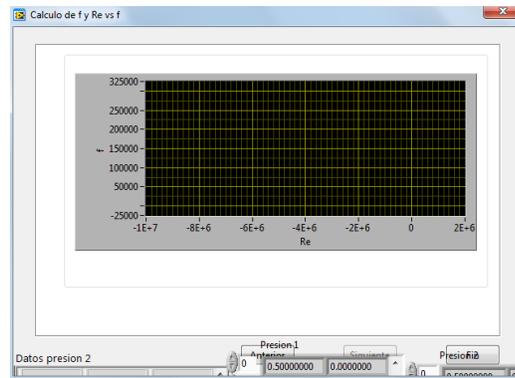


Fig.3.28. Pantalla tipo de Reynolds y factor de fricción.

3.5 Prueba de longitud equivalente para tubo de vidrio tipo boro-silicato de 10 [mm] de diámetro con esferas de 6 [mm] de diámetro

Se realizaron pruebas para determinar la longitud equivalente para las curvas en U de diámetro interno de 10 [mm] y esferas con diámetro de 6 [mm]. La finalidad de esta prueba es conocer que tramo de tubería recta llena de esferas del mismo diámetro, provocaba la misma caída de presión que la curva en U, todas las pruebas se realizaron con el mismo flujo.

Se montaron 4 configuraciones diferentes, en la cual la primera consistió en llenar la curva en U de vidrio tipo boro-silicato con esferas y contar la cantidad de esferas que cabían dentro del codo, una vez que se contó el número de esferas, las cuales resultaron ser 40, se dividió éste número en tercios con lo cual se obtuvieron tres configuraciones más

La segunda configuración consistió en cortar un tramo de tubería de vidrio tipo boro-silicato, a una longitud de 10 [mm], esto con la finalidad que en su interior tuviera 19 esferas.

La segunda configuración consistió en cortar un tramo de tubería de 200 [mm] la cual tenía en su interior 40 esferas.

Por último la tercera configuración consistió en cortar otro tramo de tubería de 300 [mm] la cual tenía en su interior 59 esferas.

Estas tres configuraciones se muestran en la tabla 3.8.

| Longitud de la Tubería [mm] | Esferas |
|-----------------------------|---------|
| 100 | 19 |
| 200 | 40 |
| 300 | 59 |

Tabla 3.8. Longitud de la tubería y esferas.

Para la toma del flujo se utilizó el medidor de flujo y los dos transductores de presión, el primero para la obtención de la presión de entrada y el segundo para la obtención de la presión de salida. Aunque no se ocupó todo el programa, nada más se utilizó para que guardara los archivos de flujo y la diferencial de presión.

En la fig.3.29 se muestra el dispositivo que se utilizó el cual es la curva en U de vidrio tipo boro-silicato con esferas y los dos transductores de presión.

Lo mismo se hizo para las otras tres configuraciones mostradas en la tabla 3.7, obteniendo siempre la diferencial de presión y el flujo que pasaba por la tubería. En la fig.3.30 se muestra la prueba para el tubo de vidrio tipo boro-silicato de 200[mm] de longitud y 40 esferas en su interior de 6 [mm] de diámetro.



Fig.3.29. Curva en U de vidrio tipo boro-silicato.



Fig.3.30. Tubo lineal de vidrio tipo boro-silicato.

Para estas pruebas además de la tubería de PVC se utilizó manguera flexible para acoplar el tubo de vidrio tipo boro-silicato a la tubería de PVC, porque era la que mejor permitía el paso de flujo sin obstrucciones.

3.6 Prueba de longitud equivalente para el tubo de vidrio tipo boro-silicato de 25.4 [mm] de diámetro con esferas de 10 [mm] de diámetro

Al igual que en el apartado 3.5 se realizaron pruebas para obtener la longitud equivalente, solo que ahora se cambió la tubería de vidrio tipo boro-silicato por una de 25.4 [mm] de diámetro y esferas en su interior de 10 [mm] de diámetro.

Se tomó como referencia para esto la cantidad de esferas que cabían dentro de la curva en U de vidrio tipo boro-silicato al igual que en el apartado 3.5, las cuales en número resultaron ser 66 aquí también se emplearon curvas en U de plástico para tener una gama más extensa de la caída de presión con otro tipo de material, las esferas que cabían en esta curva fueron 60, la longitud de la tubería de vidrio y la cantidad de esferas se muestran en la tabla 3.9.

| Longitud de la tubería [mm] | Esferas |
|-----------------------------|---------|
| 93 | 30 |
| 185 | 70 |
| 370 | 130 |

Tabla 3.9. Longitud de la tubería y esferas para las diferentes pruebas de longitud equivalente.

Al igual que en el caso anterior se montaron las pruebas con los transductores de presión y el medidor de flujo, en la fig.3.31, se muestra la curva compuesta de Boro-Silicato con 66 esferas de 10 [mm] en su interior, también se pueden apreciar los dos transductores de presión.



Fig.3.31. Curva en U de vidrio tipo boro-silicato de 25.4 [mm] de diámetro.

En la fig.3.32, al igual que en la prueba anterior se dejaron los dos transductores de presión en el mismo lugar y se cambió la curva de vidrio tipo boro-silicato por una curva de plástico, la cual tiene la misma forma que la primera y mismo diámetro, la cantidad de esferas que contenía esta curva son 60, las cuales son de 10 [mm] de diámetro.



Fig.3.32. Curva en U de plástico.

Las tres configuraciones de los tramos de tubería recta compuesto de vidrio tipo boro-silicato se hicieron con el mismo diámetro de tubería y se cortaron a las diferentes medidas en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería. Para la longitud de estos tramos se tomó como referencia la cantidad de esferas que cabían dentro de la curva de vidrio tipo boro-silicato, en la fig.3.33 se muestra la prueba con el tubo lineal de vidrio tipo boro-silicato de 185 [mm] con 70 esferas de 10 [mm] en su interior.



Fig.3.33. Tubo lineal de 185 [mm] y 70 esferas.

4 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para las diversas pruebas efectuadas, en el primer apartado se muestran los resultados obtenidos para la prueba de longitud equivalente para el tubo de 10 [mm] de diámetro y esferas de 6 [mm] de diámetro.

En el segundo apartado se muestran los resultados obtenidos para la prueba de longitud equivalente para el tubo de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm] de diámetro.

Por último se presentan los resultados del factor del número de Reynolds y factor de fricción, tanto para el tubo de 10 [mm] de diámetro y esferas de 6 [mm] y para el tubo de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10[mm].

4.1 Longitud equivalente de la curva en U de vidrio tipo boro-silicato de 10 [mm] de diámetro y esferas de 6 [mm] de diámetro.

Haciendo varias pruebas se tomaron los datos de presión y flujo para poder determinar la diferencial de presión, de la curva en U de vidrio tipo boro-silicato, estos resultados se muestran en la fig.4.0, en donde también se muestra la ecuación de la curva de ajuste, donde se puede observar que es una ecuación potencial.

Se realizaron también gráficas para poder observar el comportamiento que presentaban las tres configuraciones mostradas en la tabla 3.7, las cuales siguiendo el orden de esta tabla, las gráficas de los resultados se muestran en las fig.4.1,4.2 y 4.3.

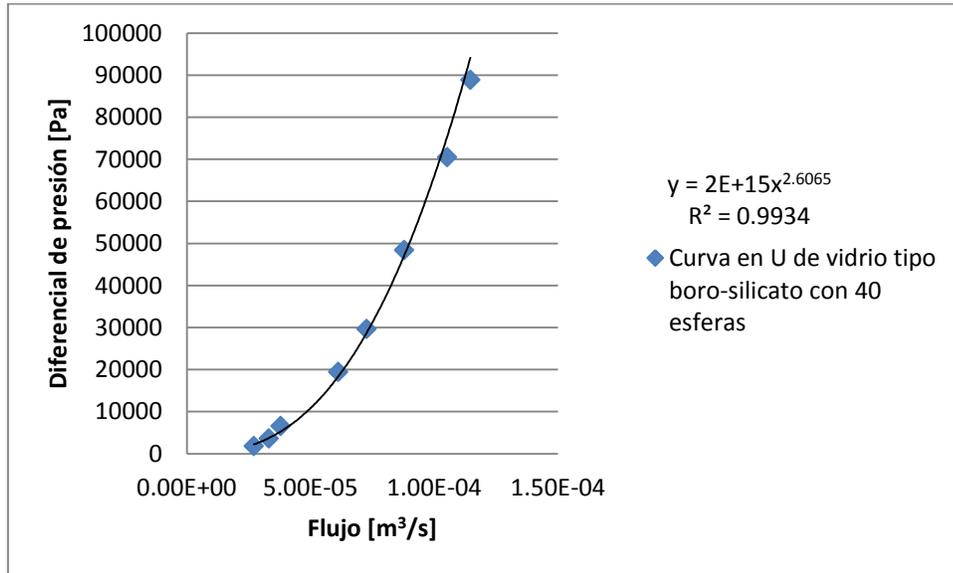


Fig.4.0. Flujo y diferencial de presión para la curva en U.

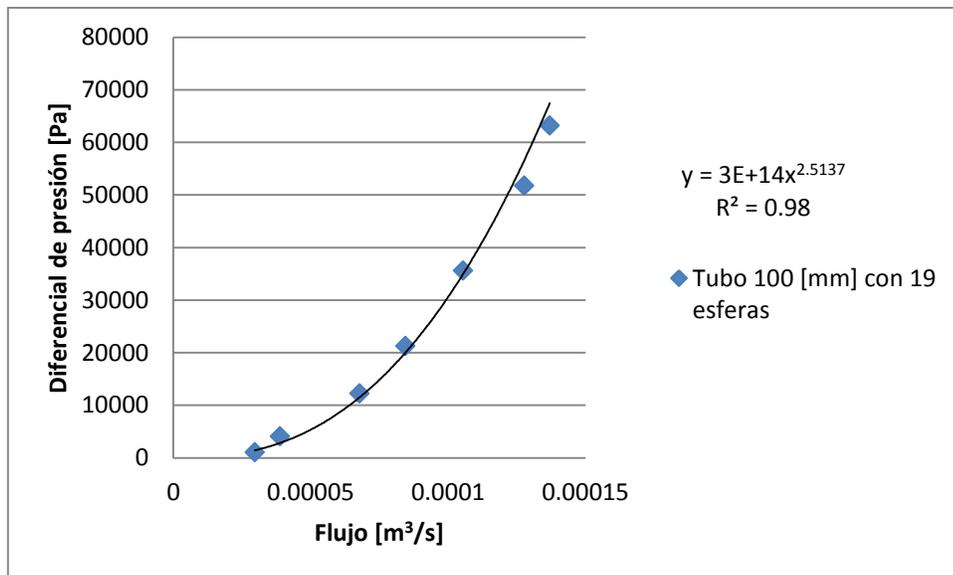


Fig.4.1. Flujo y diferencial de presión para el tubo de 100 [mm] con 19 esferas.

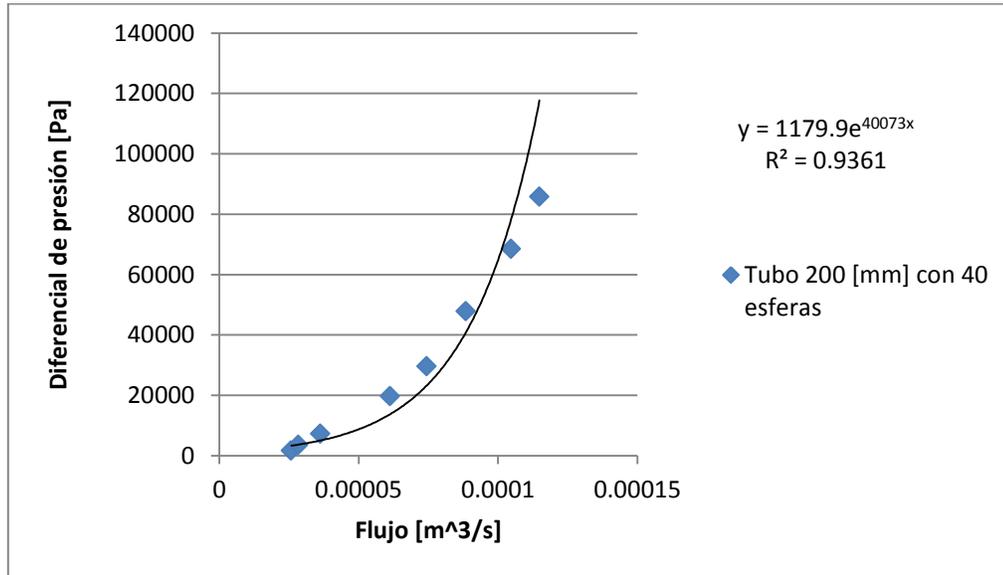


Fig.4.2. Flujo y diferencial de presión para el tubo de 200 [mm] con 40 esferas.

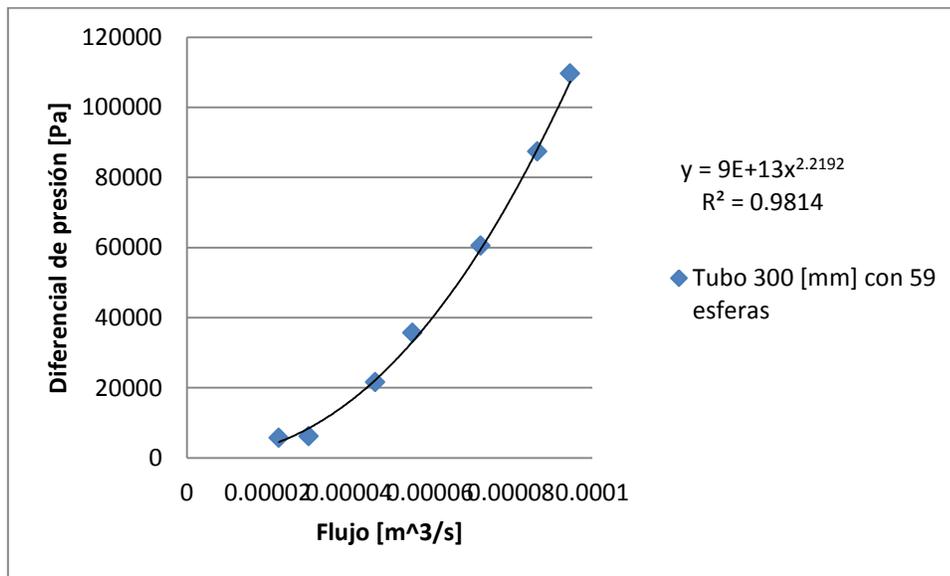


Fig.4.3. Flujo y diferencial de presión para el tubo de 300 [mm] con 59 esferas.

4.1.1 Comportamiento en una sola gráfica

Con todos los resultados anteriores, se realizó una sola gráfica para conocer cuál de las tres diferentes longitudes del tubo, con diferentes números de esferas, se asemejaba más al comportamiento de la curva en U, obtenida con el codo de vidrio tipo boro-silicato.

Con base en estos resultados, como se muestra en la fig.4.4, se puede comprobar que el codo de vidrio tipo boro-silicato con 40 esferas se comporta de manera semejante al tubo de 200 [mm] de longitud con 39 esferas.

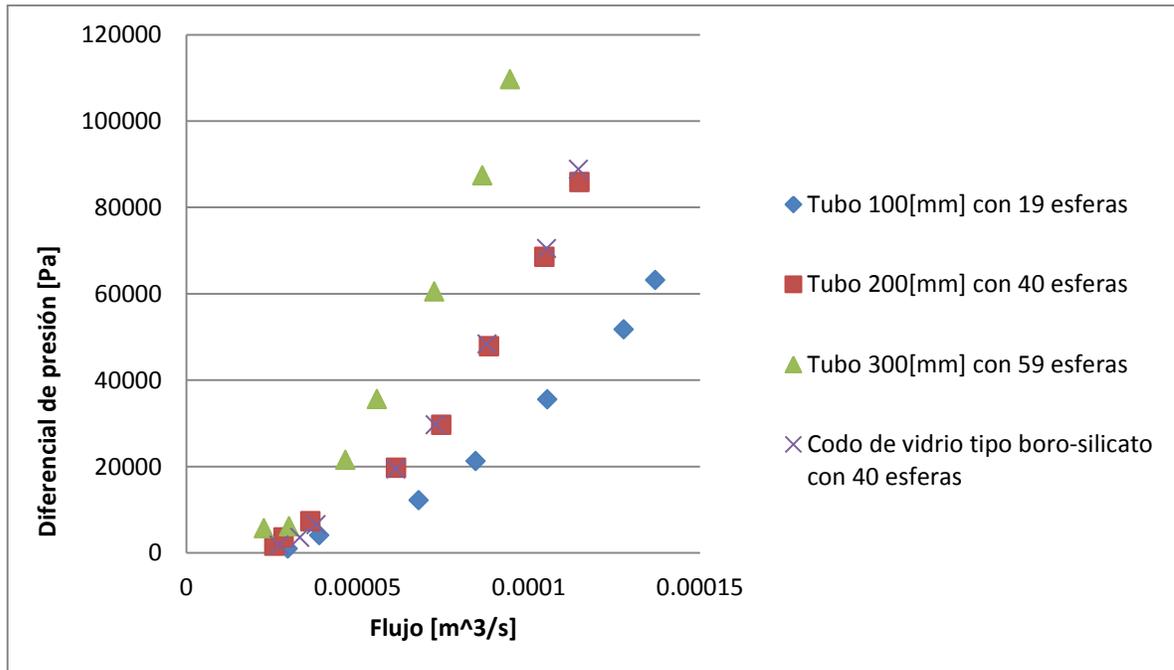


Fig.4.4. Flujo y diferencial de presión para las diferentes pruebas de longitud equivalente.

4.2 Longitud equivalente de la curva en U de vidrio tipo boro-silicato y de plástico ambas de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm] de diámetro.

Al igual que el apartado 4.1 se hicieron pruebas para las diferentes configuraciones, las cuales constan de 2 codos, el primero de vidrio tipo boro-silicato de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm] de diámetro y el segundo con un codo de plástico de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm] de diámetro.

También se hicieron pruebas con tres configuraciones distintas de tubos lineales, los cuales se muestran en la tabla 3.8, esto con la finalidad de conocer que longitud de tubería provocaba la misma caída de presión que las dos curvas en U

Se sometió a la curva de vidrio tipo boro-silicato con 66 esferas en su interior, con el gasto controlado, el cual se registró para diferentes valores, así como el diferencial de presión, los resultados se muestran fig.4.5.

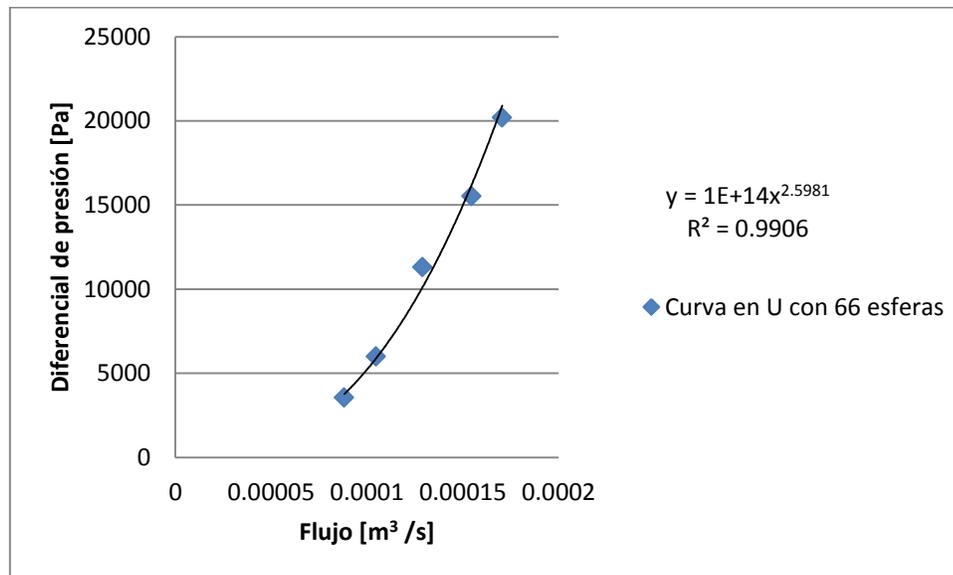


Fig.4.5. Flujo y diferencial de presión para la curva en U de vidrio tipo boro-silicato.

Para la curva en U de plástico se hizo lo mismo que para la curva en U de vidrio tipo boro-silicato, los resultados del flujo y diferencial de presión se muestra en la fig. 4.6.

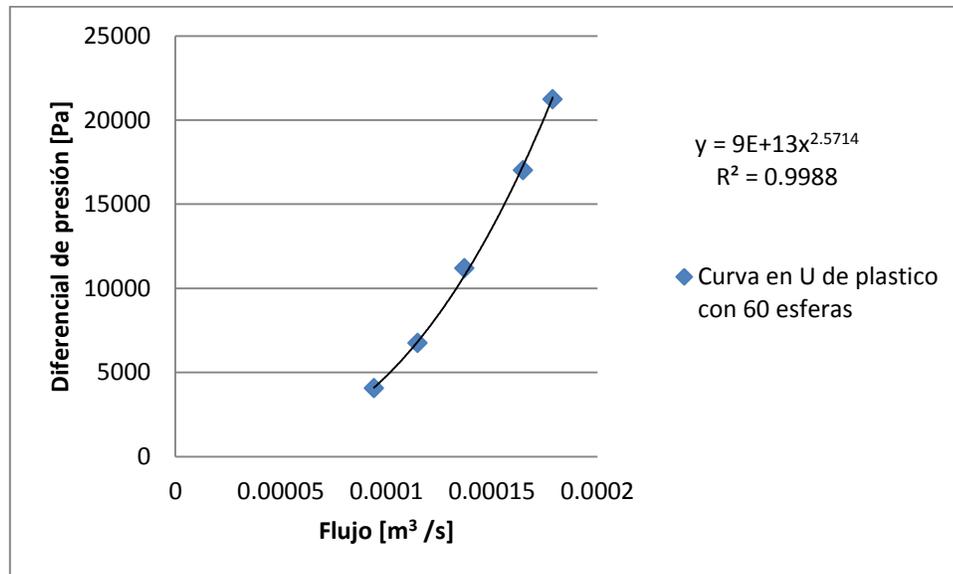


Fig.4.6. Flujo y diferencial de presión para la curva en U de plástico.

Con respecto a los resultados de las diferentes longitudes de tubería de 25.4 [mm] de diámetro, las cuales se muestran en la tabla 3.8, las gráficas de los resultados se muestran en las fig. 4.7, 4.8 y 4.9.

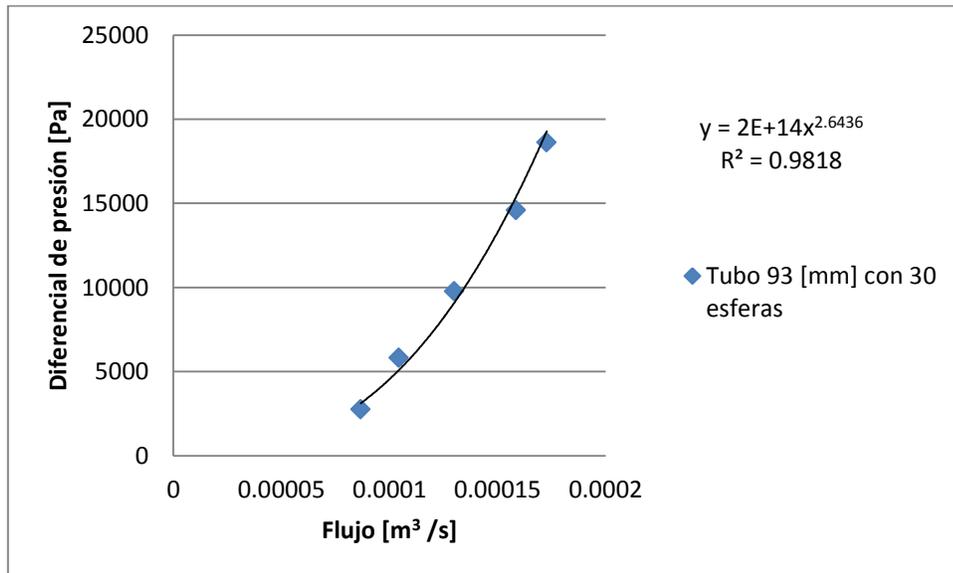


Fig.4.7. Flujo y diferencial de presión para el del tubo de 93 [mm] de longitud con 30 esferas.

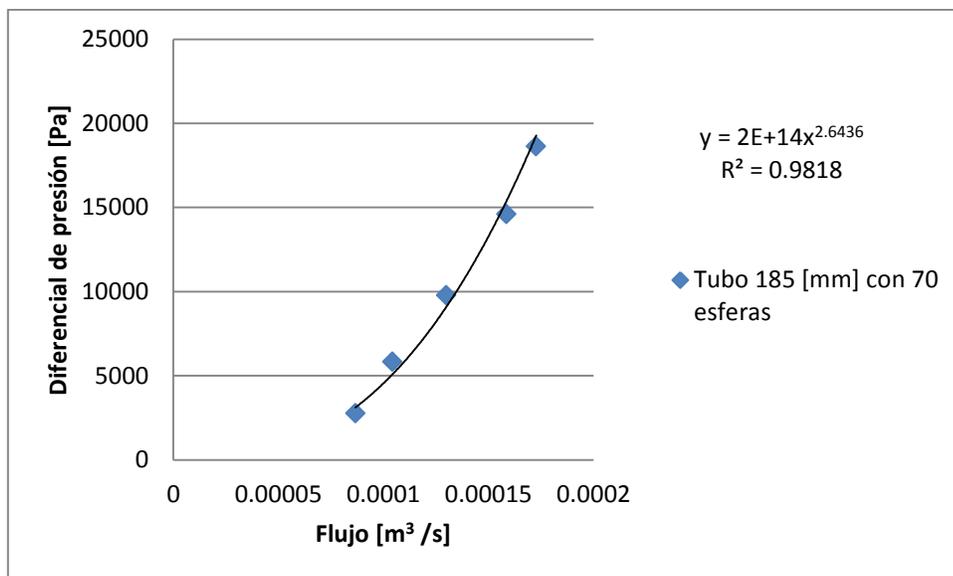


Fig.4.8. Flujo y diferencial de presión para el tubo 185 [mm] de longitud con 70 esferas.

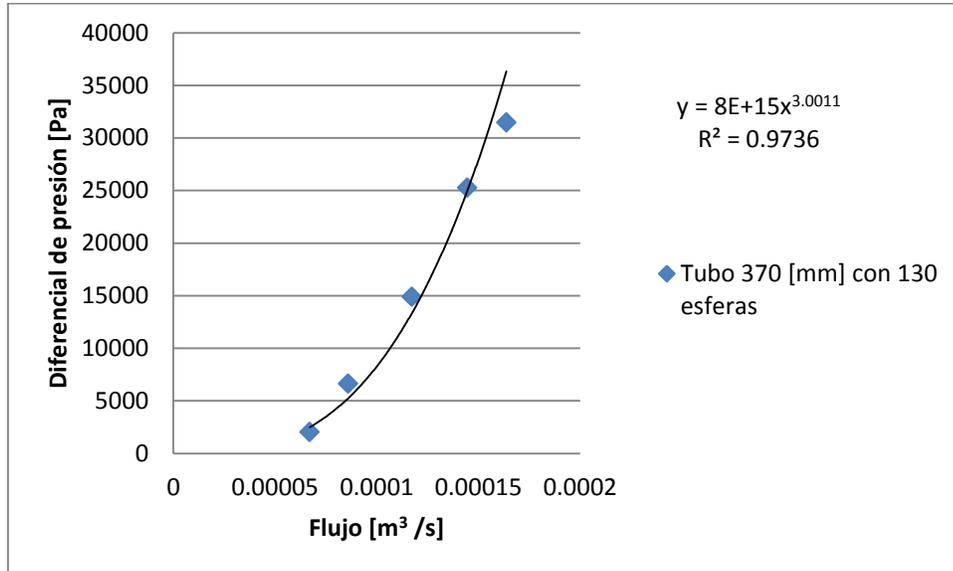


Fig.4.9. Flujo y diferencial de presión para el del tubo de 370 [mm] de longitud con 130 esferas.

4.2.1. Comportamiento en una sola gráfica

Es importante tener en una sola gráfica todos los datos, así podemos conocer que longitud de tubería recta de vidrio tipo boro-silicato con esferas, provoca la misma caída de presión que las curvas, tanto de vidrio tipo boro-silicato y de plástico. En la fig. 4.10 se muestran las diferentes curvas obtenidas para las configuraciones anteriores. Con esto podemos observar que la curva en U de vidrio tipo boro-silicato está a la mitad del comportamiento del tubo de 185 [mm] con 70 esferas y el tubo de 93 [mm] con 30 esferas, por otra parte también se puede observar que la curva en U de plástico con 60 esferas se comporta más similarmente al tubo de 93 [mm] y 30 esferas.

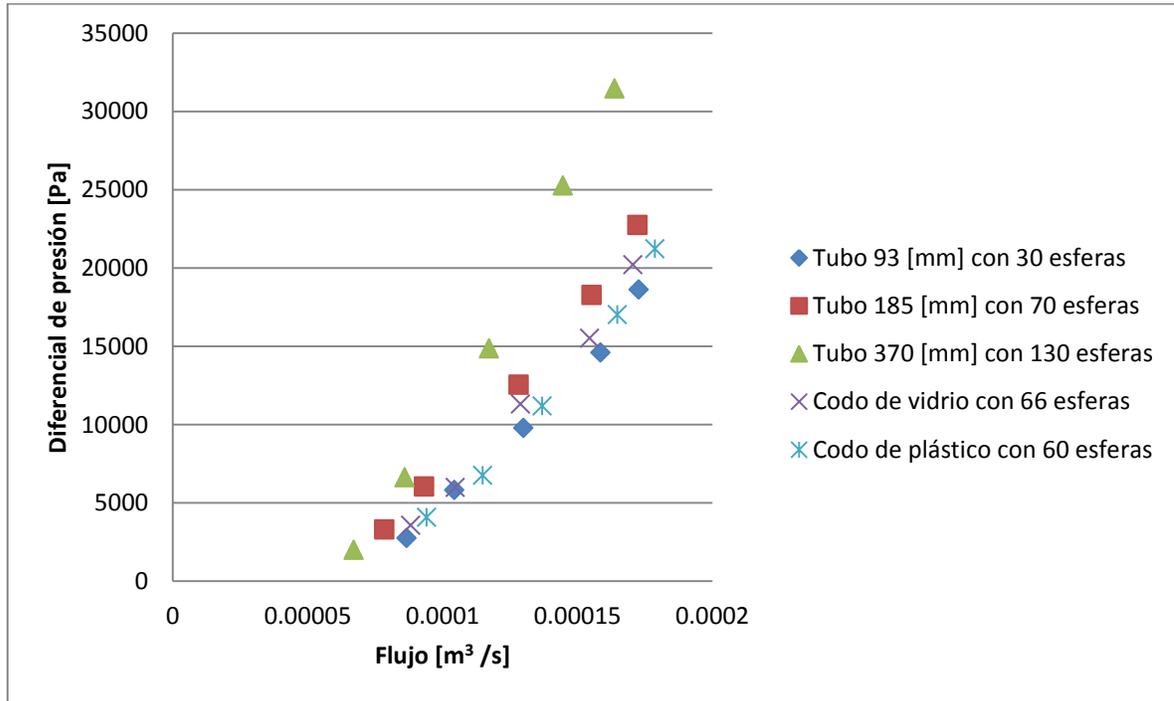


Fig.4.10. Flujo y diferencial de presión para las diferentes configuraciones.

4.3 Número de Reynolds y factor de fricción

En este apartado se presentan los principales resultados obtenidos con las ecuaciones para el número de Reynolds y factor de fricción para lechos porosos, respectivamente.

Una vez establecida la configuración final, el modelo se utilizó para analizar el efecto de algunos parámetros de diseño (materiales de las curvas en U y diámetro de la tubería). Los resultados demostraron que con un diámetro de tubería y número de esferas se obtienen diferentes configuraciones del factor de fricción y número de Reynolds, además de observar que la caída de presión varía desde la entrada hasta la salida con incrementos. Éstas pruebas se realizaron variando el flujo en la entrada del concentrador que provocó la variación de la diferencial de presión.

4.3.1 Tubería de 10 [mm] de diámetro y esferas de 6 [mm] de diámetro

Para obtener el comportamiento del número de Reynolds en función del factor de fricción, en una tubería de 10 [mm] de diámetro, se proporcionaron los parámetros indicados en la tabla 4.0.

| Parámetro | Valor | Unidades |
|--|--------|----------------------|
| Velocidad mínima que registra el medidor de flujo | 0.05 | [m/s] |
| Velocidad máxima que registra el medidor de flujo | 10 | [m/s] |
| Diámetro de la tubería donde se localiza el medidor de flujo | 0.75 | [in] |
| Diámetro de las esferas | 0.006 | [m] |
| Coefficiente correctivo del número de Reynolds | 54 | Adimensional |
| Viscosidad | 0.0012 | [Ns/m ²] |
| Coefficiente correctivo del coeficiente de frotamiento | 7000 | Adimensional |
| Diámetro de la tubería del cpc | 0.010 | [m] |
| Densidad | 1000 | [kg/m ³] |
| Longitud total de la tubería | 13.8 | [m] |
| Gravedad | 9.78 | [m/s ²] |

Tabla 4.0. Datos que se utilizan en el programa de adquisición de datos.

El CPC con los tubos de vidrio tipo boro-silicato se muestra en la fig. 4.11, el cual consta de 7 tubos de 10 [mm] de diámetro y curvas en U de vidrio tipo boro-silicato, las cuales se fabricaron en el taller de Soplado de Vidrio de la Facultad de Química:



Fig.4.11. CPC con tubería de vidrio tipo boro-silicato.

De la tabla 4.0, la longitud total de la tubería está definida por la longitud de los tubos los cuales miden 1.8 [m] a lo largo del CPC y son siete más la suma de la longitud equivalente encontrada para la curva en U de vidrio tipo boro-silicato de 10 [mm], la cual es 200 [mm] y 39 esferas, de las cuales son 6, por lo que el cálculo se efectúa de la siguiente manera:

$$L_{totalT} = (1.8 [m])(7) + (0.2[m])(6) = 13.8 [m] \quad (4.0)$$

También se necesita saber la porosidad del lecho, para saber esta se hace uso de la ecuación 2.2:

$$Porosidad, X = \frac{Volumen ocupado por los huecos}{Volumen total de la tubería}$$

De donde:

$$Volumen ocupado por los huecos = Volumen total de la tubería - Volumen total esferas$$

Donde el volumen total de la tubería es la suma de todos los tubos del CPC, por lo que la ecuación resulta:

$$X = \frac{\text{Volumen total de la tubería} - \text{Volumen total de esferas}}{\text{Volumen total de la tubería}}$$

Por último la ecuación resulta:

$$X = 1 - \frac{\text{Volumen total de esferas}}{\text{Volumen total de la tubería}} \quad (4.1)$$

El volumen total de las esferas es igual al volumen de una esfera multiplicado por el número total de esferas (N_{T_e}), la cual se obtiene de la siguiente manera:

$$V_{T_e} = \frac{4}{3}\pi r^3 N_{T_e} \quad (4.2)$$

Ahora para obtener el número total de esferas (N_{T_e}) se cuentan las esferas ($N_{e_{tubo}}$) que caben en cada tubo de 1.8 [m] las cuales son 338 y se multiplica por el número de tubos (N_{tubos}). El número de esferas ($N_{e_{le}}$) que se obtiene de la longitud equivalente en este caso la curva en U d tubo contiene 39 esferas y son 6 codos ($N_{tubos_{le}}$), por lo que resulta:

$$N_{T_e} = (N_{e_{tubo}})(N_{tubos}) + (N_{e_{le}})(N_{tubos_{le}}) \quad (4.3)$$

Sustituyendo los valores tenemos:

$$N_{T_e} = (338)(7) + (39)(6) = 2600$$

El diámetro de las esferas es de 0.006 [m], por lo que el radio es de 0.003 [m], sustituyendo esto en la ecuación (4.2), se obtiene:

$$V_{T_e} = \frac{4}{3}\pi(0.003)^3(2600) = 2.94 \times 10^{-4} [m^3]$$

Para calcular el volumen total de la tubería (V_{T_t}), se emplea la ecuación del volumen de un cilindro, esto con la longitud total de la tubería (L_{total_T}) la cual es de 13.8 [m], como se muestra en la ecuación (4.5).

$$V_{T_t} = \pi r^2 L_{total_T} \quad (4.4)$$

Sustituyendo esto con la longitud de 13.8 [m], se obtiene:

$$V_{T_t} = \pi(0.005)^2(13.8) = 1.08 \times 10^{-3} [m^3]$$

Finalmente sustituyendo el volumen de las esferas y el volumen de la tubería en la ecuación (4.1), se obtiene:

$$X = 1 - \frac{2.94 \times 10^{-4} [m^3]}{1.08 \times 10^{-3} [m^3]} = 0.27$$

Este valor sirve para obtener el coeficiente correctivo del número de Reynolds y el coeficiente correctivo de fricción, también se necesita la esfericidad aunque en este caso esta toma el valor de 1 debido a que son esferas.

Las gráficas que se utilizaron para determinar los valores del coeficiente correctivo del número de Reynolds y el coeficiente correctivo de frotamiento se muestran en las Fig.4.12 y 4.13.

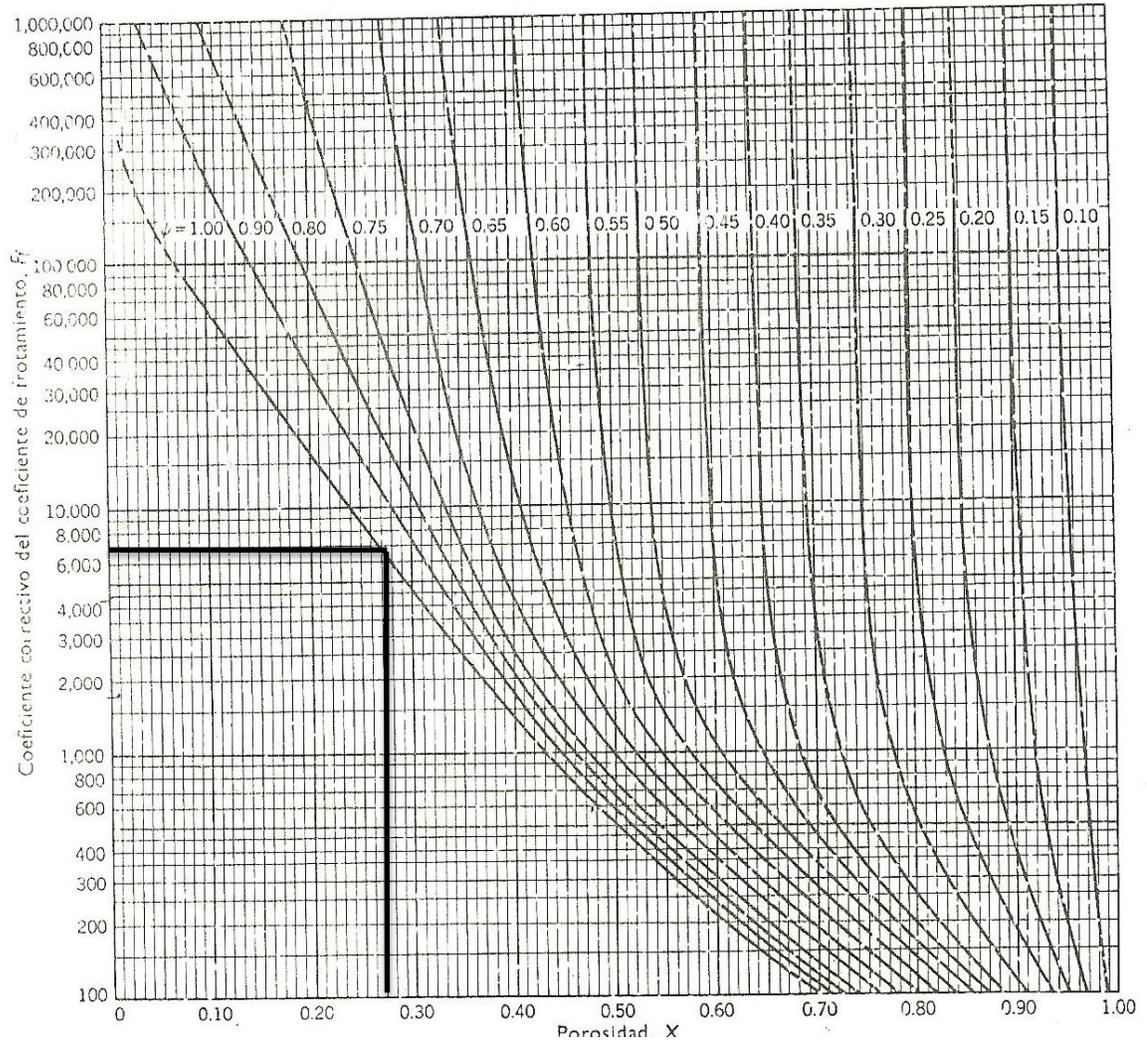


Fig.4.12. Gráfica con líneas rectas que muestran la porosidad en intersección con la esfericidad y valor del coeficiente correctivo del coeficiente de frotamiento para el tubo de 10 [mm] y esferas de 6 [mm].

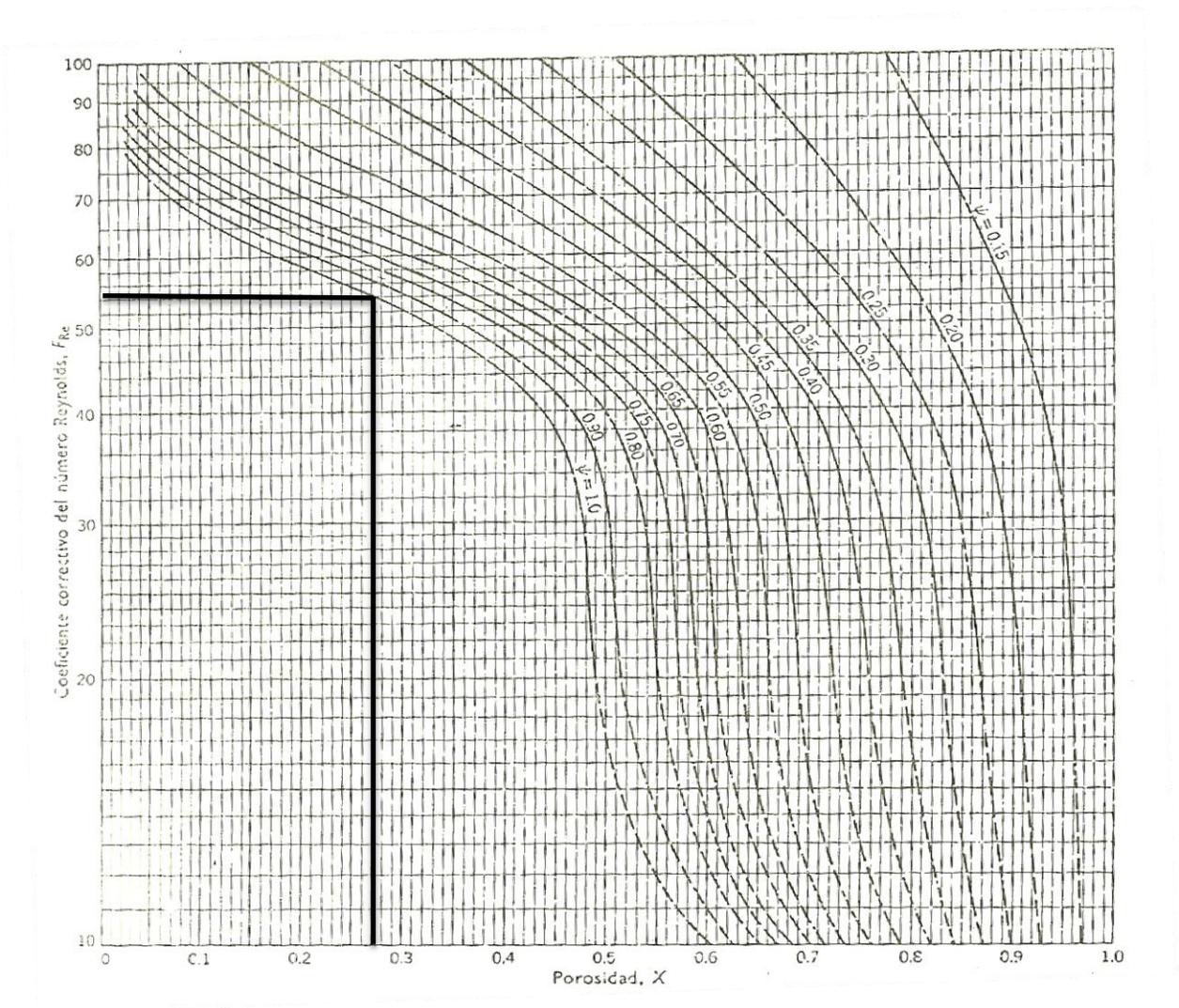


Fig.4.13. Gráfica con líneas rectas que muestran la porosidad en intersección con la esfericidad y valor del coeficiente correctivo del número de Reynolds, para el tubo de 10 [mm] y esferas de 6 [mm].

La gráfica correspondiente al flujo contra el Diferencial de se muestra en la fig.4.14, en la cual se puede observar que a pequeños cambios de flujo, la presión aumenta de manera notable.

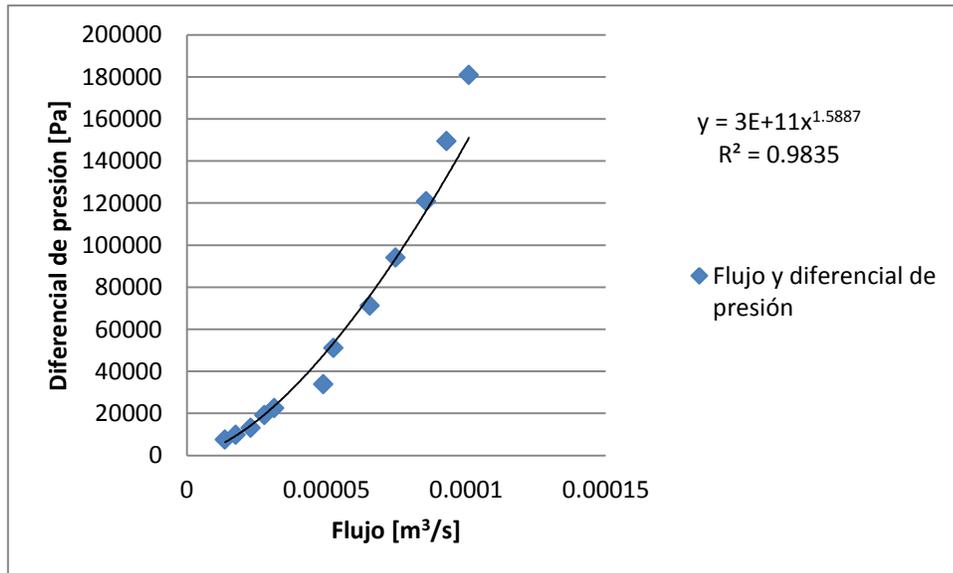


Fig.4.14. Gráfica del flujo y diferencial de presión para el CPC con tubería de 10 [mm] de diámetro y esferas de 6 [mm].

En la fig.4.15 se muestra la gráfica del número de Reynolds contra el factor de fricción, en la cual se aprecia que el factor de fricción dentro del CPC es bajo para números de Reynolds bajos, mientras que si el número de Reynolds aumenta esta tiende a hacerse asintótica.

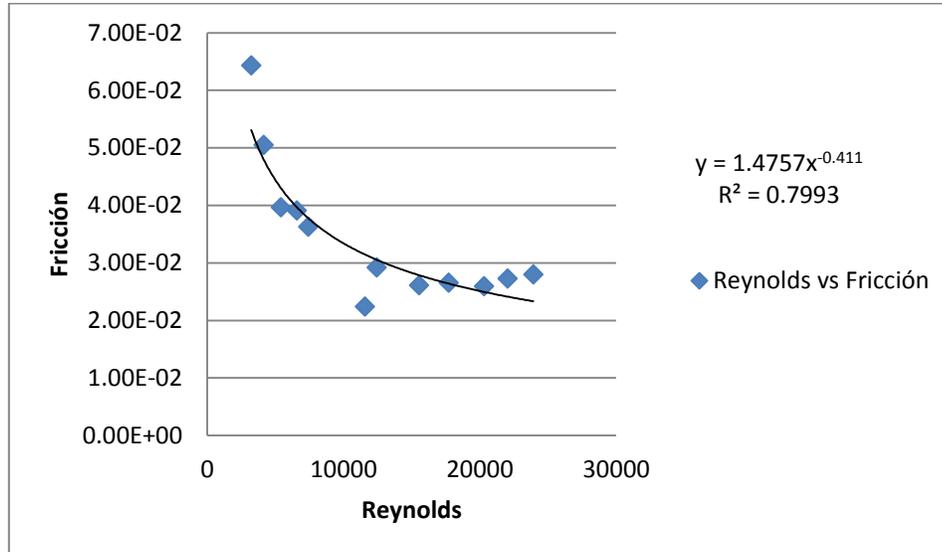


Fig.4.15. Gráfica del número de Reynolds y factor de fricción para el CPC con tubería de 10 [mm] de diámetro y esferas de 6 [mm].

4.3.2 Tubería de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm] de diámetro

Los parámetros que se utilizaron para el desarrollo del experimento con tubería de 25.4 [mm] y esferas de 10 [mm] se muestran en la tabla 4.1, los cuales dependen del programa utilizado.

El CPC que se utilizó se muestra en la fig.4.16, para esta prueba se utilizaron tubos de vidrio tipo boro-silicato de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm]. Al igual que en el caso anterior los tubos se hicieron en el taller de soplado de vidrio de la Facultad de Química.

| Parámetro | Valor | Unidades |
|--|--------|----------------------|
| Velocidad mínima | 0.05 | [m/s] |
| Velocidad máxima | 10 | [m/s] |
| Diámetro de la tubería donde se localiza el medidor de flujo | 0.75 | [in] |
| Diámetro de las esferas | 0.01 | [m] |
| Coefficiente correctivo del número de Reynolds | 10 | Adimensional |
| Viscosidad | 0.0012 | [Ns/m ²] |
| Densidad | 1000 | [kg/m ³] |
| Longitud total de la tubería | 13.158 | [m] |
| Gravedad | 9.78 | [m/s ²] |
| Coefficiente correctivo del coeficiente de frotamiento | 110 | Adimensional |
| Diámetro de la tubería del CPC | 0.0254 | [m] |

Tabla 4.1. Datos que se utilizan en el programa de adquisición de datos, los cuales se deben de conocer antes de iniciar el procesamiento para el tubo de 25.4 [mm] y esferas de 10 [mm].

Para las uniones dentro del CPC se utilizaron los codos de plástico, debido a que presentaban mejor resistencia al paso del flujo.



Fig.4.16. CPC con tubos de vidrio tipo boro-silicato de 25.4 [mm] de diámetro, esferas de 10 [mm] de diámetro y curvas de plástico.

De la tabla 4.1, al igual que en el experimento anterior para determinar la longitud total de la tubería se consideran siete tubos de 1.8 [m] de longitud y seis codos con una longitud equivalente de 0.093 [m].

En la tabla 4.2, se muestran los valores obtenidos para esta prueba en donde se emplean las ecuaciones 4.0, 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4, para la obtención de estos parámetros.

Las gráficas que se utilizaron para los valores del coeficiente correctivo del número de Reynolds y el coeficiente correctivo de frotamiento, al igual que en el apartado anterior se tomaron de las figs. 4.12 y 4.13, en las cuales se tomó el valor mínimo del coeficiente correctivo del número de Reynolds y el coeficiente correctivo de frotamiento, debido a que no existe intersección entre el valor de la porosidad y la esfericidad.

RESULTADOS

| Parámetro | Valor | Unidades |
|--------------|-----------------------|-------------------|
| L_{totalT} | 13.158 | [m] |
| N_{T_e} | 3932 | Adimensional |
| V_{T_e} | 2.05×10^{-3} | [m ³] |
| V_{T_t} | 6.66×10^{-3} | [m ³] |
| X | 0.7 | Adimensional |

Tabla 4.2. Parámetros para la prueba con el tubo de 25.4 [mm].

En la fig.4.17 se muestra la gráfica del flujo contra el diferencial de presión de la prueba realizada.

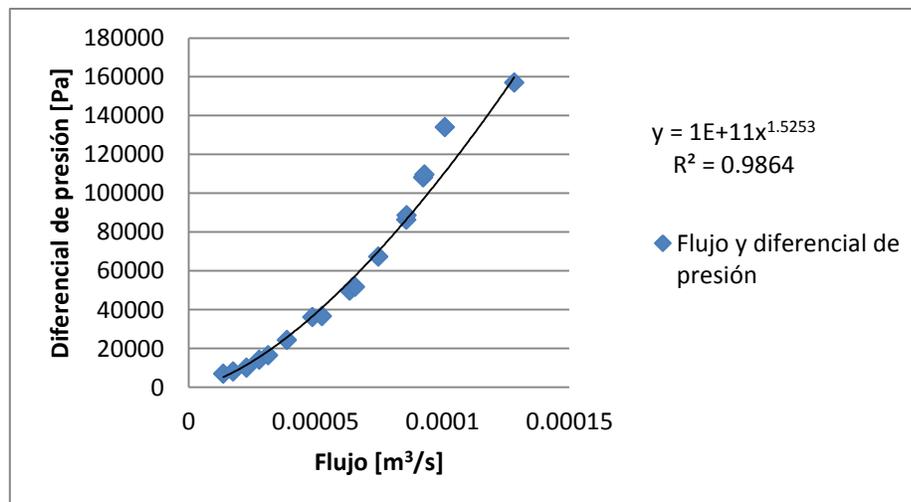


Fig.4.17. Gráfica de flujo y diferencial de presión para el tubo de 25.4 [mm] y esferas de 10 [mm] de diámetro.

El resultado del número de Reynolds y el factor de fricción para esta prueba se muestra en la fig.4.18.

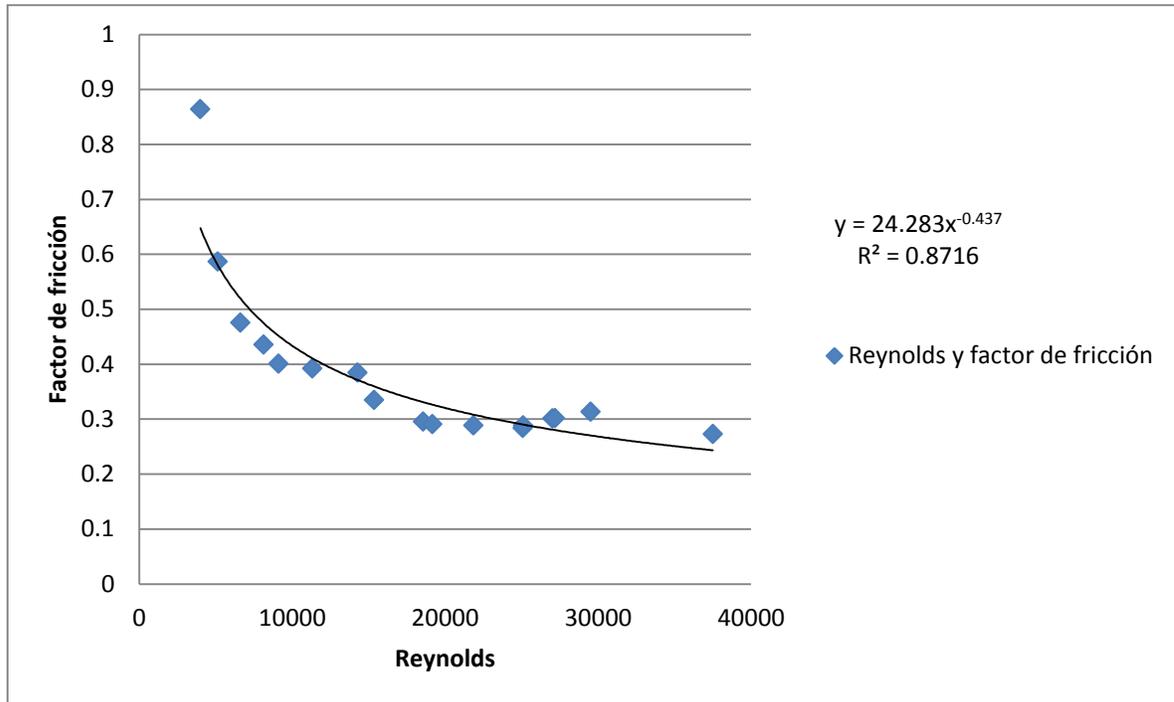


Fig.4.18. Gráfica de Reynolds y factor de fricción para el tubo de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm] de diámetro.

4.3.3 Comportamiento en una sola gráfica

Con base en los resultados de las pruebas recién presentadas, podemos comentar que los resultados que arrojan son similares en cuanto al comportamiento de la gráfica de Reynolds vs fricción, por lo que se puede comprobar que para las dos opciones de configuración existen similitudes, en el tubo de 25.4 [mm] y esferas de 10[mm] el factor de fricción aumentó, mientras que en las pruebas del tubo de 10 [mm] y esferas de 6[mm] el factor de

fricción disminuyó, esto aun cuando se sometió al mismo flujo. En la fig. 4.19, se muestran los resultados para las dos configuraciones del CPC, en donde además se incluye la porosidad (X).

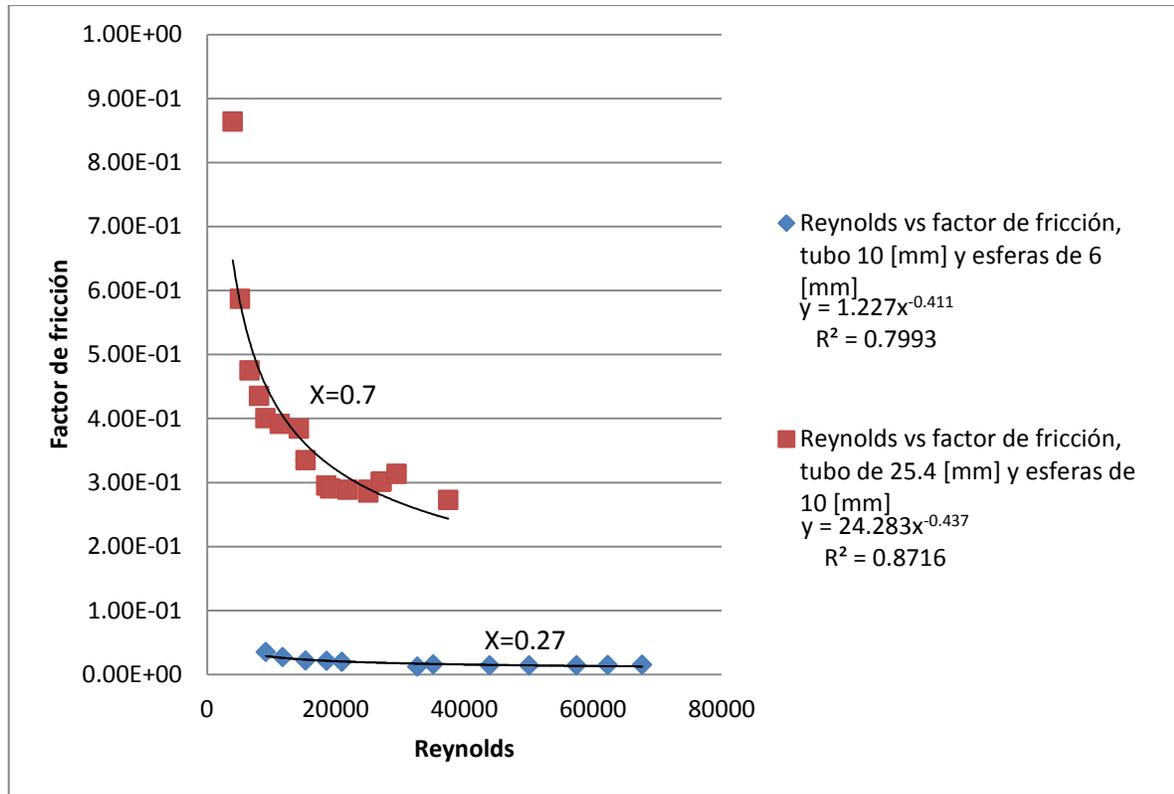


Fig.4.19. Gráfica de Reynolds y factor de fricción.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo se realizó la adaptación de un Concentrador Parabólico Compuesto para el proceso de fotocatalisis, esto por medio de la sustitución de la tubería de cobre con la que se contaba y reemplazarla por tubería de vidrio tipo boro-silicato.

Con tal fin, se diseñaron las uniones para este tipo de tubería, las cuales son de aluminio y llevan por dentro un O-Ring para su mejor acoplamiento y sellado de las partes.

Así mismo, se instrumentó para medir el flujo y así saber la caída de presión, tanto a la entrada como a la salida del sistema y lograr su medición por medio de un medidor de flujo.

En la Fig.4.21 se muestra que para el tubo de 25.4 [mm] y esferas de 10 [mm], el factor de fricción aumentó, esto se debe a que el número de esferas es mayor, por lo que debido al acomodo de éstas es en forma irregular y la fricción aumenta entre los espacios o huecos que dejan las esferas mientras que para el CPC con el tubo de 10 [mm] y esferas de 6 [mm], el acomodo que tuvieron las esferas, era prácticamente continuo, es decir que una estaba en contacto con la otra consecutivamente.

En las pruebas de longitud equivalente, se demostró que los codos sometidos al mismo flujo y a la misma presión, se comportaban como los tramos de tubos rectos del mismo diámetro y con diferentes número de esferas, por lo que para esta prueba se tomó como medida el máximo número de esferas que cabían dentro de los codos y se dividió en tercios, con lo cual se pudo obtener la medida del tramo de tubería recta para ambos casos.

Los parámetros óptimos de trabajo dependen de la cantidad de flujo que se entregue al sistema, debido a esto, la presión aumenta o disminuye dentro de la tubería con lo que se podría causar ruptura de la tubería, por lo tanto el parámetro de trabajo para la configuración del CPC con tubería de 10 [mm] y esferas de 6 [mm], el flujo puede trabajar desde

$1.3674 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{/s]}$ hasta $1 \times 10^{-4} \text{ [m}^3\text{/s]}$, mientras que para el CPC con tubería de 25.4 [mm] y esferas de 6 [mm] el flujo puede variar desde $1.37 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{/s]}$ hasta $1.28 \times 10^{-4} \text{ [m}^3\text{/s]}$.

Mientras que para la configuración con el CPC de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm], la presión y gasto varían desde $1.37 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{/s]}$ y 7002.53 [Pa] hasta $1.28 \times 10^{-4} \text{ [m}^3\text{/s]}$ y 156977 [Pa]

Los intervalos de operación más adecuados son para la configuración del CPC de 10 [mm] de diámetro y esferas de 6 [mm], y es con un flujo que va de $1.3674 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{/s]}$ y una presión de 7634 [Pa], hasta un flujo de $1 \times 10^{-4} \text{ [m}^3\text{/s]}$ y presión de 180904 [Pa].

Mientras que para la configuración con el CPC de 25.4 [mm] de diámetro y esferas de 10 [mm], la presión y gasto óptimos van desde $1.37 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{/s]}$ y 7002.53 [Pa] hasta $1.28 \times 10^{-4} \text{ [m}^3\text{/s]}$ y 156977 [Pa]

La mayor aportación de esta tesis es que para próximos proyectos de desintoxicación, se debe de tomar en cuenta la fricción que tienen las esferas en contacto con el agua, para poder cuantificar de manera más precisa con cuanto flujo se logra hacer mejor fotocatalisis y poder saber también el desgaste que va a tener el catalizador en contacto con el agua.

5.2 Recomendaciones

En las pruebas se trabajó en invierno con una temperatura de -2 [$^{\circ}\text{C}$], con lo cual se expandió el agua dentro del tubo hasta llegar a la congelación y con lo cual la tubería de vidrio tipo boro-silicato se rompió, por lo tanto no es recomendable tenerla llena de agua para condiciones de congelación del agua.

También se recomienda que las curvas de vidrio tipo boro-silicato sean cambiadas por curvas iguales de manguera de plástico, esto debido a que las primeras presentaban roturas después de un cierto tiempo de trabajo, debido a los esfuerzos presentados.

Otros tipos de esfuerzos que se presentaron fueron los causados por los O-Ring, éstos se redujeron con los rangos de flujo y presiones descritas en las conclusiones para las dos configuraciones del CPC, si se sobrepasa de esa cantidad de flujo y presión, en las uniones hay fugas por lo que no sería un sistema en régimen permanente.

Se recomienda trabajar con una temperatura ambiente máxima de 27 [$^{\circ}\text{C}$], debido a que el sistema no presenta ningún tipo de problema en cuanto a su funcionamiento.

Se recomienda utilizar el CPC con tubos de 25.4 [mm] y esferas de 10 [mm], debido a que el factor de concentración es de 1.85 , y ya que debido al proceso fotocatalítico, éste debe de ser igual a 1 ($C=1$); también se recomienda ya que el factor de fricción tiene más rango de operación, el cual opera desde 0.86 hasta 0.27 y el número de Reynolds también es mayor, tal como se muestra en la fig. 4.21.

Referencias

- [2] Batlles, F.J; Barbero, F.J.; López, G.; Pérez, M.; Rodrigo, F.S.; Rubio, M.A. “Radiación Solar y aspectos climatológicos de Almería, 1990-1996. Monografías Ciencia y Tecnología, Univ. De Almería, (1998).
- [3] May, E.K; Gee, R.; Wickham, D.T.; Lafloon, L.A.; Wright, J.D. “Desing and Fabrication of a Prototype Solar Reciever/Reactors for the solar Detoxification of Contaminated Water”. NREL Report. Industrial Solar Technology Corp. Golden, Colorado (1991).
- [4] Welford W.T., Winston R. “The optics of Non-Imagin Concentrators Light and Solar Energy”, Academic Press (1978)..
- [5] Collares-Pereira, M. “The relevance of No-Imaging optics for solar energy: a review”. Revista de Engenharia Tecnica, IST, No.. (1995).
- [6] R.S. Ramalho, “Tratamiento de aguas residuales”, Editorial Reverté, S.A.
- [8] INEGI, “Estadísticas a propósito del dia mundial del agua, (2006),pp1
- [9] Comisión Nacional del Agua, “Estadísticas del agua en México”, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México (2010), pp.108 y 109.
- [10] Comisión Nacional del Agua, “Estadísticas del agua en México”, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México (2010), pp.113.
- [11] Domínguez Martín Alejandra, Alarcón-Herrera Ma. Teresa, Martín Domínguez Ignacio R., González-Herrera Arturo , “Efficiency in the disinfection of water for human consumption in rural communities using solar radiation”, Solar Energy (2004).
- [12] Marques I*, M.F. Rosa', F. Mendesl, M. Collares Pereiral, J. Blanco, and S. Malato, “Wastewater detoxification of organic and inorganic toxic compounds with solar collectors” Malato2'INETI-ITE-DER (Biomassa), Estrah do Pqo do J,umiar, l699 Lisboa Codex, Portugal; an 2PSA (CIEMAT), Spain (1996).

- [13] Blanco Galvez Julián, “Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua”, Colección de documentos Ciemat (2002)
- [14] Crane, “Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías”, Mc. Graw-Hill, pp.2-11.
- [15] Clayton T. Crow, Donald F. Elger, Jhon A. Roberson, “Mecánica de fluidos”, Grupo editorial patria, México (2006).
- [16] Crane, “Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías”, Mc. Graw-Hill, pp.1-4.
- [18] W.E.McCabe, J.C.Smith, and P.Harriot, 2001, Unit Operations of Chemical Engineering, McGraw Hill, New York,pp. 222-224.
- [19] Ángeles, A. J., Análisis y síntesis cinemáticas de sistemas mecánicos, Limusa Wiley: Ciudad de México (1978).
- [20] Lehmann H.Charles, “Geometría analítica”, Editorial Limusa, México (1990), pp 149
- [21] Lehmann H.Charles, “Geometría analítica”, Editorial Limusa, México (1990), pp 99
- [22] McIntire, W.R ,Truncation of noimagin cusp concentrators, Solar Energy,23, pp. 351-355, (1979).
- [23] Blanco Galvez Julián, “Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua”, Colección de documentos Ciemat (2002), pp.147.
- [24] Blanco Galvez Julián, “Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua”, Colección de documentos Ciemat (2002),pp.149.

Mesografía:

- [1] Solar Energy, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy, 15/05/2011.

- [7] Cumbre de Johannesburgo, http://www.un.org/spanish/conferences/wssd/agua_ni.htm, (2002)
- [17] Biblioteca de la Universidad de Chile, [http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias quimicas y farmaceuticas/castroe08/01.html](http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_quimicas_y_farmaceuticas/castroe08/01.html), Sistemas de servicios de información y bibliotecas (SISIB).

ANEXO. Pantallas de la geometría del CPC en Maple

