

# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA Y NUCLEAR**

**Máster Universitario en Seguridad Industrial y Medio Ambiente**



## **CONTROL DE UNA PLANTA PILOTO PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO PERMEOSELECTIVO DE MEMBRANAS**

**TRABAJO FINAL DE MASTER**

**Presentada por:  
Guillermo Andrés González Montoya**

**Dirigida por:  
Dr. José Gozalvez Zafrilla  
Dr. José Luis Díez Ruano**

**Valencia, septiembre de 2012**

## ***Dedicatoria***

Dedico el presente trabajo a:

A mis padres y hermanos, por brindarme ese apoyo incondicional en todos los proyectos que he emprendido.

A la mujer que ahora se encuentra a mi lado por ese empuje anímico brindado cada día durante este proceso.

## ***Agradecimientos***

A los directores de máster por su máxima colaboración en tiempo y conocimiento.

A mis amigos que con sus palabras de ánimo lograban oxigenar las energías para seguir trabajando por el objetivo.

A todas las personas que de forma directa o indirectamente contribuyeron para culminar este trabajo.

## ÍNDICE

1. OBJETIVOS.....	6
2. INTRODUCCIÓN .....	7
2.1. GENERAL.....	7
2.1.1. La importancia de la tecnología de membranas .....	7
2.1.2. Importancia de los ensayos con planta de membranas .....	7
2.1.3. Necesidad de controlar los procesos.....	8
2.2. SITUACION ACTUAL.....	8
2.2.1. Descripción de una planta piloto de membranas.....	8
2.2.2. Forma de operación manual (planteamiento del problema) .....	10
2.3. ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN .....	10
3. DESCRIPCION DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA .....	12
3.1. TIPOS DE BOMBAS.....	12
3.1.1. Bombas rotodinámicas.....	13
3.1.2. Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas.....	15
3.2. BOMBA CENTRIFUGA .....	17
3.2.1. Modelo Matemático (Variación de las curvas características con la velocidad de rotación) .....	17
3.1.2. Superficie Característica .....	18
3.1.3. Ajuste del Modelo Matemático.....	20
3.3. BOMBA DE PISTONES O VOLUMÉTRICA.....	21
3.3.1. Curva Característica.....	22
3.3.2. Comportamiento del flujo (Modelo Matemático) .....	22
3.4. CIRCUITO HIDRAULICO (COMPONENTES) .....	24
3.4.1. Tuberías – Perdida de Carga (Factor de Fricción) .....	24
3.4.2. Válvulas .....	30
3.5. MEMBRANAS .....	32
3.5.1. Membrana Semipermeable.....	32
3.5.2. Clasificación de los procesos de membrana.....	34
3.5.3. Características generales de las membranas .....	38
3.5.4. Modelo de disolución-difusión: .....	39
3.5.5. Ventajas de los procesos con membranas.....	45
3.5.6. Desventajas de los procesos con membranas .....	45
3.5.7. Causas del ensuciamiento de las membranas .....	45

3.5.8. Consecuencias del ensuciamiento de las membranas .....	46
3.6. MODELOS MATEMATICOS DEL SISTEMA .....	46
3.6.1. Representación matemático de cada componente. ....	46
3.6.1. Componentes físicos instalados en la planta piloto.....	48
4. CONTROL DEL SISTEMA .....	58
4.1. ESQUEMA DE LA PLANTA A CONTROLAR .....	58
4.1. 1. Valores de los parámetros de los elementos del sistema.....	59
4.2. POSICIONAMIENTO INICIAL .....	60
4.2.1. Posicionamiento con una bomba centrífuga. ....	60
4.2.2. Posicionamiento con una bomba de pistones.....	61
4.4. CONTROL DE LA PLANTA – MODO DE FUNCIONAMIENTO.....	63
4.4.1. Modo 1: Velocidad de giro fija, Variar Presión, Obtener Caudal.....	63
4.4.2. Modo 2: Variar Presión, Variar Caudal, Obtener Velocidad .....	64
4.5. OTROS SISTEMAS DE CONTROL.....	65
4.5.1. Control Clásico.....	65
4.5.2. Control Difuso .....	68
5. INSTRUMENTACIÓN DE UNA PLANTA.....	70
5.1. Medidores de Caudales .....	70
5.2. Válvulas de Control.....	73
6. CONCLUSIONES .....	75
7. BIBLIOGRAFIA.....	76
8. ANEXOS .....	77

## 1. OBJETIVOS

- Identificar los diferentes elementos que conforman la planta.
- Generar modelos matemáticos que describan el comportamiento de cada elemento de la planta.
- Incluir las ecuaciones correspondientes a las pérdidas de carga en los elementos que componen la planta.
- Obtener el mejor sistema de ecuaciones que describan la planta en general.
- Modelar cada componente con datos y parámetros reales.
- Generar una estrategia de control que se adapte con precisión al sistema de la planta.
- Realizar pruebas en software de simulación.

## **2. INTRODUCCIÓN**

### **2.1. GENERAL**

El cuerpo humano, en su perfecta composición cuenta con una gran cantidad de procesos selectivos tanto biológicos como químicos en los cuales utiliza tejidos orgánicos denominados membranas que tienen una selectividad perfecta, en pro de lograr extraer los elementos necesarios para el auto-sostenimiento.

#### **2.1.1. La importancia de la tecnología de membranas**

Esto ha servido de inspiración para muchos investigadores que han logrado implementar técnicas de separación con una gran eficiencia, en diferentes procesos. Hoy en día esta tecnología de membrana se ha convertido en una parte importante en los procesos de separación utilizados en campos técnicos e industriales como el químico, farmacéutico, biológico, alimenticio, medio ambiente, etc. Debido a que generalmente pueden trabajar sin la adición de productos químicos, con un uso relativamente bajo de la energía y conducciones de proceso.

Cabe destacar que uno de los mayores usos de las membranas es a menudo para la obtención de agua tratada procedente de aguas subterráneas, superficiales o residuales, ya que han logrado posicionarse por sus interesantes resultados respecto a las técnicas convencionales. Aunque se han logrado grandes avances se hace necesario seguir investigando en este campo de tecnologías de membranas para lograr mejorar la eficiencia respecto a la permeo-selectividad y producción, vs el consumo energético. <sup>[1]</sup>

#### **2.1.2. Importancia de los ensayos con planta de membranas**

Sabemos que las membranas han alcanzado un status privilegiado en las técnicas de separación de elementos, tanto que han sido implementadas a escala industrial, especialmente en las plantas de desalación de aguas salobres y marinas, donde se instalan cientos de membranas configuradas de acuerdo a la necesidad y el dimensionamiento calculado. Sin embargo, este creciente éxito, no hubiera sido posible gracias al sin número de pruebas realizadas por los investigadores de diferentes centros para el avance de esta tecnología, en plantas pilotos, las cuales han permitido caracterizar los diferentes tipos de membranas construidas, y obtener los mejores resultados

posibles después de someter a estas membranas a diferentes condiciones que podrían presentarse a escala industrial.

De esta manera podemos decir que los ensayos en las plantas pilotos son prácticamente indispensables para obtener resultados prácticos y confiables que en el futuro servirían para hacer un fácil dimensionamiento para una planta de membranas a escala industrial.

### **2.1.3. Necesidad de controlar los procesos**

En multitudinarios procesos desarrollados ya sea en centros de investigación, diferentes industrias, o simplemente en las labores de la vida diaria, se hace necesario realizar un control, para lograr el o los objetivos deseados donde básicamente se podrían describir en 4 factores: Cantidad, Calidad, Tiempo y Costo.

En el ámbito ingenieril este control de los procesos ejecutados, se precisa como de vital importancia ya que se manejan constantemente variables como: temperatura, presión, flujo, caudal, viscosidad, densidad, humedad, entre otras más, donde un cambio inesperado de estas, puede alterar completamente el proceso, generando problemas desde paros en la producción de cierto producto hasta graves accidentes.

El objetivo del control de procesos es mantener básicamente en un determinado valor de operación las variables del proceso, ya que estos son de naturaleza dinámica, en los cuales siempre ocurren cambios y si no se emprenden las acciones pertinentes, las variables importantes del proceso, es decir, aquellas que se relacionan con la seguridad, la calidad del producto y los índices de producción, no cumplirán con las condiciones de diseño.

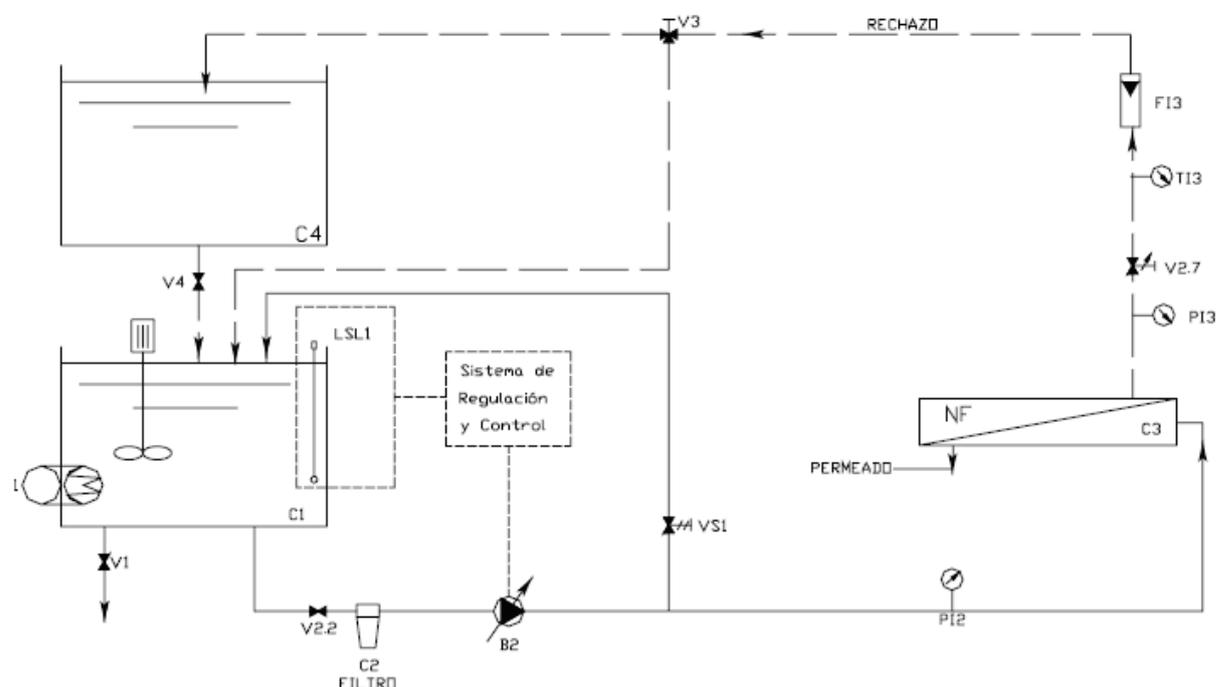
## **2.2. SITUACION ACTUAL**

### **2.2.1. Descripción de una planta piloto de membranas**

Una planta piloto es una unidad flexible que está diseñada para realizar estudios generalmente en todo el rango de tecnología de membranas (Micro Filtración, Ultra Filtración, Nano Filtración y Osmosis Inversa) bajo un amplio rango de condiciones operativas. La planta permite realizar pruebas con diferentes tipos de configuraciones de membranas (poliméricas, en espiral, tubulares o cerámicas, etc.), lo que permite la caracterización de estas.

Básicamente una planta piloto está compuesta de un circuito hidráulico en los cuales intervienen, tanques, válvulas de paso, filtros, medidores (sensores) de variables como: presión, flujo y/o caudal, viscosidad, conductividad, entre otras, una o varias maquinas hidráulicas (bombas), que disponen de un controlador de velocidad que junto con la información de los medidores permite analizar el comportamiento deseado de la membrana.

A continuación presentamos un diagrama de una planta piloto en el cual se dispone de un controlador de velocidad de la bomba así como de un rotámetro, para medir el caudal de rechazo de la planta, manómetros para medir la presión de trabajo, entre otros elementos.



VALVULAS DE BOLA DE PVC	V1, V2.1, V2.2, V4
VALVULAS DE PRESIÓN	V51
VALVULAS DE REGULACIÓN	V2.7
VALVULAS DE NIVEL	LV1
BOMBA CENTRIFUGA	B2
MANOMETROS	PI2, PI3
SONDAS DE NIVEL	LSL1
CAUDALIMETROS	F13
TERMOMETRO	TI3
SERPENTIN	S1
VALVULA DE TRES VIAS	V3
TANQUE DE ALIMENTACIÓN	C1
FILTRO DE CARTUCHO	C2
MÓDULO DE MEMBRANAS	C3
TANQUE DE CONCENTRADO	C4

**Figura 1:** Diagrama de flujo de la planta piloto.

**Fuente:** Beatriz E. Cuartas Uribe, Dra. M<sup>a</sup>. Isabel Alcaina Miranda, Dr. Enrique Soriano Costa, Estudio del proceso de Nanofiltración para la desmineralización de lactosuero dulce, UPV, Valencia, 2005.

### **2.2.2. Forma de operación manual (planteamiento del problema)**

Cuando se va a realizar un ensayo en una planta piloto de membranas, se prepara previamente un proceso a seguir que nos conllevara a la obtención de ciertos resultados esperados, este proceso conlleva efectuar cambios en las variables operativas que actúan sobre el sistema, como por ejemplo: abrir o cerrar gradualmente una válvula de paso, mover el variador de velocidad de giro de la bomba, variar la temperatura del fluido, entre otros, que acompañado de la toma de lecturas de los medidores, ayudan a ejercer un control general sobre el ensayo realizado en la planta. Sin embargo en la mayoría de los casos todos estos procesos para el control de las variables operativas y las medidas tomadas, se hacen de manera manual, que aunque han generado en muchas ocasiones resultados esperados, existe una gran posibilidad de tener los siguientes problemas:

- Poca precisión en la lectura de las variables operativas (sobre todo cuando se utilizan medidores que muestran una lectura no digital).
- Valores inesperados en la medición de los caudales, por una mala variación de giro de la bomba al momento de operar el variador de frecuencia.
- Falta o sobrepaso de tiempos de ejecución por utilizar “Timers” manuales (cronómetros).
- Cambios de presión inesperados por el cambio de posición manual de las válvulas de paso.

Estos, son los principales problemas que podrían presentarse a la hora de hacer una operación manual de la planta, que aunque pueden resultar insignificantes, combinados aumentan el porcentaje de imprecisión en los resultados obtenidos en el ensayo ejecutado, que si luego queremos dimensionar a escala industrial, así mismo se elevara dicho porcentaje.

### **2.3. ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN**

Se pretende diseñar un sistema de control para una planta piloto de membranas que tiene como variables de operación principales; Caudal de alimento y presión, para observar la respuesta de los parámetros más relevantes de la membrana (caudal de permeado, Concentración de permeado, rechazo) para lograr determinar un comportamiento optimo de esta.

Para esto empezaremos con el planteamiento de modelos matemáticos que describan de la mejor manera posible los elementos más relevantes del circuito hidráulico que componen la planta:

- Bombas
- Válvulas.
- Tuberías.
- Membrana.

A estos modelos matemáticos también se les incluye el comportamiento físico de la presión (Perdidas de carga) en cada uno de los componentes, para acercarse lo mejor posible a la realidad.

Con estos modelos matemáticos ya podemos realizar la modelización de la planta lo que permitirá generar una estrategia de control que se adapte a las necesidades. Esta estrategia de control se pondrá a prueba en software de programación y simulación para observar la respuesta del sistema ante la variación de las variables operativas por medio de gráficos y valores obtenidos de las diferentes variables que componen todo el sistema.

A partir de estos resultados obtenidos en la simulación del sistema, podemos hacer la selección de los equipos de medición para realizar la instrumentación de la planta, estos nos darán los valores de las variables de operación, parámetros controlables y variables de respuesta, estos valores o datos los recibirá el sistema control automático pueda proceder de cierta forma ante el comportamiento de las variables medidas. Dentro de la instrumentación hay un procedimiento que puede bien llamarse crítico que es la calibración de los sensores, porque uno de los objetivos que se busca al generar el control automático de la planta, es reducir considerablemente la imprecisión en la medición de las variables del sistema.

La estrategia de control seleccionada se puede implementar con gran precisión en un Dispositivo Lógico Programable PLC, el cual también nos dará la plataforma para generar el HMI- Interfaz Usuario Maquina, necesaria para diseñar nuestra estación de control y el manejo efectivo de esta.

Cabe destacar que en este trabajo solo se trabajará hasta la simulación del control sobre la planta y la selección de los posibles equipos de medición.

### **3. DESCRIPCION DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA**

Para poder lograr una correcta aplicación del control, y obtener los resultados esperados se debe modelar con la mayor precisión posible los elementos que componen el sistema (planta), desde el tipo de maquina hidráulica (bomba) a utilizar hasta la membrana que se utilizará para el proceso, pasando por las tuberías, válvulas, hasta la membrana.

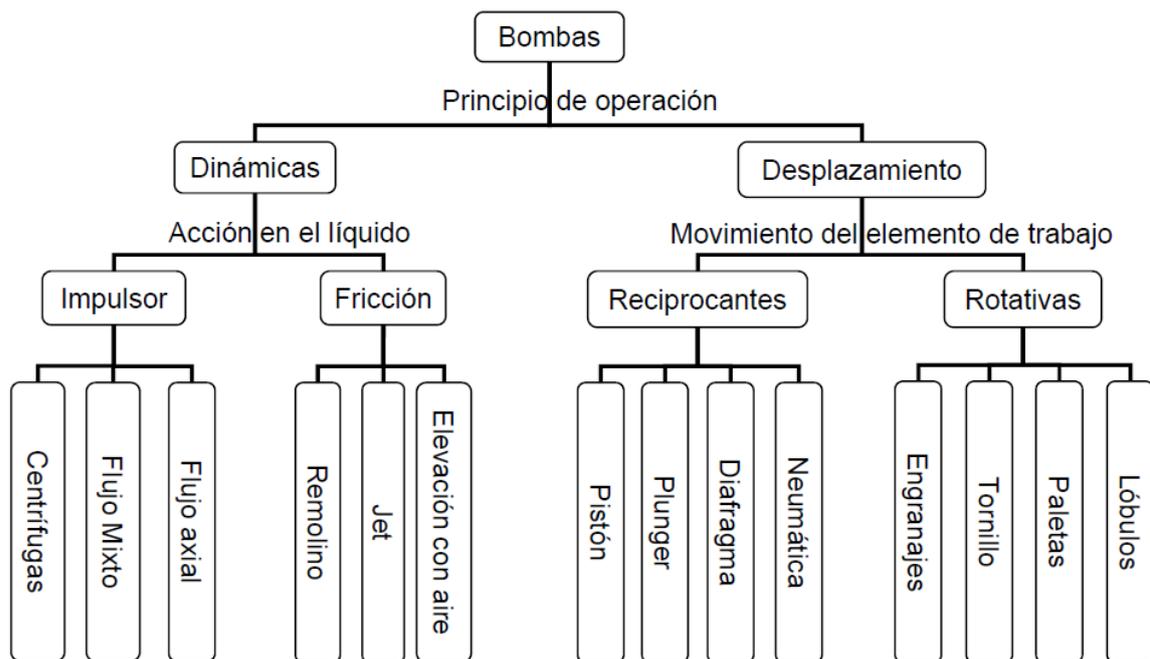
Esto conlleva a generar un desglose importante el cual serán evaluados cada uno de sus componentes y para al final encontrar una expresión matemática que describa todo el sistema. A partir de esto se pueden ejecutar un sin número de pruebas en software de simulación que nos permitirán conocer los comportamientos y adaptarlos para nuestro propósito.

Para empezar hablaremos de los tipos de bombas existentes, de las cuales haremos hincapié en la bomba centrífuga y la bomba de pistones, luego analizaremos el circuito hidráulico (tuberías, válvulas) y por ultimo de las membranas.

#### **3.1. TIPOS DE BOMBAS**

Una bomba hidráulica es una máquina generadora que transforma la energía generalmente mecánica con la que es accionada, en energía hidráulica del fluido incompresible que mueve. El fluido incompresible puede ser líquido o una mezcla de líquidos y sólidos. Al incrementar la energía del fluido, se aumenta su presión, su velocidad o su altura, todas ellas relacionadas según el principio de Bernoulli.

En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud. <sup>[2]</sup>



**Figura 2:** Clasificación de las bombas según el principio de operación.

**Fuente:** <http://es.scribd.com/doc/42267042/Una-bomba-es-una-maquina-hidraulica-generadora-que-transforma-la-energia>

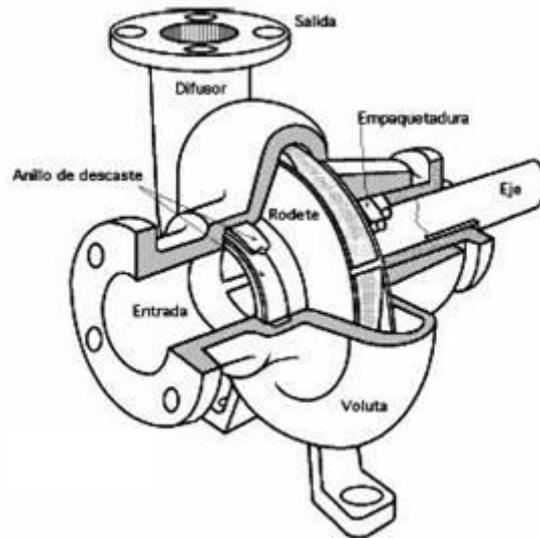
La principal clasificación de las bombas según el funcionamiento (principio de operación) en que se base:

### 3.1.1. Bombas rotodinámicas

Su principio de funcionamiento está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En este tipo de bombas hay uno o varios rodets con álabes que giran generando un campo de presiones en el fluido. En este tipo de máquinas el flujo del fluido es continuo. <sup>[2]</sup>

Estas turbomáquinas hidráulicas generadoras pueden subdividirse en:

- **Radiales o centrífugas**, cuando el movimiento del fluido sigue una trayectoria perpendicular al eje del rodete impulsor. <sup>[2]</sup>



**Figura 3:** Bomba radial de eje horizontal.

**Fuente:** <http://www.aiu.edu/publications/student/spanish/180-207/THERMODYNAMIC.html>

- **Axiales**, cuando el fluido pasa por los canales de los álabes siguiendo una trayectoria contenida en un cilindro. <sup>[2]</sup>



**Figura 4:** Bomba de flujo axial.

**Fuente:** [http://es.weirminerals.com/products\\_services/centrifugal\\_slurry\\_pumps/axial\\_flow\\_pumps/warman\\_q\\_pump.aspx](http://es.weirminerals.com/products_services/centrifugal_slurry_pumps/axial_flow_pumps/warman_q_pump.aspx)

- **Diagonales o helicocentrífugas**, cuando la trayectoria del fluido se realiza en otra dirección entre las anteriores, es decir, en un cono coaxial con el eje del rodete. <sup>[2]</sup>



**Figura 5:** Bomba helicocentrífuga.

**Fuente:** <http://www.directindustry.es/prod/itt-water-wastewater/bombas-helicocentrifugas-5698-792727.html>

### 3.1.2. Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas

Su principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen. En este tipo de bombas, en cada ciclo el órgano propulsor genera de manera positiva un volumen dado o cilindrada, por lo que también se denominan bombas volumétricas. <sup>[2]</sup>

En caso de poder variar el volumen máximo de la cilindrada se habla de bombas de volumen variable. Si ese volumen no se puede variar, entonces se dice que la bomba es de volumen fijo. A su vez este tipo de bombas pueden subdividirse en:

- **Bombas de émbolo alternativo**, en las que existe uno o varios compartimentos fijos, pero de volumen variable, por la acción de un émbolo o de una membrana. En estas máquinas, el movimiento del fluido es discontinuo y los procesos de carga y descarga se realizan por válvulas que abren y cierran alternativamente. Algunos ejemplos de este tipo de bombas son la bomba alternativa de pistón, la bomba rotativa de pistones o la bomba pistones de accionamiento axial. <sup>[2]</sup>



**Figura 6:** Bomba émbolo alternativo.

**Fuente:** <http://mundo-de-lobos.blogspot.com.es/2009/12/tipos-de-bomba.html>

- **Bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas**, en las que una masa fluida es confinada en uno o varios compartimentos que se desplazan desde la zona de entrada (de baja presión) hasta la zona de salida (de alta presión) de la máquina. Algunos ejemplos de este tipo de máquinas son la bomba de paletas, la bomba de lóbulos, la bomba de engranajes, la bomba de tornillo o la bomba peristáltica. <sup>[2]</sup>



**Figura 7:** Bomba émbolo alternativo.

**Fuente:** <http://mundo-de-lobos.blogspot.com.es/2009/12/tipos-de-bomba.html>

## 3.2. BOMBA CENTRIFUGA

Transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio llamado rodete, en energía cinética y potencial requerida. El fluido entra por el centro del rodete, que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa o cuerpo de la bomba, que por el contorno su forma lo conduce hacia las tubuladuras de salida o hacia el siguiente rodete (siguiente etapa). <sup>[3]</sup>



**Figura 8:** Bomba Centrífuga.

**Fuente:** [http://www.distriman.com/web/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=23&category\\_id=6&option=com\\_virtuemart&Itemid=3](http://www.distriman.com/web/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=23&category_id=6&option=com_virtuemart&Itemid=3)

El comportamiento de este tipo de bombas lo podemos describir por medio de sus curvas características que relacionan principalmente el caudal, la altura manométrica y la velocidad de giro.

### 3.2.1. Modelo Matemático (Variación de las curvas características con la velocidad de rotación)

La altura manométrica y el caudal de una bomba varían según la velocidad de rotación, dependiendo esta variación de las leyes de semejanza:

$$\frac{q}{q'} = \frac{n}{n'} \quad ; \quad \frac{H_m}{H'_m} = \frac{n^2}{n'^2} \quad \text{Ec. 1}$$

La ley de variación de  $H_m$ ,  $q$  y  $n$ , viene a su vez definida por la ecuación de las curvas características, de la forma:

$$H_m = A - Bq - Cq^2 \quad \text{Ec. 2}$$

En la que los valores de A y B son:

$$A = \frac{u_2^2}{g}, \quad u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60}, \quad A = \frac{1}{g} \left( \frac{\pi D_2 n}{60} \right)^2 = C_1 n^2; \quad \text{Ec.3}$$

$$C_1 = \frac{\pi^2 D_2^2}{3600g} = 2.7975 \times 10^{-4} D_2^2 \quad \text{Ec. 4}$$

$$B = \frac{\cotg \beta_2 u_2^2 \pi D_2 n}{g k_2 \Omega_2 60} = C_2 n \quad ; \quad \text{Ec. 5}$$

$$C_2 = \frac{\pi D_2 \cotg \beta_2}{60 g k_2 \Omega_2} = 5.3428 \frac{D_2 \cotg \beta_2}{k_2 \Omega_2} \quad \text{Ec. 6}$$

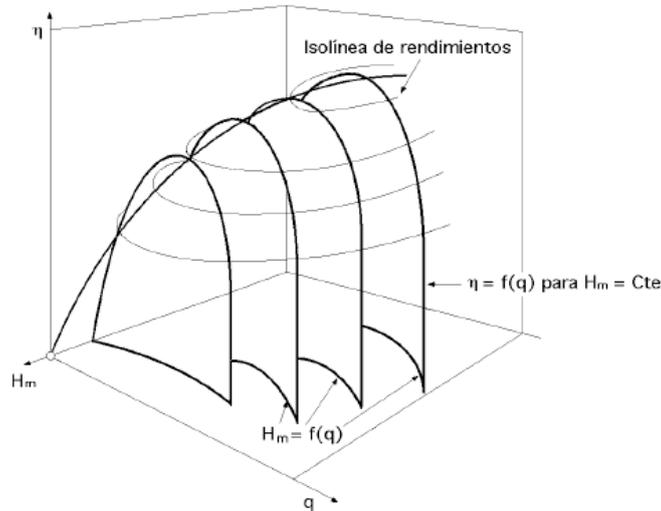
Por lo que el valor de Hm se obtiene en la forma:

$$Hm = C_1 n^2 - C_2 nq - Cq^2 \quad \text{Ec. 7}$$

Que es la ecuación de las curvas características, en la que  $C_1$  y  $C_2$  son constantes para cada bomba y C es otra constante propia de la bomba e independiente de la velocidad de giro. <sup>[4]</sup>

### 3.1.2. Superficie Característica

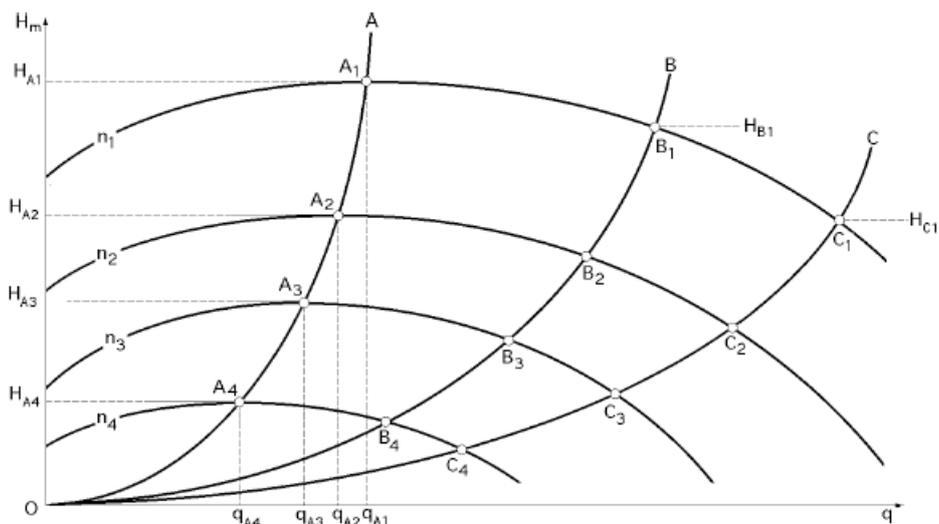
Tomando como ejes ortogonales Hm, q y n, la ecuación  $Hm$  resulta una superficie que es la característica de la bomba centrífuga, paraboloide hiperbólico; si en esta se considera la intersección con la familia de planos paralelos al (Hm, q), es decir, planos de ecuación,  $n=Cte$ , se obtiene una familia de parábolas que constituyen las curvas características de la bomba, a diversas velocidades de rotación, cuyas ecuaciones se deducen dando a  $n$  diversos valores, , parábolas que vienen determinadas por un parámetro de la forma  $p = \frac{C}{2}$ , que, para una bomba dada, es constante para toda la familia de curvas características, ya que C es independiente de la velocidad de rotación  $n$ . <sup>[4]</sup>



**Figura 9:** Representación espacial de las curvas características de una bomba.

**Fuente:** <http://bombasvolum.com/DATOS%20TECNICOS%20DE%20BOMBAS/cursodebombas.pdf>

De ello se deduce que las curvas características de una bomba dada correspondientes a distintas velocidades de rotación  $n$ , son congruentes. Si estas curvas características se proyectan sobre un plano paralelo al  $(H_m, q)$ , Figura 3, se obtiene una familia de parábolas congruentes, de forma que sus máximos  $A_1, A_2, A_3, \dots$  están a su vez sobre otra parábola (OA); asimismo, cada serie de puntos homólogos  $B_1, B_2, B_3, \dots, C_1, C_2, C_3, \dots$ , estarán sobre otras tantas parábolas (OB), (OC), .... Respectivamente. <sup>[4]</sup>



**Figura 10:** Proyección sobre el plano  $(H_m, q)$  de las curvas características de una bomba.

**Fuente:** <http://bombasvolum.com/DATOS%20TECNICOS%20DE%20BOMBAS/cursodebombas.pdf>

En efecto, dadas una serie de curvas características de una bomba, correspondientes a velocidades de giro  $n_1, n_2, n_3, \dots$ , y si en dichas curvas se consideran los máximos  $A_1, A_2, A_3, \dots$ , que corresponden a puntos homólogos  $(H_{mA1}, q_{A1}), (H_{mA2}, q_{A2}), (H_{mA3}, q_{A3}) \dots$ , respectivamente, las ecuaciones de semejanza quedan en la forma:

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{q_{A1}}{q_{A2}} = \frac{n_1}{n_2} \quad ; \quad \frac{H_{mA1}}{H_{mA2}} = \frac{n_1^2}{n_2^2} = \left(\frac{q_{A1}}{q_{A2}}\right)^2 \\ \frac{q_{A2}}{q_{A3}} = \frac{n_2}{n_3} \quad ; \quad \frac{H_{mA2}}{H_{mA3}} = \frac{n_2^2}{n_3^2} = \left(\frac{q_{A2}}{q_{A3}}\right)^2 \end{array} \right] \implies \frac{H_{mA1}}{q_{A1}^2} = \frac{H_{mA2}}{q_{A2}^2} = \dots = \frac{H_{mA}}{q_A^2} = k_A \quad \text{Ec. 8}$$

En donde  $k_A$  es una constante para todos los puntos homólogos  $A_1, A_2, A_3, \dots$  que estarán sobre una parábola (OA) de regímenes semejantes, (igual rendimiento), de ecuación:

$$H_{mA} = k_A * q_A^2 \quad \text{Ec. 9}$$

En la que la constante  $k_A$  se deduce conociendo uno cualquiera de estos puntos, dividiendo la altura manométrica del mismo por el cuadrado del caudal correspondiente. <sup>[4]</sup>

### 3.1.3. Ajuste del Modelo Matemático

El modelo matemático que describe el comportamiento de la bomba centrífuga, es una ecuación de segundo orden ( Ec. 7) que nos muestra que para conocer la ecuación que describe una planta en común, es necesario conocer unas constantes que por lo general son suministradas por el fabricante, sin embargo en muchas ocasiones estos datos no se encuentran en la hoja de características de las bombas, por lo que se hace necesario hacer ensayos en la planta que tenga instalada la bomba para poder hallar la ecuación más aproximada.

La idea es obtener una serie de puntos (generalmente formando una curva) que relacionan la altura manométrica con el Caudal (Hm,Q). Con estos puntos podemos aplicar el método de obtención de polinomios por medio de mínimos cuadrados, básicamente consiste en realizar una interpolación y aproximación de una función que luego se evalúa por el método de *Horner* para obtener la ecuación polinómica que más se ajuste a la curva.

### 3.3. BOMBA DE PISTONES O VOLUMÉTRICA

En la bomba de pistones o volumétrica, el desplazamiento del líquido se realiza mediante un proceso, en el que se verifica el desalojo periódico del líquido contenido en unas cámaras de trabajo, mediante un dispositivo que las desplaza, que es un órgano de trabajo, (pistón, engranaje, etc), con unos espacios que comunican, periódicamente, la cavidad de recepción del líquido o cámara de aspiración, con la cavidad de descarga o cámara de impulsión, pudiendo tener una o varias cámaras de trabajo.

El funcionamiento consiste en el paso periódico de determinadas porciones de líquido, desde la cavidad de aspiración, a la de descarga de la bomba, con un aumento de presión; el paso del líquido por la bomba volumétrica, a diferencia del paso por los álabes de una bomba centrífuga, es siempre más o menos irregular, por lo que en general, el caudal se considerará como el valor medio del caudal trasegado.

La cavidad de aspiración tiene que estar, siempre, herméticamente aislada de la de descarga o impulsión; a veces se puede admitir la existencia de pequeñas filtraciones de líquido a través de las holguras, deslizamiento, aunque en proporciones muy pequeñas frente al suministro de la bomba.

En general, todas las bombas volumétricas son autoaspirantes, o autocebantes, por lo que si comienzan a funcionar con aire, sin líquido, pueden llegar a crear una rarificación tan grande capaz de succionar al líquido por la tubería de aspiración, con la condición de que la altura geométrica de aspiración no sobrepase un cierto valor, propiedad que se puede perder cuando la hermeticidad o el número de revoluciones son insuficientes. <sup>[4]</sup>

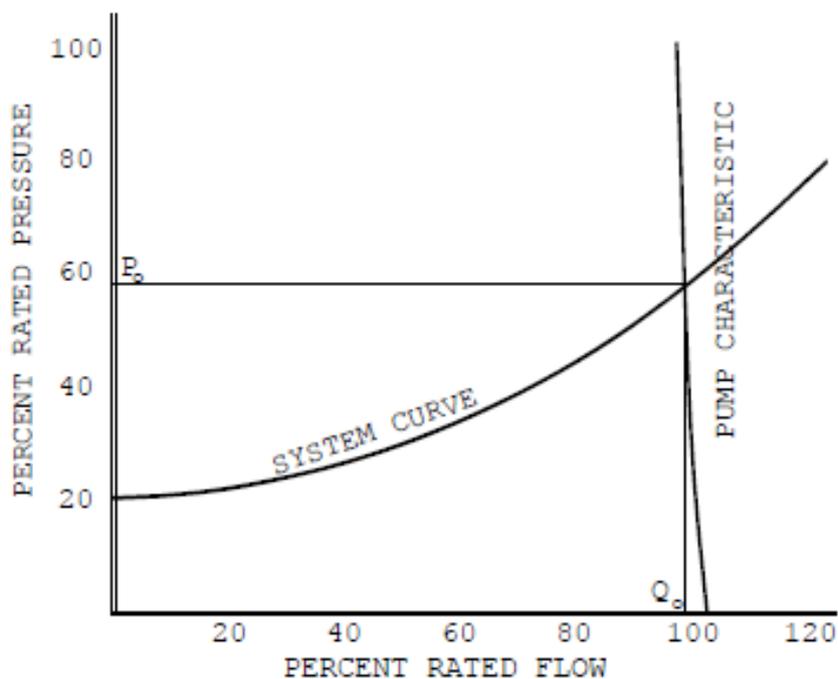


**Figura 11:** Proyección sobre el plano (Hm,q) de las curvas características de una bomba.

**Fuente:** [http://www.catpumps.com/products/pdfs/5CP2120W\\_F.pdf](http://www.catpumps.com/products/pdfs/5CP2120W_F.pdf)

### 3.3.1. Curva Característica

En general esta bomba es una bomba de desplazamiento positivo, la cual su curva característica es tan simple que raramente se dibuja. Es esencialmente una línea recta vertical, como se muestra en la Figura 11.



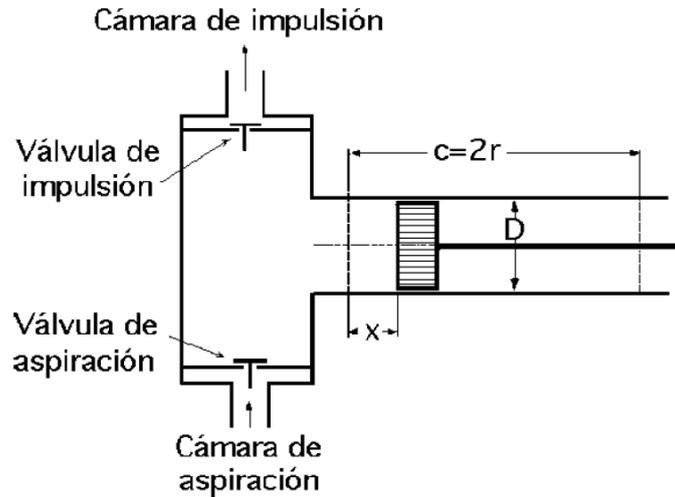
**FIGURA 12:** Curva característica de la bomba y curva del sistema

**Fuente:** [http://www.driedger.ca/ce2\\_pdp/CE2\\_PDP.html](http://www.driedger.ca/ce2_pdp/CE2_PDP.html)

Un examen detallado de la curva muestra una ligera rotación de las agujas del reloj. Esto es debido a las fugas internas. Para las bombas de desplazamiento positivo la principal causa de fugas es la pequeña cantidad de flujo inverso que se produce antes de que la válvula de retención se cierre y quizás pase. Las fugas a través del pistón son insignificantes.

### 3.3.2. Comportamiento del flujo (Modelo Matemático)

Para entender el funcionamiento de la bomba de pistones debemos analizarla como una máquina hidráulica donde su flujo volumétrico dependerá directamente del diseño sistema del embolo, para esto la describiremos como una bomba de embolo simple:



**Figura 13:** Diagrama del cilindro de una bomba de embolo simple.

**Fuente:** [http://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/mgilarra/Fluid/Transparencias%20Bombas.pdf](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/Fluid/Transparencias%20Bombas.pdf)

Potencia absorbida [bar] por la bomba a una velocidad  $n$  [rpm]:

$$Pot_{absorbida} (n[rpm]) \frac{Pot_{\acute{u}til}}{\eta_{total}} = \frac{H_{\acute{u}til} Q \rho g}{\eta_m \eta_h \eta_v} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde,

$\eta_m, \eta_h, \eta_v$  Son las eficiencias mecánica, hidráulica y volumétrica respectivamente.

$H_{\acute{u}til}$ , Altura útil de trabajo, o altura manométrica [m].

$Q$ , Caudal Útil [Lt/s].

Asimilando que los diámetros de las tuberías serán iguales o muy parecidos entre la entrada y la salida la altura útil  $H_{\acute{u}til}$  [m], se puede expresar como:

$$H_{\acute{u}til} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde,

$P_2, P_1$ , Son las presiones de salida y entrada de la bomba respectivamente [bar].

$\gamma = \rho g$ , relación entre la densidad  $\rho$ , y la gravedad  $g$  [m/s<sup>2</sup>]

La potencia útil [bar], (No depende de la densidad):

$$Pot_{\text{útil}} = \frac{\Delta P}{\gamma} Q \rho g = \Delta P * Q \quad \text{Ec. 12}$$

El caudal útil Q, el que se mide a la entrada o salida de la bomba, es el correspondiente al volumen barrido por los émbolos en su carrera efectiva disminuido en el pequeño caudal de pérdidas  $q_i$ , debido a que las válvulas no cierran herméticamente ni lo hacen en un instante. Llamando Z al número de émbolos y L la longitud recorrida por el embolo (carrera) tenemos que: <sup>[5]</sup>

$$Q = Z \frac{\pi D^2}{4} L \frac{n(rpm)}{60} - q_i \quad \text{Ec. 13}$$

Las pérdidas volumétricas  $q_i$  [Lt/s], pueden expresarse en función del incremento de presión alcanzado y de la velocidad de rotación: <sup>[5]</sup>

$$q_i = 7 * 10^{-6} * n * (AP)^{1,2} \quad \text{Ec. 14}$$

### 3.4. CIRCUITO HIDRAULICO (COMPONENTES)

Como ya sabemos, un circuito es una red que interconecta dos o más componentes en una trayectoria cerrada, un circuito hidráulico (también llamado circuito oleohidráulicos), transporta un fluido (en este caso líquidos), por medio de una serie de componentes como maquinas hidráulicas (bombas y cilindros), tuberías, válvulas, tanques, filtros. Al momento de operación se transmiten fuerzas muy intensas (altas presiones) debido a que no se pierde una energía considerable en los componentes que componen el circuito.

Hasta ahora solo hemos obtenido el modelo matemático las bombas más usadas en las plantas piloto de ensayos medioambientales, pero si queremos lograr una expresión matemática que describa el comportamiento total de la planta debemos analizar los otros componentes del circuito: tuberías y válvulas.

#### 3.4.1. Tuberías – Perdida de Carga (Factor de Fricción)

Las tuberías un papel importante en el transporte de fluidos desde un punto A, a un punto B, estas pueden ser rígidas o flexibles de acuerdo a la aplicación usada. Son fabricadas de diversos materiales como el polipropileno, Poliéster Reforzado con fibra de vidrio (PRFV), hierro fundido, acero, cobre, plomo, hormigón, PVC, polietileno de alta densidad (PEAD), etc.

Estas trabajando “a presión”, permiten conducir el fluido, aún a contrapendiente, para eso requieren de cierta cantidad de energía por unidad de peso, proporcionada por una unidad de bombeo.

Básicamente para la elección de un circuito de tuberías se debe hacer en función de dos parámetros: *caudal de circulación*, y *presión soportada por las paredes*, esto conlleva a realizar una serie de cálculos donde solo haremos hincapié en la fricción generada en las paredes de las tuberías lo que produce una *pérdida de carga*.

**Pérdida de carga:** Tiene lugar en una conducción y representa la pérdida de energía de un flujo hidráulico a lo largo de la misma por efecto del rozamiento. Para calcularla se emplea una serie de formulas empíricas como: Varonesse-Datei, Scobey (1931), Schimani (1925), Hazen-William (1905), Manning (1890), Darcy-Weisbach (1875), entre otras.<sup>[6]</sup>

Varonesse-Datei: Se emplea para tuberías de PVC y para  $4 \times 10^4 < Re < 10^6$ .

$$h = 9,2 \times 10^{-4} * \left( \frac{Q^{1,8}}{D^{4,8}} \right) * L \quad \text{Ec. 15}$$

Donde,

$h$ : Pérdida de carga o de energía [m].

$Q$ : Caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].

$L$ : Longitud de la tubería [m].

$D$ : Diámetro interno de la tubería [m].

Scobey (1931): Se emplea fundamentalmente en tuberías de aluminio en flujos en la zona de transición a régimen turbulento.

$$h = 4,098 \times 10^{-3} * K * \left( \frac{Q^{1,9}}{D^{1,1}} \right) * L \quad \text{Ec. 16}$$

Donde,

$h$ : Pérdida de carga o de energía [m].

$Q$ : Caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].

$L$ : Longitud de la tubería [m].

$D$ : Diámetro interno de la tubería [m].

$K$ : Coeficiente de rugosidad de Scobey (adimensional)

Schimmi (1925): Se emplea para tuberías de fibrocemento.

$$h = 9,84 \times 10^{-4} * \left( \frac{Q^{1,786}}{D^{4,786}} \right) * L \quad \text{Ec. 17}$$

Donde,

$h$ : Pérdida de carga o de energía [m].

$Q$ : Caudal [m<sup>3</sup>/s].

$L$ : Longitud de la tubería [m].

$D$ : Diámetro interno de la tubería [m].

Hazen-Willian (1905): El método de Hazen-Williams es válido solamente para el agua que fluye en las temperaturas ordinarias (5 °C - 25 °C).

$$h = 10,674 * \left[ \frac{Q^{1,852}}{(C^{1,852} * D^{8,871})} \right] * L \quad \text{Ec. 18}$$

Donde,

$h$ : Pérdida de carga o de energía [m].

$Q$ : Caudal [m<sup>3</sup>/s].

$L$ : Longitud de la tubería [m].

$D$ : Diámetro interno de la tubería [m].

$C$ : Coeficiente de rugosidad (adimensional)

Manning (1890): Las ecuaciones de Manning se suelen utilizar en canales. Para el caso de las tuberías son válidas cuando el canal es circular y está parcial o totalmente lleno, o cuando el diámetro de la tubería es muy grande.

$$h = 10,3 * n^2 * \left( \frac{Q^2}{D^{5,33}} \right) * L \quad \text{Ec. 19}$$

Donde,

$h$ : Pérdida de carga o de energía [m].

$Q$ : Caudal [m<sup>3</sup>/s].

$L$ : Longitud de la tubería [m].

$D$ : Diámetro interno de la tubería [m].

$n$ : Coeficiente de rugosidad (adimensional)

Darcy-Weisbach (1875): Esta es una de las fórmulas más exactas para cálculos hidráulicos. Sin embargo existe una complejidad en el cálculo del coeficiente "f" de fricción. La fórmula original es:

$$h = f * \left(\frac{L}{D}\right) * \left(\frac{v^2}{2g}\right) \quad \text{Ec. 20}$$

En función del caudal la expresión queda de la siguiente forma:

$$h = \frac{8L}{\pi^2 D^5 g} f * Q^2 \quad \text{Ec. 21}$$

$$f = f(Re, \varepsilon_r); \quad Re = \frac{D * v * \rho}{\mu}; \quad \varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{D}$$

El coeficiente de fricción  $f$  es función del número de Reynolds ( $Re$ ) y del coeficiente de rugosidad o rugosidad relativa de las paredes de la tubería ( $\varepsilon_r$ ).

Donde,

$h$ : Pérdida de carga o de energía [m].

$Q$ : Caudal [ $m^3/s$ ].

$L$ : Longitud de la tubería [m].

$D$ : Diámetro interno de la tubería [m].

$g$ : Aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ].

$v$ : Velocidad media [m/s].

$\rho$ : Densidad del agua [ $kg/m^3$ ].

$\mu$ : Viscosidad del agua [ $N*s/m^2$ ].

$\varepsilon$ : Rugosidad absoluta de la tubería [m].

**Factor de Fricción:** Para el cálculo de "f" existen múltiples ecuaciones, de las cuales las más importantes para el cálculo de tuberías son las siguientes: <sup>[6]</sup>

Blasius (1911): "f", viene en función de Reynolds, válida para tubos lisos, en los que  $\varepsilon$ , no afecta al flujo al tapar la subcapa laminar las irregularidades. Válida hasta  $Re < 100000$ .

$$f = 0,3164 * Re^{-0,25} \quad \text{Ec. 22}$$

Prandtl y Von-Karman (1930): Amplían el rango de validez de la fórmula de Blasius para tubos lisos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ec. 23}$$

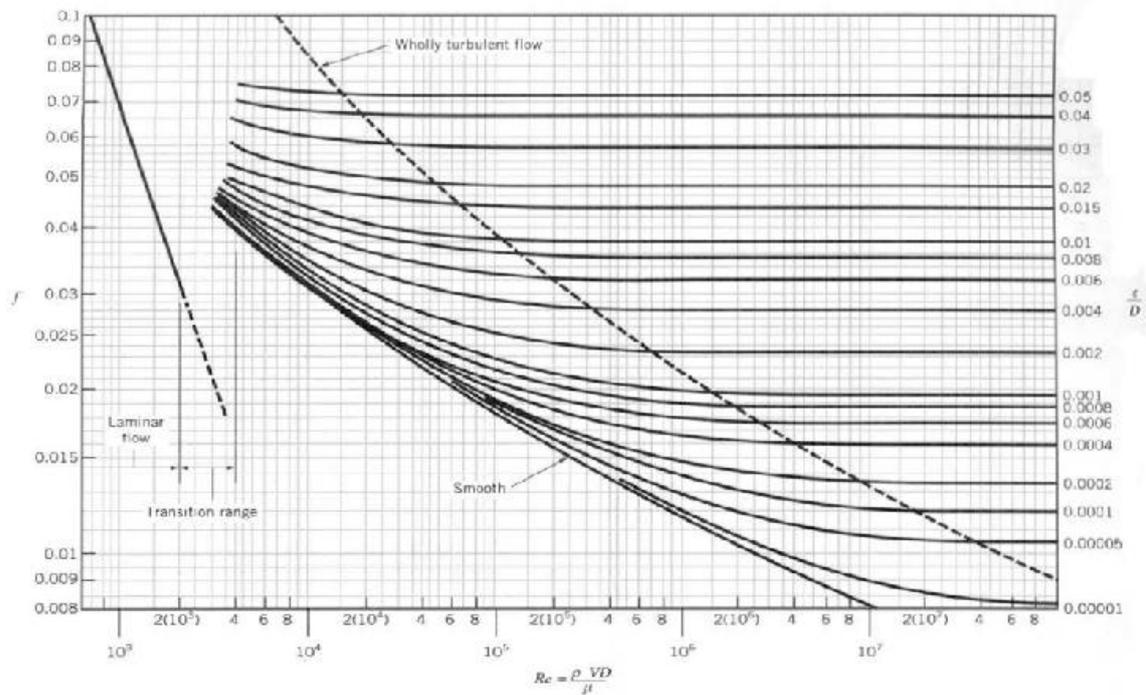
Nikuradse (1933): Propone una ecuación válida para tuberías rugosas:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,71 * D} \right) \quad \text{Ec. 24}$$

Colebrook-White (1939): Agrupan las dos expresiones anteriores en una sola, que es además válida para todo tipo de flujos y rugosidades. Es la más exacta y universal, pero el problema radica en su complejidad y en que *requiere de iteraciones*, sin embargo esta ecuación será la que utilizaremos para complementar la modelización del sistema.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,71 * D} + \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \right] \quad \text{Ec. 25}$$

Moody (1944): Consiguió representar la expresión de *Colebrook-White* en un ábaco de fácil manejo para calcular " *f* " en función del número de Reynolds (*Re*) y actuando la rugosidad relativa ( $\varepsilon_r$ ) como parámetro diferenciador de las curvas:



**Figura 14:** Diagrama de Moody para calcular el factor de fricción de Colebrook.  
**Fuente:** <http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp>

No podemos dejar por fuera del análisis la pérdida de Carga en singularidades puesto que además de las pérdidas de carga por rozamiento, se producen otro tipo de pérdidas que se originan en puntos singulares de las tuberías (cambios de dirección, codos, juntas...) y que se deben a fenómenos de turbulencia. La suma de estas pérdidas de carga accidentales o localizadas más las pérdidas por rozamiento dan las pérdidas de carga totales.

Salvo casos excepcionales, las pérdidas de carga localizadas sólo se pueden determinar de forma experimental, y puesto que son debidas a una disipación de energía motivada por las turbulencias, pueden expresarse en función de la altura cinética corregida mediante un coeficiente empírico (K):

$$h = K * \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad \text{Ec. 26}$$

- $h$ : Pérdida de carga o de energía [m].
- $K$ : Coeficiente empírico (adimensional).
- $g$ : Aceleración de la gravedad. [m/s<sup>2</sup>].
- $v$ : Velocidad media del flujo [m/s].

El coeficiente "K" depende del tipo de singularidad y de la velocidad media en el interior de la tubería. [6]

### 3.4.2. Válvulas

Una válvula (hidráulica) es un mecanismo que controla el funcionamiento de una instalación, esencialmente está destinada para: aislar tramos de la instalación, regular caudales y presiones y proteger a la instalación de sobrepresiones y/o subpresiones. Según la función que cumplan las válvulas, se les hace una clasificación generalmente de este tipo:

*Válvulas distribuidoras:* Encargadas de dirigir el flujo según la conveniencia. También pueden influir en el arranque de receptores, como pueden ser los cilindros; y gobernar a otras válvulas.

*Válvulas de presión:* También llamadas válvulas limitadoras de presión. Se les llama de esta forma porque limitan la presión de trabajo en el circuito, limitan la presión de la bomba y pueden funcionar como elemento de seguridad.

*Válvulas de cierre:* Este tipo de válvula tiene como objetivo impedir el paso de fluido hacia un sentido, mientras permite la libre circulación de fluido en el sentido contrario al obstruido.

*Válvulas de flujo:* Cuando deseamos variar la velocidad de un actuador, cilindro, etc, recurriremos siempre a las válvulas de flujo. [7]

### Pérdidas de carga en válvulas

Como cualquier otro elemento una válvula posee un coeficiente adimensional de pérdidas K. Para un tipo concreto de válvula K es función del grado de apertura ( $\theta$ ). [8]

$$K(\theta) = \frac{(h_L)_V}{(h_K)_V}; \quad K_Q = g * A^2; \quad \text{Ec. 27}$$

$$(h_L)_V = \frac{K(\theta)}{2g * A^2} * q^2 = K_Q(\theta) * q^2 \quad \text{Ec. 28}$$

$K_Q(\theta)$  (Dimensional [ $K_Q$ ]=Altura/Caudal<sup>2</sup>) se denomina Coeficiente de Pérdidas referido al caudal. [8]

- $K_Q(\theta)$  igual que  $K(\theta)$ , tiene un valor mínimo  $(K_Q)_0$  ó  $K_0$  cuando la válvula se halla completamente abierta ( $\theta = 100\%$ ).

- A medida que se cierra ( $\theta$  disminuye) va aumentando hasta hacerse infinito cuando la válvula se halla completamente cerrada ( $\theta = 0\%$ ).

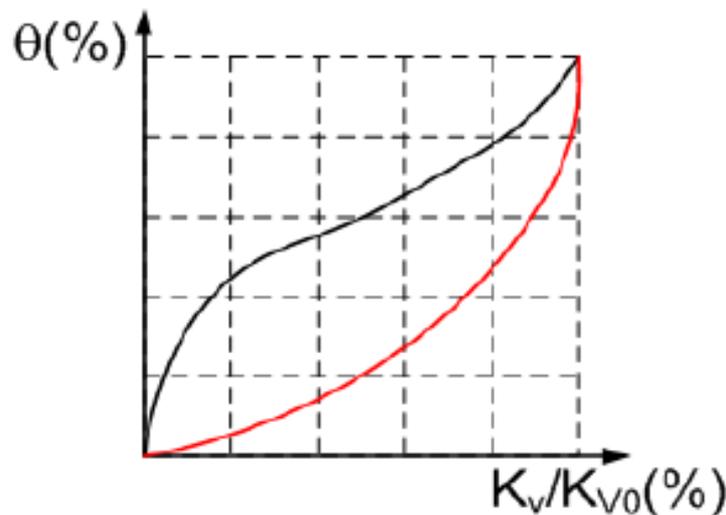
Para evitar trabajar con  $K_Q(\theta)$  y  $K(\theta)$ , que toman valores tan elevados cuando la válvula se halla casi cerrada, se introduce otro coeficiente (dimensional) denominado Coeficiente de Flujo  $K_V(\theta)$ :

$$K_V(\theta) = \frac{q}{\sqrt{\gamma \cdot (h_L)_V}}; \quad (h_L)_V = \frac{q^2}{\gamma \cdot K_V^2(\theta)} \quad \text{Ec. 29}$$

$$[K_V] = \frac{\text{Caudal}}{(\text{Presión})^{1/2}} \quad \text{Ec. 30}$$

El coeficiente  $K_V(\theta)$  presenta su valor máximo,  $K_{V0}$ , cuando se halla completamente abierta ( $\theta = 100\%$ ) y vale cero cuando se halla completamente cerrada ( $\theta = 0\%$ ).<sup>[8]</sup>

En algunas válvulas, destinadas a control, su fabricante proporciona  $K_V(\theta)$  mediante una gráfica semejante a la siguiente:



**Figura 15:** Gráfico de relación entre el porcentaje de apertura  $\theta(\%)$  y la relación el coeficiente  $K_V/K_{V0}(\theta)$

**Fuente:** [http://www.unav.es/adi/UserFiles/File/80980092/MF\\_Tema5\\_0809.pdf](http://www.unav.es/adi/UserFiles/File/80980092/MF_Tema5_0809.pdf)

Partiendo de la gráfica anterior, la Ec. 29 también la podemos expresar de la siguiente manera,

$$(h_L)_V = \frac{q^2}{\theta^2(\%) \cdot K_{V0}^2}; \quad K_v = \theta(\%) * K_{v0} \quad \text{Ec. 31}$$

En otras ocasiones se suele trabajar con otro coeficiente adimensional denominado Coeficiente de descarga  $C_d(\theta)$  que se define como:

$$C_d(\theta) = \frac{v}{\sqrt{2g*(h_L)_V+V^2}} \quad \text{Ec. 32}$$

Relacionado con K como:

$$C_d(\theta) = \frac{1}{\sqrt{1+K(\theta)}} \quad \text{Ec. 33}$$

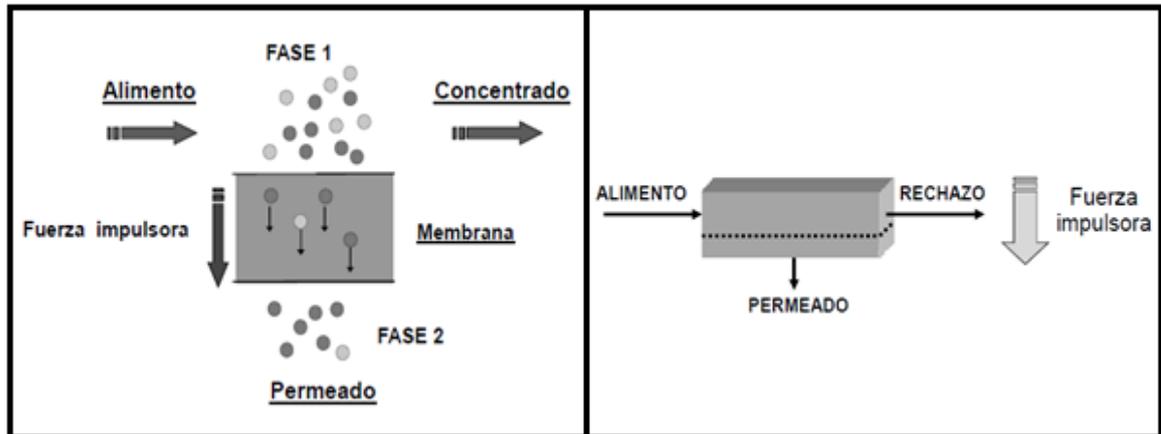
### **3.5. MEMBRANAS**

#### **3.5.1. Membrana Semipermeable**

Una “membrana semipermeable” también llamada membrana selectivamente permeable, es una barrera selectiva que permite el paso de ciertas moléculas o iones, a través de ella por medio de la difusión, mientras que impide o restringe el paso de otras sustancias. El índice del paso depende de la concentración, temperatura, presión osmótica, gradiente electroquímico de las moléculas o de los solutos, así como la permeabilidad de la membrana para cada soluto.

Podemos resumir diciendo que el “transporte selectivo” realizado por estas membranas, se debe a diferencias en la carga eléctrica o el tamaño molecular.

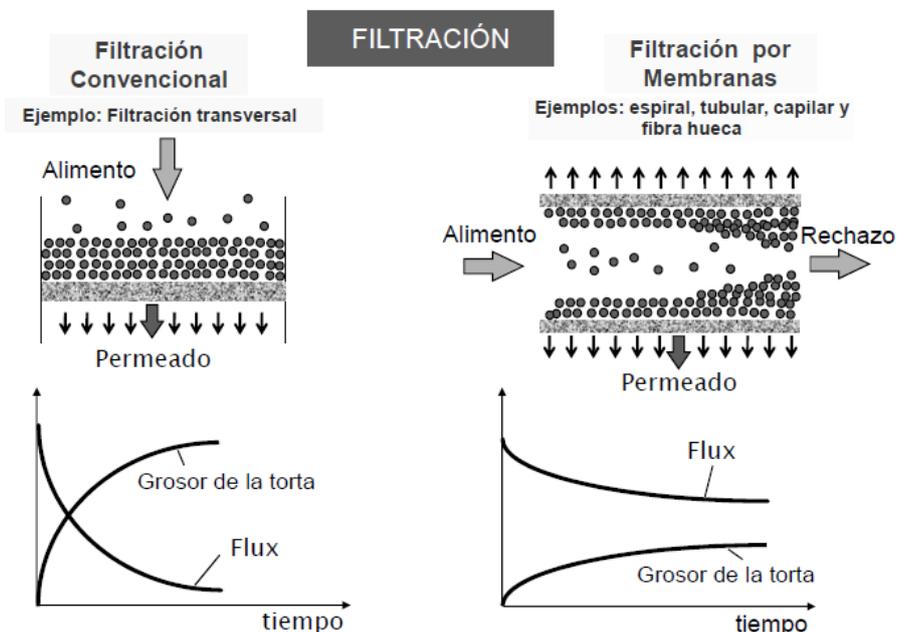
El grafico siguiente nos muestra un esquema de cómo se comporta dicho transporte selectivo;



**Figura 16:** Transporte selectivo de una membrana semipermeable

**Fuente:** Material de trabajo. Ingeniería de los Procesos de Membrana, M<sup>a</sup> Isabel Alcaina Miranda, Silvia Álvarez Blanco, María Sancho Fernández

A diferencia de la filtración convencional, la presión ejercida no se hace directamente sobre la superficie selectora si no que se hace longitudinalmente a las paredes de la membrana, tal como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 17:** Comparación con la filtración convencional

**Fuente:** Material de trabajo. Ingeniería de los Procesos de Membrana, M<sup>a</sup> Isabel Alcaina Miranda, Silvia Álvarez Blanco, María Sancho Fernández.

### Aplicaciones de la separación por membranas

- **Concentración:** Cuando el componente deseado se encuentra a baja concentración, y es el disolvente de la corriente que se elimina en el proceso (permeado).

- **Purificación:** Las impurezas (componentes indeseables) se eliminan bien en la corriente de permeado o en el rechazo.
- **Fraccionamiento:** Cuando una mezcla se separa en dos o más componentes deseados.

### 3.5.2. Clasificación de los procesos de membrana

Los procesos de membranas se caracterizan por usar una membrana para llevar a cabo una separación específica.

La membrana transporta más fácilmente un componente que otro debido a diferencias entre las propiedades **físico-químicas** de la membrana y las especies permeantes.

Sin embargo, los procesos de membrana se pueden clasificar atendiendo a diferentes aspectos de la separación: La fuerza impulsora que soportan, Mecanismo de separación por el que actúan, Naturaleza química de la capa activa de la membrana, Estructura de la sección transversal.<sup>[9]</sup>

#### Clasificación según la fuerza impulsora

El transporte a través de una membrana se debe a la acción de una **fuerza impulsora** que actúa sobre el lado del alimento (Fase 1 - Tabla 1), y cuya magnitud de forma general es proporcional a la velocidad de permeación. La relación de proporcionalidad entre el flux (J) y dicha fuerza impulsora viene dada por:

$$J = -A * \frac{dX}{dx} \quad \text{Ec. 34}$$

Donde

$A$ , Coeficiente fenomenológico.

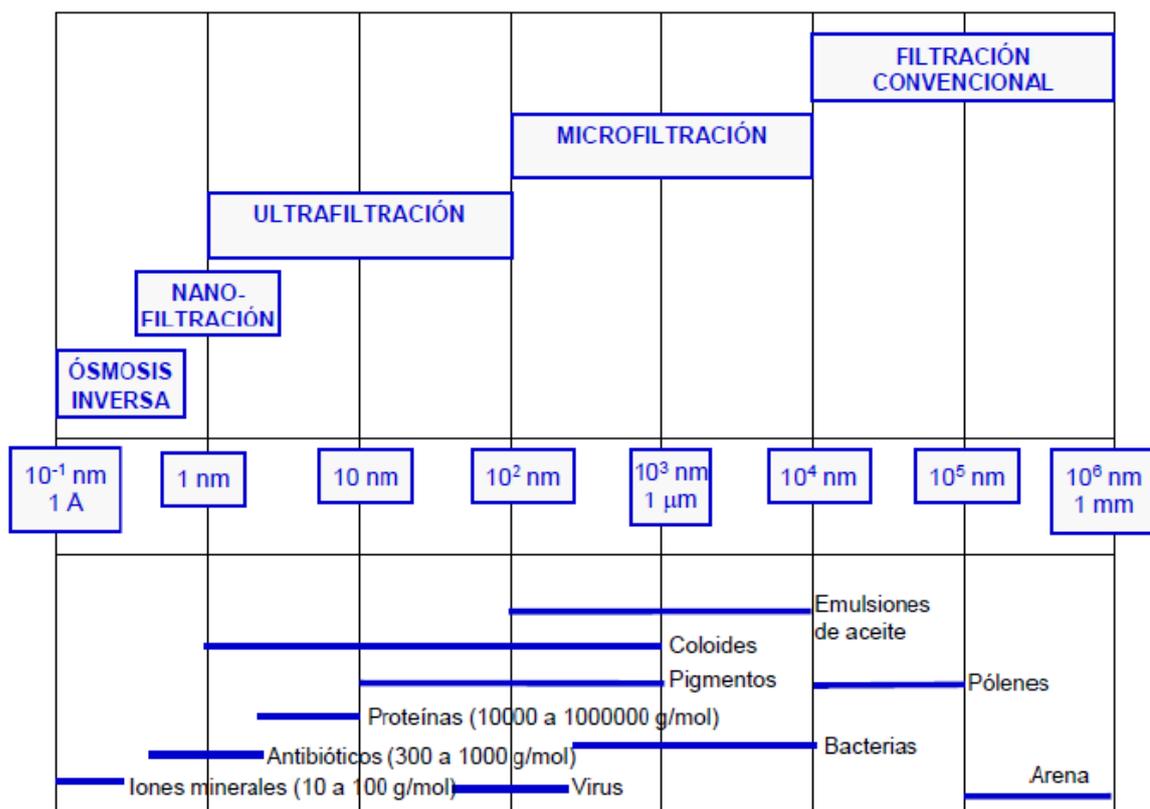
$\frac{dX}{dx}$ , Fuerza Impulsora

La “membrana” actúa como una interface en la cual una partícula o molécula permea experimentando una resistencia al transporte.<sup>[9]</sup>

PROCESO	FASE 1	FASE 2	FUERZA IMPULSORA
Microfiltración	L	L	$\Delta P/\Delta x$
Ultrafiltración	L	L	
Nanofiltración	L	L	
Osmosis inversa	L	L	
Diálisis	L	L	$\Delta c/\Delta x$
Electrodialisis	L	L	$\Delta E/\Delta x$
Pervaporación	L	G	$\Delta p/\Delta x$
Separación gases	G	G	

**Tabla 1:** Relación entre el proceso de filtración de membrana con la fuerza impulsora

**Fuente:** Material de trabajo. Ingeniería de los Procesos de Membrana, M<sup>a</sup> Isabel Alcaina Miranda, Silvia Álvarez Blanco, María Sancho Fernández.



**Figura 18:** Intervalo de separación de los procesos de membrana.

**Fuente:** Material de trabajo. Desalación de Aguas, Jaime Lora García.

Operaciones de Presión: Estas son operaciones donde la fuerza impulsora es una diferencia de presión a través de la membrana.

La tecnología de membranas está constituida por los procesos de: Microfiltración, Ultrafiltración, Nanofiltración, Osmosis Inversa, que utilizan esta diferencia de presión como fuerza impulsora para realizar el proceso de filtración. [9]

<b>Tecnología de membrana</b>	<b>Tamaño de poro (µm)</b>	<b>Presión de trabajo(Bar)</b>
Microfiltración	0.1 – 10	0.5 – 2
Ultrafiltración	0.005- 0.05	0.5 – 5
Nanofiltración	0.0005-0.005	5 – 15
Osmosis Inversa	<0.001	5 – 80

**Tabla 2:** Tecnología de membrana, tamaño de poro y presión de trabajo.

**Fuente:** Material de trabajo. Ingeniería de los Procesos de Membrana, M<sup>a</sup> Isabel Alcaina Miranda, Silvia Álvarez Blanco, María Sancho Fernández.

### Procesos impulsados por presión

Los procesos de filtración con membranas; MF, UF, NF, OI, efectivamente se hace necesario generar una presión de trabajo, sin embargo la cantidad de esta depende directamente si la estructura física de la membrana es porosa o densa. [9]

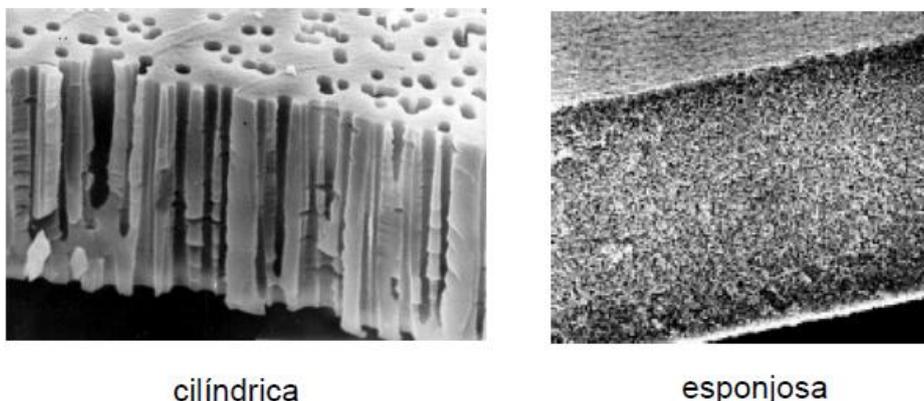
La siguiente tabla nos muestra el tipo de estructura de la membrana usada para cada proceso y su material de construcción;

<b>Tecnología de membrana</b>	<b>Estructura de la membrana</b>	<b>Material de la membrana.</b>
Microfiltración	POROSAS	Poliméricos Cerámicos
Ultrafiltración	POROSAS	PS y PAN Óxidos Zr y Al
Nanofiltración	POROSAS	AC, PA, PVA
Osmosis Inversa	DENSAS	AC, PA

**Tabla 3:** Tecnología, Estructura y material de la membrana.

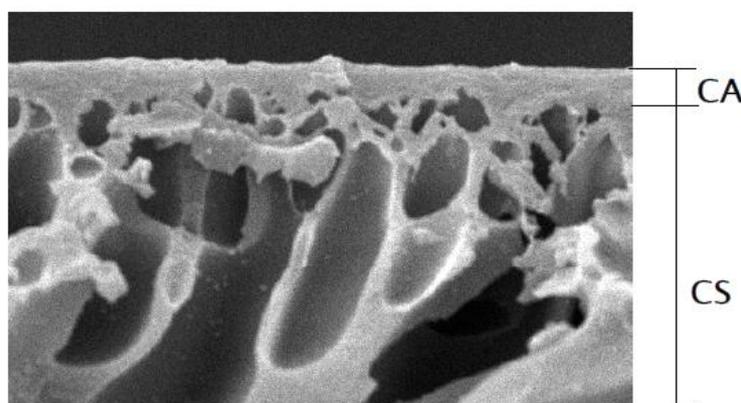
**Fuente:** Material de trabajo. Ingeniería de los Procesos de Membrana, M<sup>a</sup> Isabel Alcaina Miranda, Silvia Álvarez Blanco, María Sancho Fernández.

Membranas Porosas: Son aquellas cuyo tamaño de poro se encuentra entre 0.0005 a 0.1  $\mu\text{m}$ . Su estructura de poro puede ser **simétrica o asimétrica**, este tipo de membranas es usado en procesos como Microfiltración, Ultrafiltración y Diálisis.



**Figura 19:** Membrana Semipermeable porosa simétrica: Lado izquierdo: forma de poro cilíndrico, Lado derecho: forma de poro esponjosa.

**Fuente:** Material de trabajo. Ingeniería de los Procesos de Membrana, M<sup>a</sup> Isabel Alcaina Miranda, Silvia Álvarez Blanco, María Sancho Fernández.



**Figura 20:** Membrana Semipermeable porosa asimétrica.

**Fuente:** Material de trabajo. Ingeniería de los Procesos de Membrana, M<sup>a</sup> Isabel Alcaina Miranda, Silvia Álvarez Blanco, María Sancho Fernández.

Membranas densas: Son aquellas cuyo tamaño de poro es menor a 0.01  $\mu\text{m}$ . Tiene una subestructura porosa asimétrica y una capa activa densa. Este tipo de membrana es usado para procesos de Nanofiltración y Osmosis Inversa.



**Figura 21:** Membrana Semipermeable densa.

**Fuente:** Material de trabajo. Ingeniería de los Procesos de Membrana, M<sup>a</sup> Isabel Alcaina Miranda, Silvia Álvarez Blanco, María Sancho Fernández.

### 3.5.3. Características generales de las membranas

Las membranas deben reunir una serie de características como son:

- BUENA SELETIVIDAD
- ELEVADA PERMEABILIDAD
- ESTABILIDAD

#### **Selectividad**

Es la característica más importante de las membranas y determina la capacidad de la misma para “rechazar” partículas, moléculas o iones (dependiendo del proceso).

Las membranas de OI deben rechazar un porcentaje de sales elevado para que el producto (permeado) sea de buena calidad.

#### **Permeabilidad**

Depende de varios factores como son:

- Espesor de la membrana (La permeabilidad es inversamente proporcional al espesor).
- Dimensión de los poros (y su distribución en la superficie de la membrana)
- Condiciones hidrodinámicas (velocidad de flujo del alimento).

- Polarización por concentración (ya que este fenómeno disminuye el caudal de permeado (agua) a través de la membrana).

## Estabilidad

Una membrana debe tener:

- Estabilidad térmica frente a la temperatura.
- Estabilidad mecánica frente a las presiones de operación Las de PA prácticamente no toleran el cloro (> 0,1ppm).
- Es importante la tolerancia de las membranas al cloro libre, que varía mucho de unas membranas a otras.
- Las de AC tienen mayor tolerancia (hasta 1ppm).
- Estabilidad química frente al pH y los agentes químicos. <sup>[9]</sup>

### 3.5.4. Modelo de disolución-difusión:

Considera un *mecanismo de tipo difusivo* en el que todas las especies (soluto y disolvente) se disuelven en la membrana y difunden a través de ella de manera similar como lo harían a través de un sólido o de un líquido bajo la acción de un gradiente de concentración o de presión.

El modelo de disolución-difusión se aplica relativamente bien en ósmosis inversa, no siendo aconsejado para nanofiltración, donde una parte importante del transporte se lleva a cabo por **mecanismos no difusivos**, por ello muchas de las investigaciones se realizan en base al modelo de Kedem-Spiegler. <sup>[10]</sup>

Este modelo tiene *dos parámetros* relacionados con los parámetros físicos de la membrana y del fenómeno de transporte:

#### **Coefficiente de permeabilidad del disolvente (A)**

Coincide con el valor de  $L_p$  del modelo fenomenológico de Kedem-Spiegler. Este depende de la concentración y difusividad del disolvente a través de la membrana, del coeficiente de distribución (solubilidad), del espesor efectivo de la membrana, y del volumen molar parcial del agua en disolución. El valor de A, en OI, oscila entre  $5 \cdot 10^{-2}$  y  $5 \cdot 10^{-1}$   $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot bar^{-1}$  (disminuyendo su valor al ser la membrana más densa, en nanofiltración los valores serán mayores). <sup>[10]</sup>

## **Coefficiente de permeabilidad (B)**

Depende de la difusividad del soluto a través de la membrana, espesor efectivo de la membrana, y del coeficiente de partición, K, entre la membrana y la disolución. Los valores de B para cloruro sódico se encuentran dentro del rango  $5 \cdot 10^{-10}$  y  $0.1 \cdot 10^{-10}$   $L \cdot m^2 \cdot h^{-1}$ . [10]

Atendiendo a los valores de los coeficientes A y B, para conseguir una separación eficaz a una presión de trabajo establecida, interesa tener una membrana que posea un coeficiente A lo más alto posible (alta afinidad por el disolvente), mientras que el coeficiente B debe ser lo más bajo posible (poca afinidad por el soluto a separar). Esto implica que la elección del material es muy importante porque determina las propiedades intrínsecas de la membrana.

## **Calculo de los coeficientes A y B**

Las expresiones necesarias para calcular A y B son:

Flujo volumétrico, determinante para hallar el valor de A, se obtiene de la siguiente forma:

$$J_v = \frac{Q_p}{A_{mem}} \quad \text{Ec. 35}$$

Donde,

$J_v$ , Flujo volumétrico [ $m^3/(m^2 \cdot d)$ ].

$Q_p$ , Caudal de Permeado [ $m^3$ ].

$A_{mem}$ , Área de la Membrana [ $m^2$ ].

$Q_p$  y  $A_{mem}$ , Datos proporcionados en la hoja de especificaciones de la membrana seleccionada.

Concentración de permeado:

$$C_p = C_a \cdot (1 - R) \quad \text{Ec. 36}$$

Donde,

$C_p$ , Concentración de Permeado [ $g/m^3$ ].

$C_a$ , Concentración de Alimento [ $g/m^3$ ].

$R$ , Porcentaje de rechazo de la membrana frente al soluto.

$R$ , Dato proporcionado en la hoja de especificaciones de la membrana seleccionada y  $C_a$ , es conocido previamente antes de realizar la filtración.

Flujo de Solute, determinante para hallar el valor de  $B$ , se obtiene de la siguiente forma:

$$J_s = J_v \cdot C_p \quad \text{Ec. 37}$$

Donde,

$J_s$ , Flujo de soluto [ $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ].

$J_v$ , Flujo volumétrico [ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ].

$C_p$ , Concentración de Permeado [ $\text{g}/\text{m}^3$ ].

$J_v \cdot C_p$ , Parámetros calculados en las ecuaciones 35 y 36 respectivamente.

Presión Osmótica:

$$\Delta\pi = (C_a - C_p) \cdot R_g \cdot T \quad \text{Ec. 38}$$

Donde,

$\Delta\pi$ , Presión Osmótica [ $\text{J}/\text{m}^3$ ].

$R_g$ , Constante universal de los gases ideales [ $\text{J}/\text{k} \cdot \text{mol}$ ].

$C_a$ , Concentración de Alimento [ $\text{g}/\text{m}^3$ ].

$C_p$ , Concentración de Permeado [ $\text{g}/\text{m}^3$ ].

$T$ , Temperatura de trabajo [ $^\circ\text{K}$ ].

Coefficiente de permeabilidad A:

$$A = \frac{J_v}{\Delta P - \Delta\pi} \quad \text{Ec. 39}$$

Donde,

$A$ , Coeficiente de permeabilidad del disolvente a través de la membrana [ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar})$ ].

$J_v$ , Flujo volumétrico [ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ].

$\Delta\pi$ , Presión Osmótica [J/ m<sup>3</sup>].  
 $\Delta P$ , Variación de presión [bar].

Coefficiente de permeabilidad B:

$$B = \frac{J_s}{C_a - C_p} \quad \text{Ec. 40}$$

Donde,

$B$ , Coeficiente de permeabilidad del soluto a través de la membrana [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d)].

$J_s$ , Flujo de soluto [mol/(m<sup>2</sup>\*d)].

$C_a$ , Concentración de Alimento [g/m<sup>3</sup>].

$C_p$ , Concentración de Permeado [g/m<sup>3</sup>].

### **Comportamiento del flujo a través de la membrana**

Para describir el comportamiento del flujo del fluido a través de la membrana debemos hallar las densidades de flujo volumétrico y de soluto.

Variación de la concentración en la cara de la membrana:

$$\Delta C = C_a - C_p \quad \text{Ec. 41}$$

Donde,

$C_a$ , Concentración de Alimento [g/m<sup>3</sup>].

$C_p$ , Concentración de Permeado [g/m<sup>3</sup>].

$\Delta C$ , Variación de la concentración en la cara de la membrana [g/m<sup>3</sup>].

Variación de la presión:

$$\Delta P = P_a - P_p \quad \text{Ec. 42}$$

Donde,

$P_a$ , Presión de Alimento [bar].

$P_p$ , Presión de Permeado [bar].

$\Delta P$ , Variación de la presión [bar].

### Presión Osmótica:

$$\Delta\pi = N_{iones} * \Delta C \cdot R_g \cdot T \quad \text{Ec. 43}$$

Donde,

$\Delta\pi$ , Presión Osmótica [J/ m<sup>3</sup>].

$R_g$ , Constante universal de los gases ideales [J/k\*<sup>3</sup>mol].

$T$ , Temperatura de trabajo [°K].

$\Delta C$ , Diferencia de concentraciones ( $C_a - C_p$ ) [g/m<sup>3</sup>].

$N_{iones}$ , Numero de iones presente en el fluido de alimento.

### Flujo Volumétrico:

$$J_v = A * (\Delta P - \Delta\pi) \quad \text{Ec. 43}$$

Donde,

$\Delta\pi$ , Presión Osmótica [J/ m<sup>3</sup>].

$\Delta P$ , Variación de la presión [bar].

$A$ , Coeficiente de permeabilidad del disolvente a través de la membrana [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d\*bar)].

$J_v$ , Flujo volumétrico [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d)].

### Flujo de Soluto:

$$J_s = B * \Delta C \quad \text{Ec. 44}$$

Donde,

$J_s$ , Flujo de soluto [mol/(m<sup>2</sup>\*d)].

$B$ , Coeficiente de permeabilidad del soluto a través de la membrana [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d)].

$\Delta C$ , Variación de la concentración en la cara de la membrana [g/m<sup>3</sup>].

### Concentración de Permeado:

$$C_p = \frac{J_s}{J_v} \quad \text{Ec. 45}$$

Donde,

$J_s$ , Flujo de soluto [mol/(m<sup>2</sup>\*d)].

$J_v$ , Flujo volumétrico [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d)].

$C_p$ , Concentración de Permeado [mol/m<sup>3</sup>].

### Modelo de balance globalizado

El comportamiento de la concentración y el caudal a lo largo de toda la longitud de la membrana la expresamos por medio de la modelización de balance globalizado;

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{\partial(vC)}{\partial t} + mdv + r_k \quad \text{Ec. 46}$$

$$\frac{\partial(vC)}{\partial t} = -Jv * \frac{P}{S} \quad ; \quad \frac{P}{S} = \frac{A_{mem}}{L}$$

Luego tenemos que las derivadas de la variable de estado son:

Derivada del caudal:

$$\frac{dQ}{dz} = -Jv * \left(\frac{A_{mem}}{L}\right) \quad \text{Ec. 47}$$

Derivada de la concentración:

$$\frac{dC}{dz} = \frac{Jv*C - Js}{Q} * \left(\frac{A_{mem}}{L}\right) \quad \text{Ec. 48}$$

$$\left(\frac{A_{mem}}{L}\right) = \mathit{perim} \quad \text{Ec. 49}$$

Donde,

$A_{mem}$ , Área de la membrana [m<sup>2</sup>].

$\mathit{perim}$ , Perímetro de la membrana [m].

$L$ , Longitud de la membrana [m].

$J_v$ , Flujo volumétrico [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d)].

$Q$ , Caudal [m<sup>3</sup>/d].

### **3.5.5. Ventajas de los procesos con membranas**

- Bajo coste energético, pues no hay cambio de fase.
- Condiciones suaves de operación (temperatura). Se pueden separar compuestos sensibles a la temperatura.
- Posibilidad de operar en continuo.
- Fácilmente automatizables.
- Adaptabilidad a diversas aplicaciones, debido a que existen membranas con propiedades muy diferentes.
- No requieren incorporar productos químicos externos a la disolución a tratar.
- Instalaciones compactas, al tratarse de equipos relativamente pequeños.
- Fácil cambio de escala, al ser los equipos son modulares.
- Facilidad de montaje, desmontaje y operación.
- Posibilidad de combinar con otros procesos: Procesos híbridos.

### **3.5.6. Desventajas de los procesos con membranas**

- Elevado coste de las membranas.
- Falta de selectividad para algunas aplicaciones.
- Ensuciamiento de las membranas, que reduce la permeabilidad e incluso puede reducir la vida útil.
- Algunos materiales son sensibles al ataque químico causado por ácidos, bases, oxidantes y disolventes orgánicos.
- Algunos materiales no tienen buena resistencia mecánica a las abrasiones, vibraciones, altas temperaturas o presiones.<sup>[9]</sup>

### **3.5.7. Causas del ensuciamiento de las membranas**

- Adsorción de moléculas de soluto sobre la superficie de la membrana debido a afinidades químicas.
- Taponamiento de los poros de la membrana, tanto a nivel superficial como en el interior de los mismos, debido a que el tamaño de las moléculas de soluto es similar al de los poros de la membrana.
- Formación de capa gel, debida al establecimiento de una red tridimensional entre las macromoléculas de soluto y el disolvente.
- Formación de depósitos en la superficie de la membrana o en el interior de la misma por precipitación de las moléculas de soluto o deposición de materia en suspensión.<sup>[9]</sup>

### 3.5.8. Consecuencias del ensuciamiento de las membranas

- Disminución de la densidad de flujo de permeado (productividad).
- Cambios en la selectividad de la membrana (rechazo).
- Aumento de la caída de presión en el módulo de membranas. [9]

## 3.6. MODELOS MATEMATICOS DEL SISTEMA

### 3.6.1. Representación matemático de cada componente.

Después de realizar un estudio de cada componente en los párrafos anteriores, extraemos la representación matemática que más se asemeja al comportamiento de estos.

#### Válvula

Pérdida de carga en una válvula,  $H_v$

$$H_v = (h_L)_V = \frac{q^2}{\theta^2(\%)*K_{V0}^2}; \quad K_v = \theta(\%) * K_{v0}$$

#### Bomba Centrífuga

Ecuación característica que describe el comportamiento de la altura manométrica ( $H_B$ ), con respecto al caudal ( $q$ ) que se quiere suministrar y es dependiente de la velocidad de giro  $n$ .

$$H_B = H_m = C_1 n^2 - C_2 n q - C q^2$$

#### Bomba de Pistones

Caudal útil medido a la salida de la bomba

$$Q = Z \frac{\pi D^2}{4} L \frac{n(\text{rpm})}{60} - 7 * 10^{-6} * n * (AP)^{1,2}$$

Ecuación característica de la presión con respecto al caudal,  $P_B$

$$P_B = \frac{H_B}{\gamma} = P = P(Q)$$

### Membrana

Derivada del caudal Q, de la variable de estado:

$$\frac{dQ}{dz} = -Jv * \left( \frac{A_{mem}}{L} \right)$$

Derivada de la concentración C, de la variable de estado:

$$\frac{dC}{dz} = \frac{Jv * C - Js}{Q} * \left( \frac{A_{mem}}{L} \right)$$

### Tubería

Perdida de carga en tuberías,  $H_T$

$$H_T = h = \frac{8L}{\pi^2 D^5 g} f * Q^2$$

$$f = f(Re, \epsilon_r); \quad Re = \frac{D * v * \rho}{\mu}; \quad \epsilon_r = \frac{\epsilon}{D}$$

Factor de fricción:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\epsilon}{3,71 * D} + \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \right]$$

### 3.6.1. Componentes físicos instalados en la planta piloto

El siguiente paso es proceder a realizar la representación de todos los modelos matemáticos por medio de códigos de programación con la herramienta computacional de cálculo (software) MATLAB.

Básicamente se crearan funciones matemáticas que serán claves a la hora de realizar los cálculos.

#### Asignación de valores a los parámetros de cada uno de los componentes del sistema y programación con el software MATLAB

Algunos parámetros de los componentes del circuito hidráulico son seleccionados a partir de gráficos de acuerdo a unos valores de entrada dados, es decir toca recurrir a la relación de valores de dos parámetros para realizar los cálculos.

Esto conlleva a que sea necesario crear una formulación que represente dicha relación a la hora de proceder con los cálculos.

Partiendo de una relación entre dos parámetros A y B (tabla de valores), utilizamos la técnica de **Mínimos Cuadrados**; Esta técnica de análisis numérico incluida dentro de la optimización matemática, en la que, dados un conjunto de pares ordenados: (variable independiente, variable dependiente) y un orden del polinomio (lineal, cuadrático, etc), se intenta encontrar la función, dentro de dicha familia, que mejor se aproxime a los datos (un "mejor ajuste"), de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático.

Se ha creado un código de Interpolación tipo función en matlab:

```
%-----CÓDIGO DE INTERPOLACIÓN-----  
%vector de solución de mínimos cuadrados (polinomio)  
function a=min_cuad(n,x,y)  
%-----
```

Entradas:

- n, Orden del polinomio que se quiere obtener.
- x, Vector correspondiente a la variable independiente.
- y, Vector correspondiente a la variable dependiente.

Salida:

- a, Vector con los valores de los coeficientes del polinomio.

**Válvula:** Para la válvula utilizaremos una tipo Asiento Disco estándar

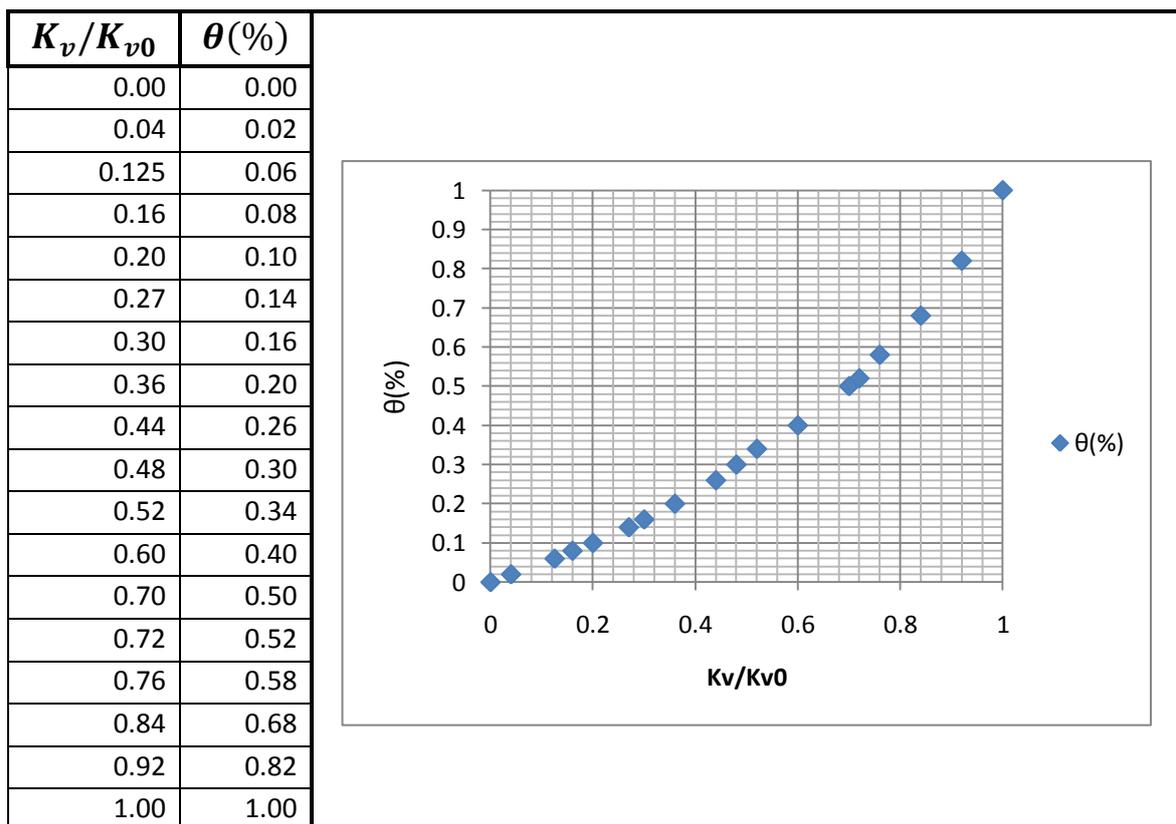
Recordemos que las ecuaciones que describen el comportamiento hidráulico de la válvula son las siguientes

$$H_v = (h_L)_V = \frac{q^2}{\theta^2(\%) * K_{v0}^2}$$

$$K_v = \theta(\%) * K_{v0}; \quad \frac{K_v}{K_{v0}} = \theta(\%)$$

Donde  $H_v$  representa la pérdida de carga en la válvula.

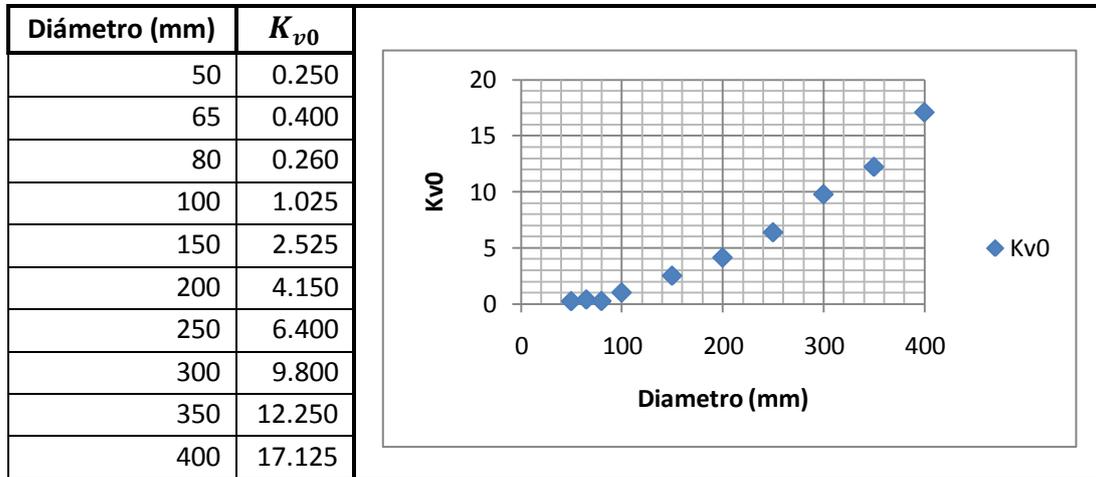
La relación entre  $K_v/K_{v0}$  y  $\theta(\%)$  es la siguiente;



**Tabla 4:** Relación entre  $K_v/K_{v0}$  y  $\theta(\%)$ .

**Fuente:** Material de trabajo. Instalaciones de Fluidos. Máster en construcción e instalaciones industriales. UPV.

Para encontrar  $H_v$ , que es nuestro principal objetivo tenemos que hallar el valor de  $K_{v0}$ , este valor está relacionado directamente con el diámetro de la válvula por medio de la siguiente tabla:



**Tabla 5:** Relación entre el diámetro y  $K_{v0}$  .

**Fuente:** Material de trabajo. Instalaciones de Fluidos. Máster en construcción e instalaciones industriales. UPV.

Ahora aplicamos mínimos cuadrados (Utilizando el código de interpolación creado en Matlab) a las tablas 4 y 5 obtenemos las siguientes funciones:

**Tabla 4:** Relación entre  $K_v/K_{v0}$  y  $\theta$ (%).

```

%-----
a=min_cuad(4, Kv_Kv0, theta)
a=[0.0073, 2.0099, -1.4930, 0.4789]
%-----

```

Por tanto la ecuación que describe esta relación es la siguiente

$$\frac{K_v}{K_{v0}} = 0.4789 \theta(\%)^3 - 1.4930 \theta(\%)^2 + 2.0099 \theta(\%) + 0.0073. \text{ Ec. 51}$$

**Tabla 5:** Relación entre el diámetro y  $K_{v0}$  .

```

%-----
a=min_cuad(3, Diametro, Kv0)
a=[0.0275, 0.0007, 0.0001]
%-----

```

Por tanto la ecuación que describe esta relación es la siguiente

$$K_{v0} = 0.0001 \theta(\%)^2 + 0.0007 \theta(\%) + 0.0275. \quad \text{Ec. 52}$$

Luego tenemos que;  $H_v(\theta(\%), Diametro, Q)$ .

Esto quiere decir que  $H_v$ , depende del porcentaje de apertura de la válvula  $\theta(\%)$ , Diámetro de la válvula y el Caudal Q que la atraviesa.

Para efectos de cálculo del control creamos un código tipo función en MATLAB;

```
%-----FUNCION QUE CALCULA EL Hv DE LA VALVULA-----  
function Hv=valvula(GA,Diam,Q)  
%-----
```

Entradas:

GA, Porcentaje de apertura de la válvula.

Diam, Diámetro de la válvula [m].

Q, Caudal que atraviesa la válvula [m<sup>3</sup>/h]

Salida:

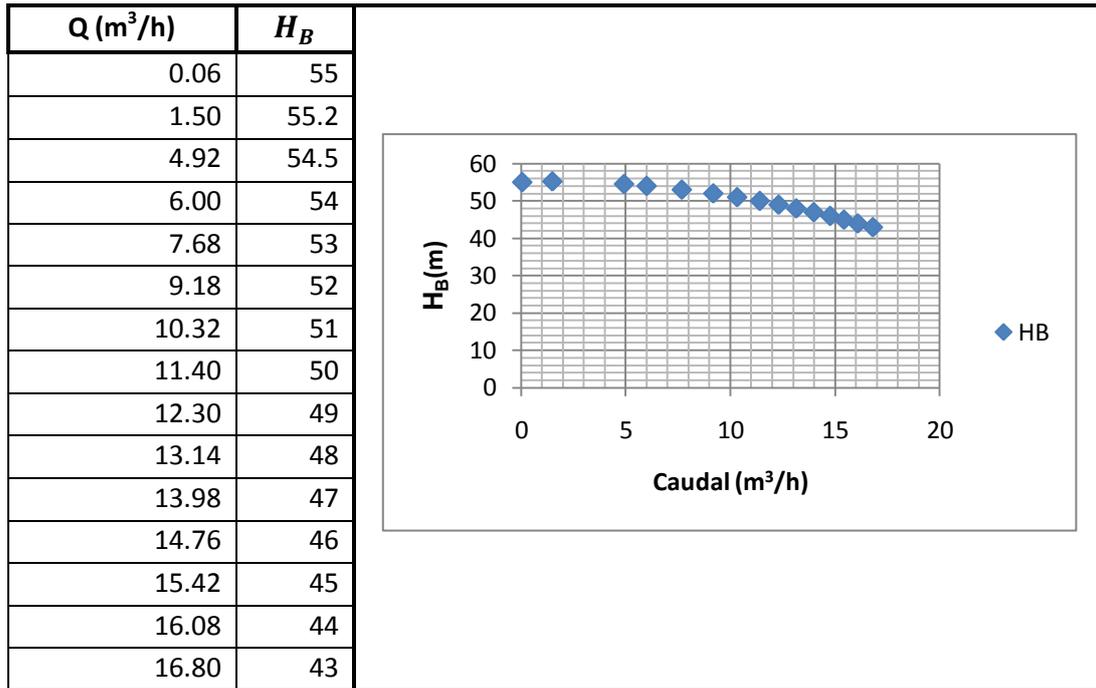
H<sub>v</sub>, Perdida de carga en la válvula [m].

**Bomba Centrifuga:** Utilizamos los parámetros de una bomba centrifuga de la compañía EBARA, Modelo: CMB 5.50 (4 Kw). Su curva característica se encuentra en el anexo 1.

Recordemos que la ecuación que describe el comportamiento de la altura manométrica ( $H_B$ ) con respecto al caudal Q es la siguiente:

$$H_B(n, Q) = C_1 n^2 - C_2 n Q - C Q^2$$

Como podemos ver, la ecuación es un polinomio cuadrático. Para hallar los valores de  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C$  recurrimos a la relación entre Q y  $H_B$ , que nos suministra la curva característica de esta bomba (Ver anexo 1).



**Tabla 6:** Relación entre el diámetro y  $K_{v0}$  .

**Fuente:** Propia, a partir de la curva característica de la bomba centrífuga de la compañía EBARA, Modelo: CMB 5.50 (4 Kw).

Ahora aplicamos mínimos cuadrados (Utilizando el código de interpolación creado en Matlab) a la tabla 6 y obtenemos la ecuación cuadrática ( $H_B$ ) que representa la curva característica de la bomba:

```

%-----
a=min_cuad(3,Q,Hm)
a=[55.018, 0.0082,-0.002]
%-----

```

Por lo tanto la ecuación queda expresada de la siguiente manera:

$$H_B(Q) = 55.018 + 0.0082Q - 0.0002Q^2 \quad \text{Ec. 53}$$

Para efectos de control la Ecuación 53 debe ser dependiente de la velocidad de giro también, para lograrlo la igualamos con la ecuación característica de la bomba:  $H_B(Q) = H_B(n, Q)$

$$0.0002 = C: \quad C = 0.0002 \quad \text{Ec. 54}$$

$$-C_2n = 0.0082 \quad C_2 = -\frac{0.0082}{n} \quad \text{Ec. 55}$$

$$55.018 = C_1n^2 \quad C_1 = \frac{55.018}{n^2} \quad \text{Ec. 56}$$

Para efectos de cálculo del control creamos un código tipo función en MATLAB;

```
%-----FUNCION PARA LA BOMBA CENTRIFUGA-----  
function HB=Function_Pump(n,Q)  
%-----
```

Entradas:

n, Velocidad de Giro. [RPM]  
Q, Caudal requerido [m<sup>3</sup>/h]

Salida:

HB, Altura manométrica [m].

**Bomba de pistones:** Utilizamos la bomba de pistones de la empresa CAT PUMPS Modelo: 5CP2120W, actualmente esta se encuentra instalada en la planta piloto del laboratorio de ensayos. Ver anexo 2.

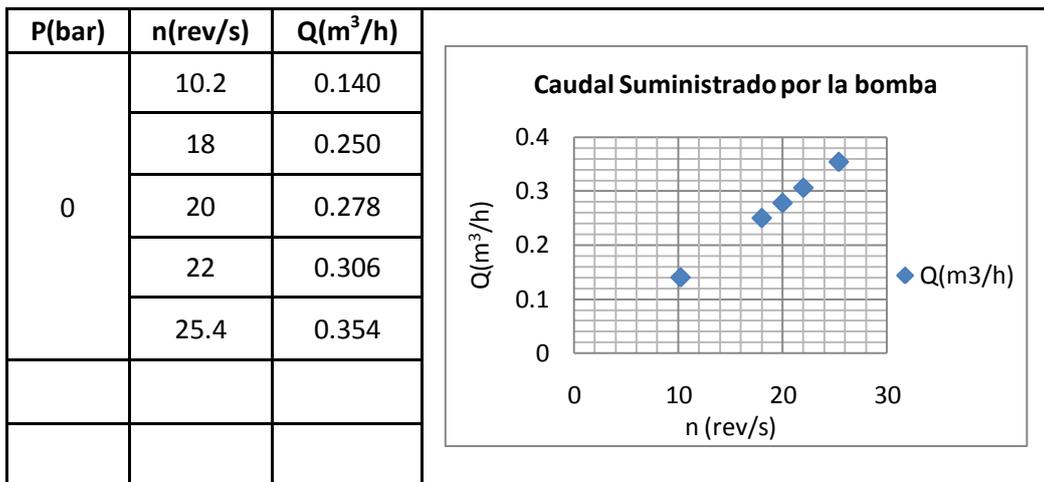
Las ecuaciones que representan el comportamiento de la bomba de pistones son las siguientes;

$$Q = Z \frac{\pi D^2}{4} L \frac{n(\text{rpm})}{60} - 7 * 10^{-6} * n * (AP)^{1,2}$$

Ecuación característica de la presión con respecto al caudal,  $P_B$

$$P_B = \frac{H_B}{\gamma} = P = P(Q)$$

La empresa no suministra la curva característica de la bomba, por lo tanto para realizar el modelamiento, partimos de los datos obtenidos en un ensayo en la planta piloto del laboratorio;



**Tabla 7:** Relación entre la velocidad de giro y el caudal suministrado Q .

**Fuente:** Propia.

Ahora aplicamos mínimos cuadrados (Utilizando el código de interpolación creado en Matlab) a la tabla 7 y obtenemos:

```

%-----
a=min_cuad(2,n,Q)
a=[-0.0035, 0.0141]
%-----

```

Por lo tanto la ecuación queda expresada de la siguiente manera:

$$Q(n) = 0.0141n - 0.0035$$

Para efectos de cálculo del control creamos un código tipo función en MATLAB;

```

%-----FUNCION PARA LA BOMBA DE PISTONES-----
function Q=Plunger_Pump_n(n)
%-----

```

Entradas:

n, Velocidad de Giro. [rev/s]

Salida:

Q, Caudal requerido [m<sup>3</sup>/h]

**Tubería:** Se trabaja con tubería de hierro galvanizado.

Recordemos que la ecuación que describe la pérdida de carga en tuberías,  $H_T$

$$H_T(f, Q) = h = \frac{8L}{\pi^2 D^5 g} f * Q^2$$

El factor de fricción es función del No, Reynolds y la rugosidad relativa:

$$f = f(Re, \epsilon_r); \quad Re = \frac{D * v * \rho}{\mu}; \quad \epsilon_r = \frac{\epsilon}{D}$$

Puesto que la pérdida de carga depende directamente del Factor de fricción  $f$ :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\epsilon}{3,71 * D} + \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \right]$$

Primero hallaremos el valor de  $f$  por el método de Moody con los códigos tipo función creados en matlab. Esta es una subrutina de la función creada para hallar el factor de fricción.

```
%-----Diagrama de moody-----  
function fr = Diagrama_moody(ep_d, Re)  
%-----
```

**Entradas:**

ep\_d, Rugosidad Relativa del material.

Re, Numero de Reynolds.

**Salida:**

fr, Factor de fricción.

```
%-----Perdida de Carga en tubería-----  
function Ht=tuberia(L, D, Q)  
%-----
```

**Entradas:**

L, Longitud de la tubería [m].

D, Diámetro de la tubería [m].

Q, Caudal que atraviesa la tubería [m<sup>3</sup>/h]

**Salida:**

Ht, Perdida de Carga [m].

**Membrana:** Para efecto práctico, se trabaja con un modulo DURASLICK RO 4040

Recordamos que las derivadas de las variables de estado son las siguientes:

Derivada del caudal Q, de la variable de estado:

$$\frac{dQ}{dz} = -Jv * \left( \frac{A_{mem}}{L} \right)$$

Derivada de la concentración C, de la variable de estado:

$$\frac{dC}{dz} = \frac{Jv * C - Js}{Q} * \left( \frac{A_{mem}}{L} \right)$$

Para logra el modelamiento de la membrana se requiere crear 2 subrutinas; una que resuelva las derivadas de la variable de estado, otra interna a esta que calcule las densidades de flujo volumétrico y de soluto.

Creamos un código tipo función en MATLAB, que calcula las densidades de flujo volumétrico y de soluto:

```
%-----  
function [Jv, Js, Cp, iter] = fluxes(Pa, Ca, Ta, A, B,  
n_iones)  
%-----
```

**Entradas:**

- Pa, Presión [bar].
- Ca, Concentración alimento [mol/m<sup>3</sup>].
- Ta, Temperatura [°K].
- A, Coeficiente de permeabilidad del disolvente a través de la membrana [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d\*bar)].
- B, Coeficiente de permeabilidad del soluto a través de la membrana [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d)].

**Salidas:**

- Jv, Flujo volumétrico [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d)].
- Js, Flujo de soluto [mol/(m<sup>2</sup>\*d)].
- Cp, Concentración de permeado [mol/m<sup>3</sup>].

Ahora creamos un código tipo función en MATLAB, que evalúe las derivadas de las variables de estado (Q , C). Utilizando los cálculos de la función fluxes.

```
%-----
function D = derivs(~, X, T, per, A, B, n_iones)
%-----
```

#### Entradas:

z, Variable de integración  
X, [Q, C]' vector de variables de estado  
T, Temperatura del alimento  
Per, Perímetro activo de la membrana  
A, Coeficiente de permeabilidad del disolvente a través de la membrana [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d\*bar)].  
B, Coeficiente de permeabilidad del soluto a través de la membrana [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*d)].  
n\_iones, n<sup>o</sup> de iones.

#### Salida

D, Vector con los cálculos de las derivadas [dQdz, dCdz]'

Por último ya podemos crear el código tipo función en MATLAB, para la membrana el cual calcula los parámetros: Caudal, Concentración y Presión de rechazo en la membrana.

Para lograrlo invoca las derivadas de la variable de estado  $\frac{dQ}{dz}$  y  $\frac{dC}{dz}$ , calculadas en la función `derivs`, y las integra finita en un rango de 0 a L (longitud del modulo), con los parámetros de Caudal (Q) y Presión (C) como variables dependientes del rango. Todo esto se logra con el comando `ode45`.

```
%-----
function [Ppm, Qp, Qr, Cp, Cr, Pr, Rechazo] =
membrana(Pe_sist, Qe_sist)
%-----
```

#### Entradas:

Pe\_sist, Presión de trabajo del sistema [bar].  
Qe\_sist, Caudal de trabajo del sistema [m<sup>3</sup>/d].

#### Salidas:

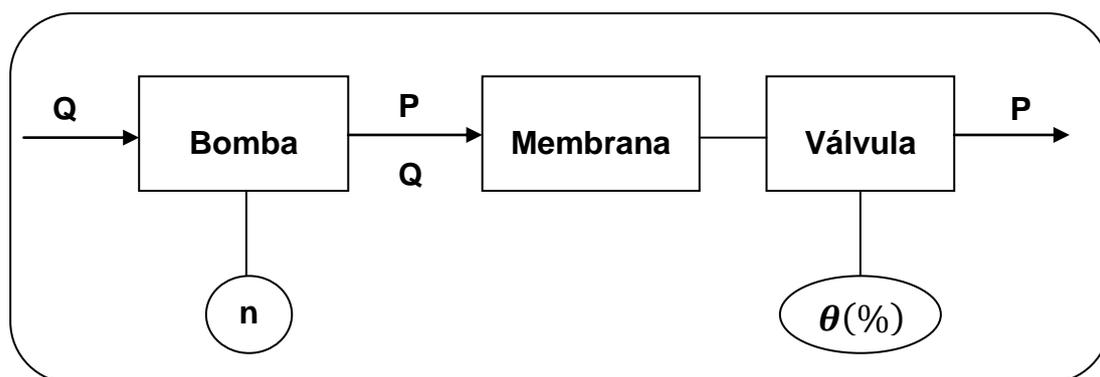
Ppm, Perdida de carga en el modulo de membrana [bar].  
Qp, Caudal de permeado [m<sup>3</sup>/d].  
Qr, Caudal de rechazo [m<sup>3</sup>/d].  
Cp, Concentración de permeado [mol/m<sup>3</sup>].  
Cr, Concentración de rechazo [mol/m<sup>3</sup>].  
Pr, Presión [bar].  
Rechazo, Porcentaje de rechazo de la membrana.

## 4. CONTROL DEL SISTEMA

Se pretende ejercer un control las variables operativas Caudal  $Q$  y Presión  $P$ , por medio del modelamiento matemático planteado en el anterior capítulo, ahora utilizando valores parámetros reales de los elementos que componen el sistema procedemos a crear algoritmos de control que mejor se adapten al sistema.

Es de vital importancia saber que si controlamos estas dos variables operativas podremos almacenar valores correspondientes a Concentraciones de Permeado y Rechazo, Caudales de permeado y rechazo, Porcentaje de rechazo que son suministrados por la membrana como respuesta a unas entradas de Caudal y Presión, con estos valores se pueden realizar estudios para entender su comportamiento ante diferentes condiciones.

### 4.1. ESQUEMA DE LA PLANTA A CONTROLAR



**Figura 21:** Diagrama de flujo de la planta piloto.

**Fuente:** Propia

La figura anterior muestra de manera muy general el comportamiento de la planta en lazo abierto; la bomba a una velocidad  $n$ , entrega un caudal  $Q$  y una Presión  $P$  a la membrana que luego es controlada con la apertura o cierre de la válvula  $\theta(\%)$ , cabe destacar que la tubería se encuentra implícita en el gráfico y solo se tiene en cuenta a la hora de hacer los cálculos.

El modelo matemático que describe el comportamiento del sistema en lazo abierto, es el siguiente, (*Altura manométrica o Presión total del sistema, sistema instalado sin cotas, es decir, todos los elementos se encuentran al mismo nivel*);

- Utilizando una bomba centrífuga tenemos:

$$H_{Total} = H_B(n, Q) - [H_T(f, Q) + H_V(\theta(\%), Q) + H_m] \quad \text{Ec. 57}$$

- Utilizando una bomba de pistones tenemos:

$$P_{Total} = P_B(Q(n)) - \left[ \frac{H_T(f, Q) + H_V(\theta(\%), Q) + H_m}{\gamma} \right] \quad \text{Ec. 58}$$

El primer término de las ecuaciones describe la altura manométrica y presión respectivamente, a la que se desea que trabaje el sistema.

El segundo término de las ecuaciones corresponde a la *curva resistente* del sistema y la componen las pérdidas de cargas halladas en las tuberías, membrana y válvulas.

Esta curva resistente lo que produce es un aumento del trabajo realizado por la bomba para sostener una presión y un caudal deseado.

#### 4.1. 1. Valores de los parámetros de los elementos del sistema

**Válvula:** Asiento Disco en V

Diámetro de la Válvula = 0.0127 m.

**Tubería:** Hierro Galvanizado.

Diámetro de la Tubería = 0.01 m.

Longitud total de la tubería = 1 m.

**Membrana:** Modulo DURASLICK RO 4040 - Ver anexo 3

##### Datos geométricos del modulo

Area = 7.9 m<sup>2</sup>.

Longitud = 1.016 m.

Perimetro = Area/Longitud [m], perímetro de transferencia del módulo.

Seccion = Perimetro\*1e-3 [m].

##### Datos del fluido

n\_iones = 2.

Msal = 58.5 g/mol; Peso molecular de la sal.

Concentración de alimento = 2.1 kg/m<sup>3</sup>.

Temperatura = 298 °K

## Coeficientes de Permeabilidad

$$A = 0.0648 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar})$$

$$B = 0.0137 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$$

## **4.2. POSICIONAMIENTO INICIAL**

Antes de pasar a la etapa fuerte del control, realizamos un “pre control” para llevar la planta a un punto de trabajo inicial, es decir se realiza un primer posicionamiento que nos permitirá evaluar la primera respuesta de la planta ante una señal de entrada. En nuestro caso mostraremos la simulación de la planta utilizando primero una bomba centrífuga y luego una bomba de pistones.

### **4.2.1. Posicionamiento con una bomba centrífuga.**

Creamos un algoritmo que utiliza como modelo de la planta la ecuación 57, (Sistema1a.m), en este ingresamos un caudal objetivo Q en [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] y una Altura manométrica Hm en [m].

Este algoritmo básicamente empieza a jugar con los valores de velocidad n, de la bomba y el porcentaje de apertura de la válvula  $\theta(\%)$  es decir:

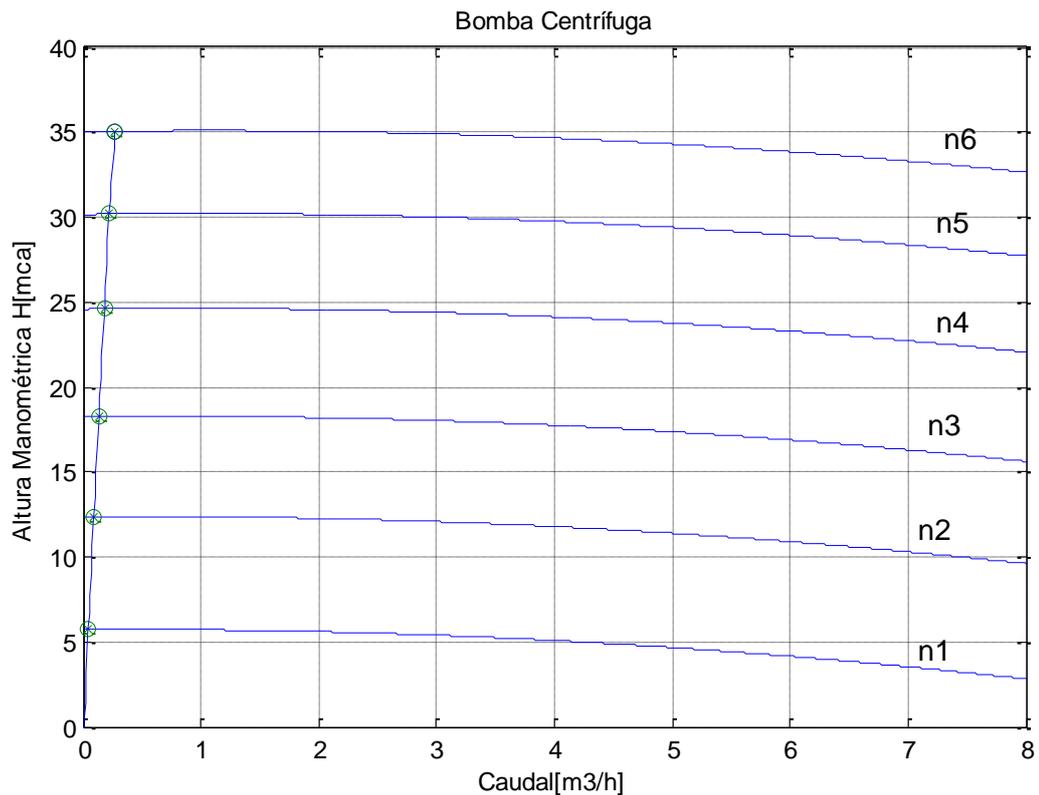
Automáticamente el algoritmo selecciona un valor mínimo de velocidad para empezar ni, manteniendo la válvula completamente abierta  $\theta(\%) = 100 \%$ . Luego empieza a hacer incrementos positivos en la velocidad e incrementos negativos en  $\theta(\%)$ , leyendo siempre el resultado de H y Q, para luego determinar si continúa haciendo incrementos.

El algoritmo está diseñado para alcanzar los valores objetivos de H y Q en 6 iteraciones:

Posicionamiento con:

Caudal (Q) =  $0.27 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Altura Manométrica (Hm) = 35 m.



**Figura 22:** Posicionamiento con una bomba centrífuga.

**Fuente:** Propia

Luego los valores de velocidad en RPM para cada una de las iteraciones son:

n1	n2	n3	n4	n5	n6
$n_i = [935$	$1373.5$	$1670$	$1938.3$	$2147$	$2314]$

RPM

#### 4.2.2. Posicionamiento con una bomba de pistones

Creamos un algoritmo que utiliza como modelo de la planta la ecuación 58, (Sistema2a.m), en este ingresamos un Presión P de trabajo para la planta [bar] y el caudal Q que queremos que suministre la bomba [m³/h] a la membrana.

Este algoritmo al igual que el anterior básicamente empieza a jugar con los valores de velocidad n, de la bomba y el porcentaje de apertura de la válvula  $\theta(\%)$  es decir:

Automáticamente el algoritmo selecciona un valor mínimo de velocidad para empezar  $n_i$ , manteniendo la válvula completamente abierta  $\theta(\%) = 100\%$ .

Luego empieza a hacer incrementos positivos en la velocidad e incrementos negativos en  $\theta(\%)$ , leyendo siempre el resultado de P y Q, para luego determinar si continúa haciendo incrementos.

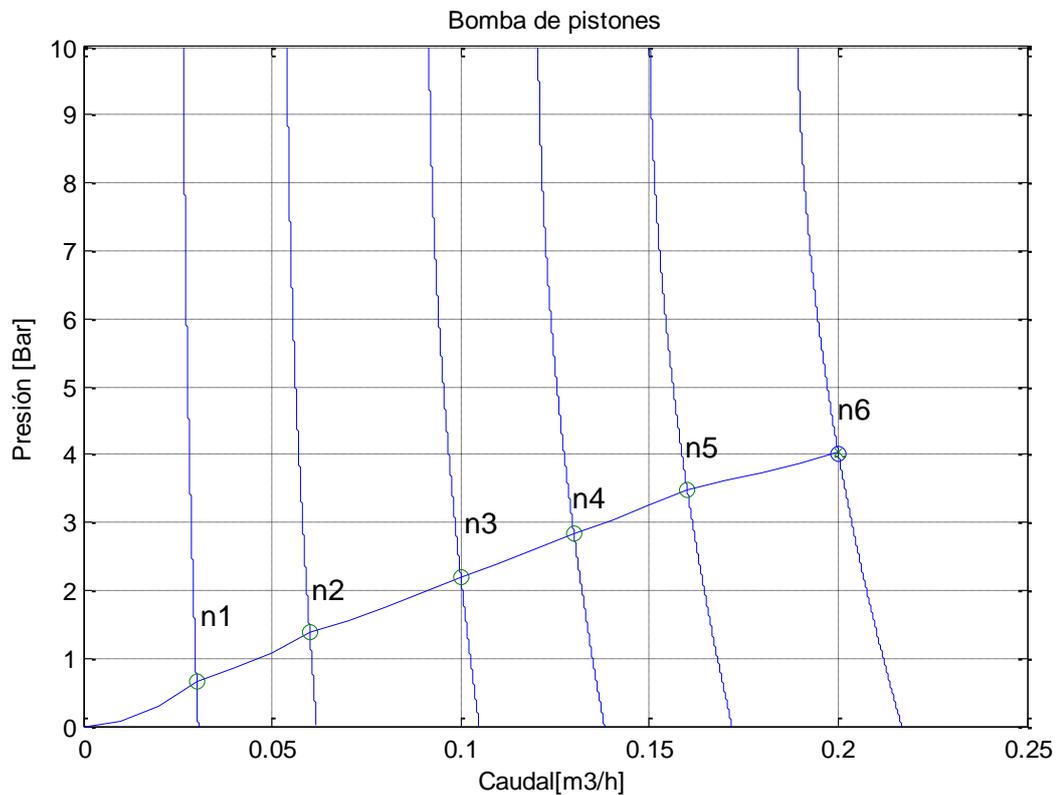
El algoritmo está diseñado para alcanzar los valores objetivos de P y Q en 6 iteraciones:

Básicamente la prueba consiste en; a una velocidad fija n, variamos la presión por medio de la válvula de control y obtenemos el caudal correspondiente:

Posicionamiento con:

Caudal (Q) = 0.2 m<sup>3</sup>/h

Presión (P) = 4 bar



**Figura 22:** Posicionamiento con una bomba centrífuga.

**Fuente:** Propia

Luego los valores de velocidad en rev/s para cada una de las iteraciones son:

n1	n2	n3	n4	n5	n6
2.41	4.64	7.69	10.03	12.43	15.62

ni = [2.41 4.64 7.69 10.03 12.43 15.62] rev/s

## 4.4. CONTROL DE LA PLANTA – MODO DE FUNCIONAMIENTO

### 4.4.1. Modo 1: Velocidad de giro fija, Variar Presión, Obtener Caudal

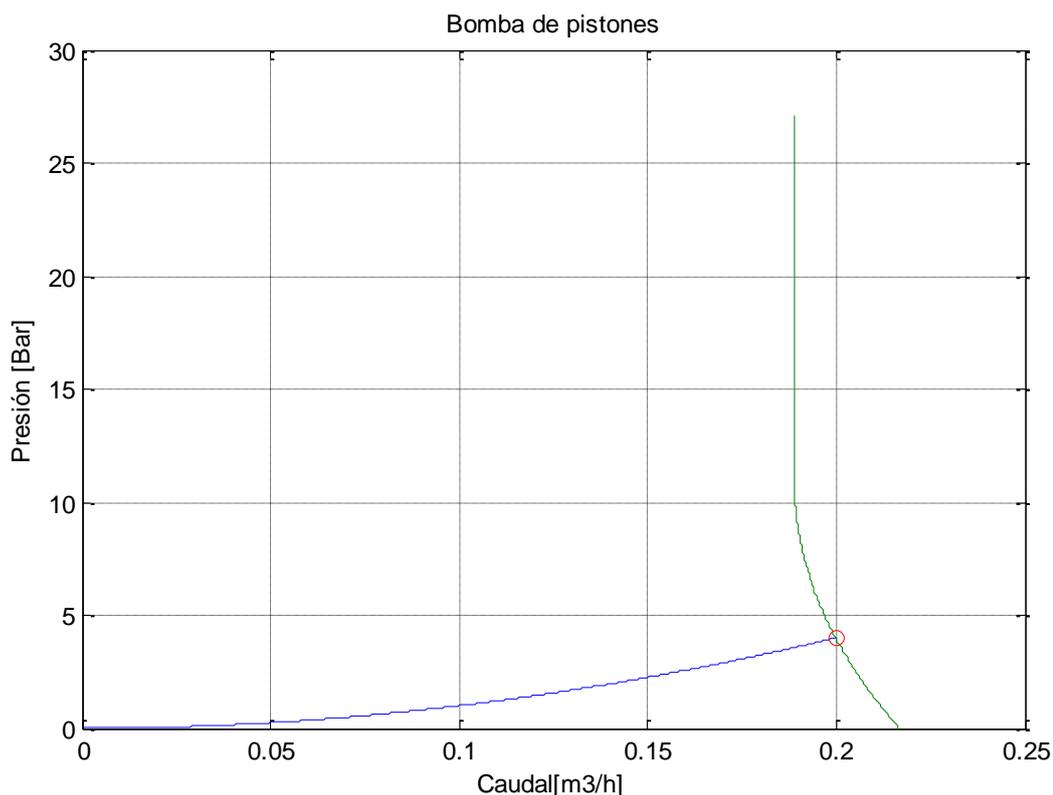
Generamos un algoritmo que adapta el funcionamiento del algoritmo de posicionamiento para generar un control deseado sobre las variables operativas.

En este modo de funcionamiento básicamente se fija un valor de velocidad de giro para la bomba, para luego variar la presión y obtener un caudal suministrado a la membrana.

Velocidad  $n= 15.6$  rev/s

Presión: 4 bar

Caudal Obtenido  $Q=0.199$  m<sup>3</sup>/h



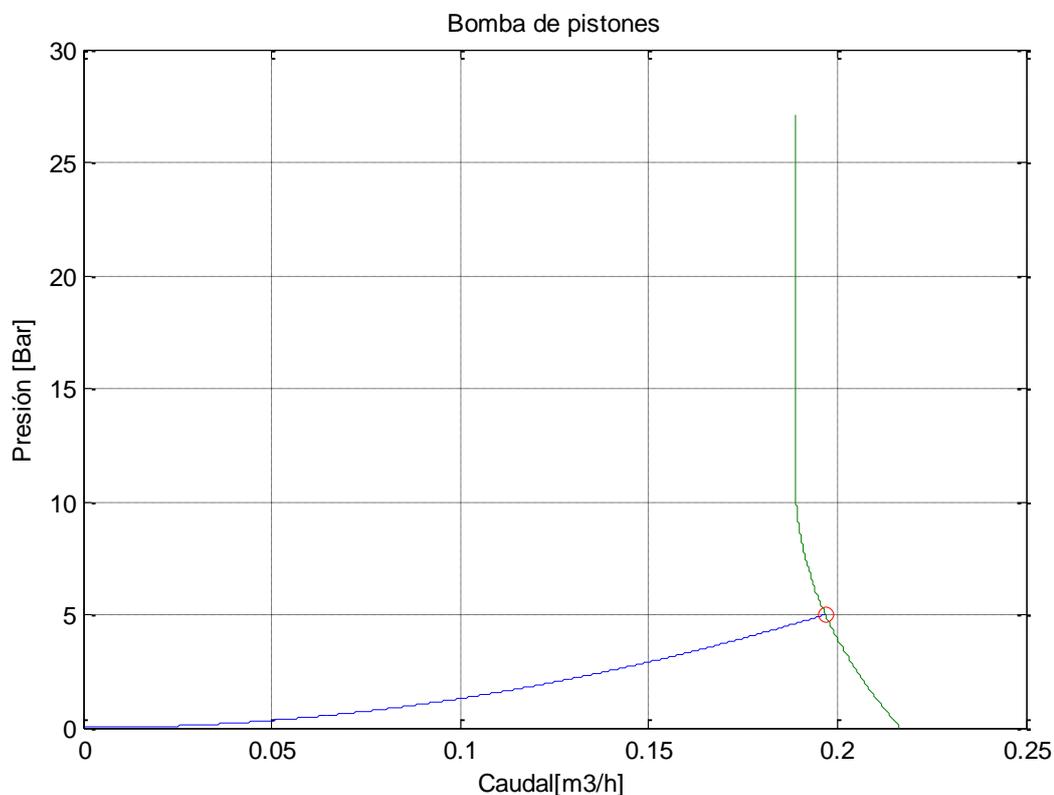
**Figura 23:** Caudal obtenido a partir de una velocidad fija y un valor de presión, la curva azul muestra la curva resistente del sistema y la otra muestra la curva característica de la bomba.

**Fuente:** Propia

Velocidad  $n= 15.6 \text{ rev/s}$

Presión: 5 bar

Caudal Obtenido  $Q=0.1968 \text{ m}^3/\text{h}$



**Figura 24:** Caudal obtenido a partir de la misma velocidad fija y otro valor de presión, la curva azul muestra la curva resistente del sistema y la otra muestra la curva característica de la bomba.

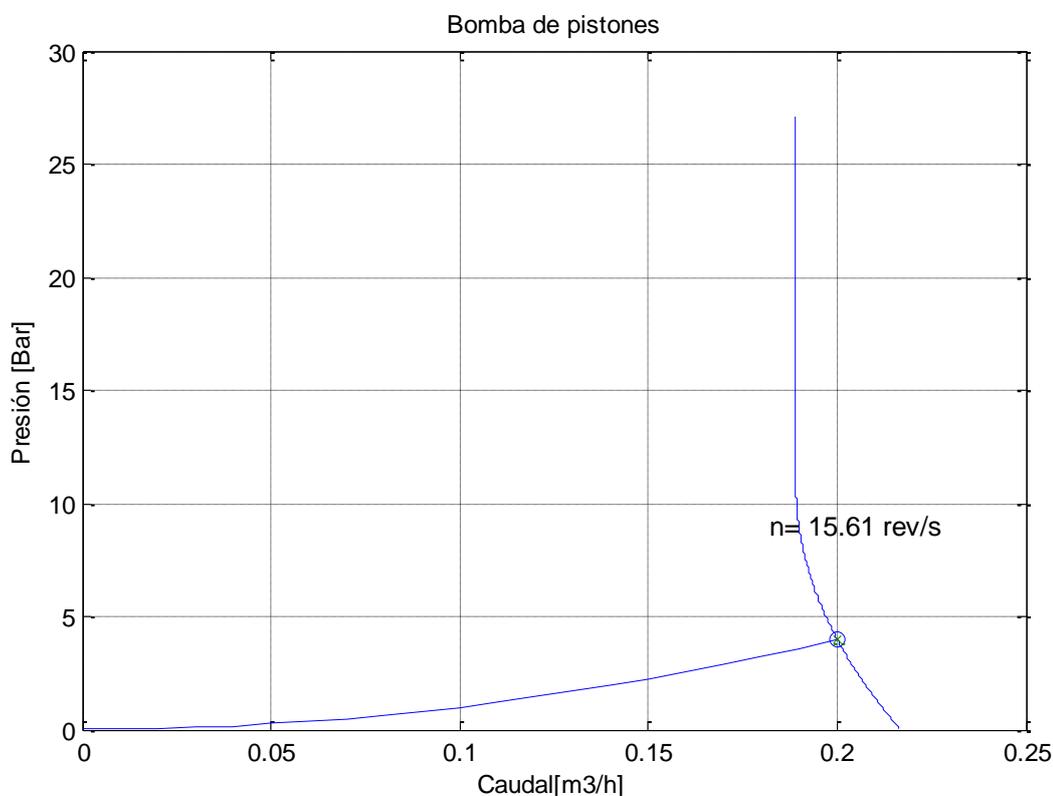
**Fuente:** Propia

#### 4.4.2. Modo 2: Variar Presión, Variar Caudal, Obtener Velocidad

Generamos un algoritmo que adapta el funcionamiento del algoritmo de posicionamiento para generar un control deseado las variables sobre operativas.

En este modo de funcionamiento básicamente se ingresa un valor de caudal  $Q$  que queremos que la bomba suministre, un valor de presión a la que debe trabajar el sistema, y el control posiciona la bomba en la velocidad correcta para que cumpla con los valores requeridos de  $Q$  y  $P$  que serán suministrados a la membrana.

Caudal  $Q=0.2 \text{ m}^3/\text{h}$   
Presión: 4 Bar  
Velocidad  $n$  obtenida= 15.61 rev/s



**Figura 25:** Velocidad obtenida, a partir de un valor de Caudal  $Q$  y Presión  $P$  suministrados.

**Fuente:** Propia

## 4.5. OTROS SISTEMAS DE CONTROL

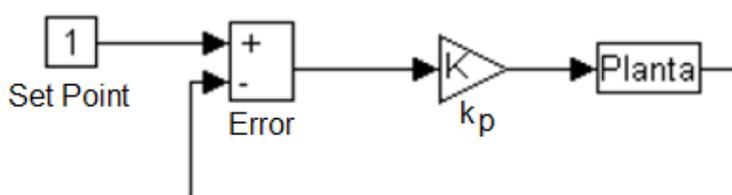
### 4.5.1. Control Clásico

Los sistemas de control clásicos pueden ser estudiados utilizando para ello fuertes cimientos teóricos basados en ecuaciones. Esto permite un estudio de la planta a ser controlada en el dominio de Laplace, o mediante técnicas en el lugar geométrico de las raíces, respuesta en frecuencia, gráficos de Nyquist, etc.

Todo lo anterior requiere de un estudio acabado acerca del modelo matemático de la planta, linealizado en torno a un punto de operación y expresado en el dominio de Laplace. Esto permite generar fácilmente los parámetros para el controlador de modo de obtener los mejores resultados de éste (supresión de

oscilaciones, error permanente nulo, mayor rapidez de respuesta). Sin embargo, en el caso del sistema dinámico en estudio, no existe un modelo matemático lineal que lo caracterice en cualquier condición de vuelo. Esto da como resultado la imposibilidad de utilizar métodos analíticos que permitan encontrar los mejores parámetros para el controlador en cualquier condición. Es posible encontrar dichos parámetros para una cierta condición en particular, pero de seguro serán diferentes a los obtenidos para cualquier otra condición. Por este motivo no se utilizarán términos matemáticos para el estudio de este sistema de control; en cambio, se aplicarán ideas intuitivas acerca de las labores propias del controlador, evolucionando mediante prueba y error hasta obtener los parámetros de mejor desempeño. Dado lo anterior, no es necesario profundizar en las técnicas de control clásicas; en lugar de ello, se estudiará intuitivamente la forma en que este tipo de controladores opera. <sup>[11]</sup>

Los sistemas de control clásicos actúan sobre el error del sistema de control, es decir, sobre la diferencia entre la referencia y la variable medida. Sobre dicho error, el controlador aplica una ganancia y genera una salida. Este es el caso más simple, de un controlador tipo P o proporcional. Es posible ejemplificar lo anterior del siguiente modo: supongamos que se tiene un automóvil con un sensor de rapidez. El motor del vehículo puede generar fuerzas diferentes variando en forma continua la potencia que entrega. En este marco, es posible diseñar un sistema de control para mantener a un cierto nivel la rapidez del automóvil, aumentando más la potencia del motor mientras mayor sea la diferencia entre la rapidez deseada y la medida. Este es el clásico controlador P.



**Figura 26:** Diagrama de bloques de controlador tipo P

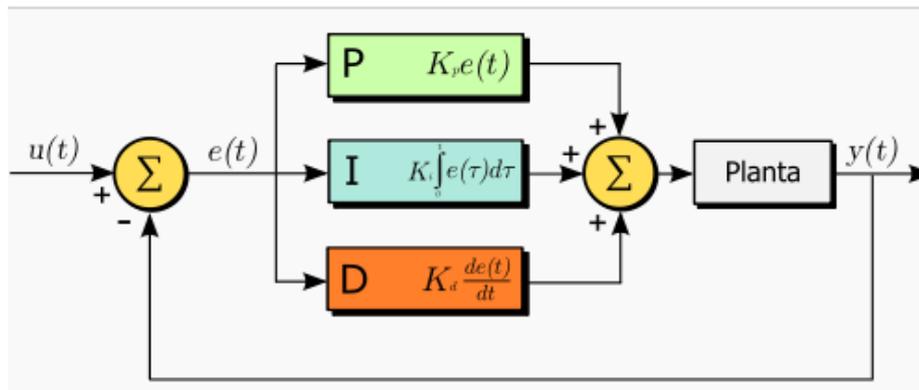
**Fuente:** Propia

Es posible agregar variaciones al controlador P. Supongamos, a modo de ejemplo, que la rapidez deseada para el automóvil es de 50 km/h, y que su rapidez actual es de 48 km/h. Para una diferencia de 2 km/h el controlador generará una salida de potencia más pequeña que para diferencias de rapidez mayores. En este caso, la potencia del motor puede ser tan baja que sólo es suficiente para mantener la rapidez, debido a las pérdidas por roce, sin posibilidades de aumentarla. En este caso, es necesario aplicar acción integral al controlador, el que suma en forma ponderada la acción proporcional con la integral del error. Esto significa que con cada segundo que pasa a 48 km/h, la

acción integral aumenta, incrementando la acción del motor, y por lo tanto, reduciendo el error permanente. La característica más importante de la acción integral en un controlador tipo PI es la reducción del error permanente a cero, incluso cuando la planta ha cambiado su punto de operación, lo cual se vería ejemplificado como un aumento en la pendiente del camino. Sin embargo, este tipo de controlador tiene un efecto secundario nocivo, que se manifiesta como una mayor inestabilidad del sistema controlado (mayor tendencia a oscilaciones).<sup>[11]</sup>

Otra importante contribución a los controladores clásicos es la acción derivativa. Para comprender su funcionamiento, supongamos que el vehículo se encuentra en un principio circulando a 60 km/h. Para una referencia de 50 km/h, el motor decrecerá su potencia notablemente, y disminuirá de esa forma la rapidez del automóvil. Puede ocurrir en este caso, que al llegar a los 50 km/h, aunque la potencia del motor haya aumentado para mantener la rapidez, ésta puede haber disminuido por bajo la referencia debido a que el motor, en condiciones de aceleración negativa, fue incapaz de controlar apropiadamente la rapidez. En este caso, si el controlador hubiese sabido que la rapidez iba decreciendo tan rápido, habría podido actuar en proporción a esa disminución de rapidez para evitar “pasarse” de la referencia. Esto es precisamente lo que haría un controlador con acción derivativa, actuando como un amortiguador para las variaciones en el error. Lo que se tiene hasta el momento puede funcionar muy bien como un sistema de control de velocidad crucero en un vehículo.

Ahora supongamos un último ejemplo, en el que se sitúa la rapidez deseada en 100 km/h, y el vehículo está detenido. Si es un auto rápido, demorará 8 segundos en alcanzar la rapidez deseada; sin embargo, durante esos 8 segundos, la acción integral ha ido integrando el error, generando un valor para la potencia del motor muy elevado, incluso fuera de lo físicamente posible para dicho motor. Para evitar este problema, es posible limitar la acción del integrador, saturándolo para valores mayores que los necesarios para reducir cualquier error permanente. Esta saturación permitirá a la acción integral sólo solucionar el problema del error permanente, sin posibilidad de excederse en su actuar. Un controlador clásico típico no siempre tiene todas las características antes mencionadas, y a veces tiene otras cualidades adicionales, lineales o no lineales, que mejoran su comportamiento. Sin embargo, éstas sobrepasan los límites de esta breve introducción a los sistemas de control clásicos.<sup>[11]</sup>



**Figura 27:** Diagrama de bloques de controlador tipo PID

**Fuente:** [http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional\\_integral\\_derivativo](http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo)

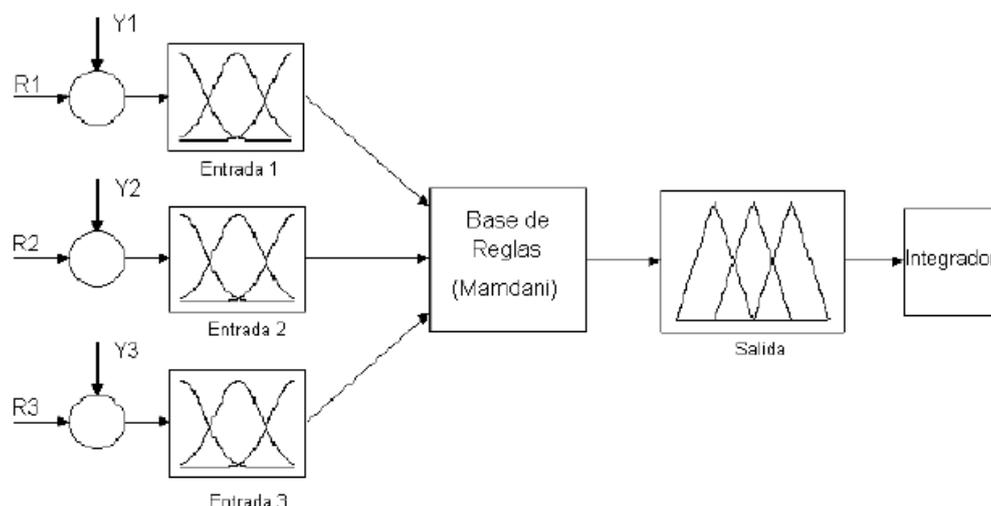
#### 4.5.2. Control Difuso

El concepto de lógica difusa fue concebido por Lotfi Zadeh como una generalización de la lógica booleana convencional. Esta idea fue aplicada al control automático recién en la década de los 70, debido a la inexistencia de computadores suficientemente poderosos hasta ese momento. Esta técnica de control ha tenido su mayor desarrollo en Japón, donde se han realizado muchos aportes a esta idea, y donde se ha aplicado en la industria en un sin número de aplicaciones. Las ventajas del control difuso es la simplicidad para ser desarrollado, la calidad de su respuesta, y su baja sensibilidad a entradas ruidosas e imprecisas.

Los sistemas de control difuso operan con base a conjunto de reglas simples, que se pueden expresar del siguiente modo: “Si la temperatura es baja, aumente la potencia de la caldera” Las reglas aplicadas requieren un conocimiento de la planta a ser controlada, es decir, la forma en que ésta se comportaría en caso de realizar un cambio en alguna de sus entradas. En este sentido, cualquier persona con un mínimo conocimiento acerca de un proceso en particular podría generar una base de reglas para su controlador. En el caso del avión, esta labor puede ser realizada por alguien que conozca la dinámica del avión, por ejemplo, un ingeniero aeronáutico o un piloto. Las reglas de control actúan sobre conjuntos difusos. Por ejemplo, en el caso anterior, la temperatura puede no sólo ser considerada como baja, media o alta; también puede ser un poco de cada una, es decir, pertenecer parcialmente (o en cierto grado) a cada conjunto difuso (baja, media o alta). La transformación de un valor real a un grado de pertenencia en un cierto conjunto difuso se realiza mediante la fusificación, operación a través de la cual se obtiene el nivel de pertenencia de un cierto valor a cada conjunto difuso definido. A partir de esto, se evalúan las reglas difusas y se ponderan las salidas de cada regla de

acuerdo con el nivel de pertenencia de las entradas. De este modo, en el caso del ejemplo, si la temperatura es más baja que media, la caldera aumentará su potencia en un mayor grado que si fuera más media que baja. La operación de transformar las salidas de las reglas en un valor real se denomina defusificación. Puede haber tantos conjuntos de entrada o salida como se requiera para el controlador; éstos pueden estar definidos por diferentes funciones matemáticas que determinan su pertenencia. También existen varios métodos de fusificación, defusificación y bases de reglas. <sup>[11]</sup>

La figura 28 muestra el diagrama de bloques de un sistema de control difuso genérico. En ella se aprecia la etapa de entrada de las variables como errores, el proceso de fusificación, la base de reglas y la defusificación para generar la salida. Puede tener como entradas varias variables o errores en las variables, como también tasas de cambio en alguna de ellas, lo cual le otorga al controlador el equivalente de la acción derivativa en un PID. La salida del controlador puede ser integrada en el tiempo, lo cual permite la supresión de error permanente en estado estacionario. El esquema general de este tipo de controladores es bastante abierto, en el sentido que permite muchas variantes funcionales, que se definen de acuerdo con los requerimientos del sistema que se desee controlar.



**Figura 28:** Diagrama de bloques de controlador difuso genérico

**Fuente:** ABUSLEME, Ángel. CONTROL DIFUSO DE VEHICULO VOLADOR NO TRIPULADO. Santiago de Chile, 2000. Trabajo de grado (Magister en ciencias de ingeniería). Pontificia Universidad Católica de Chile.

A partir del estudio realizado de algunos tipos de controladores, para poderlos aplicar se hace necesario conocer el funcionamiento completo de la planta, por lo menos esta es la condición mínima para aplicar una estrategia de control difusa: a pesar de ser esta una estrategia de control muy versátil, si la

aplicamos podríamos tener problemas a la hora de generar las reglas de control ya que no conocemos el funcionamiento completo de un avión, el cual si lo sabría un ingeniero aeronáutico.

Si aplicáramos una estrategia de control clásico, necesariamente necesitamos conocer la función de transferencia de la planta, el cual para este trabajo no presentamos un modelo linealizado de la planta, esto se debe a que es muy difícil obtenerlo a partir de un análisis matemático, sin embargo podemos recurrir al conocido ensayo y error, hasta lograr un ajuste lo bastante razonable para el funcionamiento del controlador. <sup>[11]</sup>

## 5. INSTRUMENTACIÓN DE UNA PLANTA

Pensando en una futura implementación física del control desarrollado, se debe hacer una selección del sistema de medición que será clave a la hora de conseguir una alta fidelidad a la hora de controlar.

Para este trabajo hablaremos solo de medidores de caudal y válvulas de control.

### 5.1. Medidores de Caudales

#### **TURBINA AXIAL** de BAJO COSTO Para LIQUIDOS

Medición local de Caudal Instantáneo y Volumen totalizado de líquidos limpios y poco viscosos. Por su compacto y práctico diseño permiten reemplazar instrumentos mecánicos de medición en línea como rotámetros, y cuentalitros. Opcionales que permiten el montaje de la unidad indicadora a distancia o bien la generación de una señal de transmisión de 4 a 20 mA proporcional al caudal instantáneo. Están disponibles con cuerpo de aluminio, nylon y acero inoxidable AISI 316, cubriendo un rango de aplicación de ½" a 2".

Instalación: Cañerías ½" a 2", posición horizontal ó vertical indistintamente.

Rango: desde 1,2 L/min a 12 L/min hasta 76 L/min a 760 L/min.

Funciones de la Unidad Electrónica: Total Acumulativo, Total de Batch (reseteable), Caudal Instantáneo, Calibración del Usuario, Indicación de pasaje de caudal.

Capacidad del Display: 6 dígitos, decimal flotante.

Precisión de Fábrica: ±1%.

Precisión Con Calibración: ±0,5% FS.

Construcción: Cuerpo/Rotor: AISI 316 L/PVDF, Aluminio/Nylon, Nylon/Nylon, PVDF/PVDF.

Apto: NEMA 4, FM Approved Clase 1, Div. 2, Gr A.

Versiones/Opciones: GPI-A1/GPI-A2

Origen: EEUU

Precio: US\$ 490



**Figura 29:** TURBINA AXIAL de BAJO COSTO Para LIQUIDOS

**Fuente:** [http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal\\_Sensor.es.pdf](http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal_Sensor.es.pdf)

### **TURBINA AXIAL de PRECISION para LIQUIDOS LIVIANOS y GASES**

Diseñada y construida para mediciones de Alta Exactitud (típicamente 0,5% FS) en muy severas condiciones de Temperatura, desde criogénicas de -265 hasta 232°C (opcionalmente hasta 535°C) y elevadas Presiones hasta 400 bar. Calibraciones Trazables al NIST.

Instalación: Cañerías ¼" a 12".

Rango: 1,8 L/ min hasta 45500 L/min (líquidos) y 0,6 Rm<sup>3</sup>/ h hasta 20.500 Rm<sup>3</sup>/ h (gases).

Exactitud: Repetibilidad mejor que 0,1%.

Construcción: Roscadas, Bridadas # 150, tipo wafer, Rotor de Acero Inox, Cuerpo de Ac. Inox, Plástico (CPVC, Kynar).

Materiales: AISI 304/316.

Linealidad: ± 1 % (gases) y ± 0,5 % (líquidos).

Repetibilidad: ± 0,25 % (gases) y 0,05% (líquidos).

Salida: pulsos senoidales de bajo nivel.

Apto: -265 a 232°C (opcional 535°C), 400 bar.

Opciones:

- 1-Microcaudalímetros.
- 2-Aplicaciones criogénicas.
- 3-Indicadores locales.
- 4-Aplicaciones Sanitarias.

Origen: EEUU

Precio: US\$ 1150



**Figura 30:** TURBINA AXIAL de PRECISION para LIQUIDOS LIVIANOS y GASES

**Fuente:** [http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal\\_Sensor.es.pdf](http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal_Sensor.es.pdf)

**ROTAMETRO METALICO** para BAJOS CAUDALES para LIQUIDOS y GASES

Mide e Indica Caudal Instantáneo. Construido con Tubo de medición Metálico en lugar de Vidrio es el medidor A/V (Area Variable) confiable y exacto para bajos caudales, apto para Altas Presiones y Fluidos Agresivos o Difíciles de Manejar.

Es muy utilizado para dosificar aditivos o ingredientes costosos en Especialidades Químicas, Farmacéuticas, Cosméticas, Alimenticias, así como en Investigación y Desarrollo. Indicador acoplado magnéticamente con escalas intercambiables. Reed switch hermético (opcional) con novedoso doble sensor provee Alarma sin afectar la performance.

Instalación: rosca ¼" hembra.

Rango: 0,13 a 100 litro/hora para agua; 0.1 a 56 litros/mimuto para aire.

Exactitud: ±5%.

Construcción: Tubo y Flotante de Inox 316L, Hastelloy, o Titanio; Sellos de Viton.

Apto hasta 200°C y 100 bar (modelo sin válvula: 275 bar) e Intemperie NEMA 4.

Opciones: 1-Provisto de válvula reguladora; 2-Provisto de Alarma; 3- Apto Zona Ex; 4-Reed Switch hermético.

Características: Metálicos para bajos caudales

Origen: EEUU

Precio: US\$ 650



**Figura 31: ROTAMETRO METALICO** para BAJOS CAUDALES para LIQUIDOS y GASES

**Fuente:** [http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal\\_Sensor.es.pdf](http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/Principios/Caudal_Sensor.es.pdf)

## 5.2. Válvulas de Control

Válvula de regulación de caudal **ARGO** **HYTOS**

Pressure max. 320 bar

Max. Caudal: 16 l/min | VSS1-306, HA5033

Size 06, 3 way flow control valve, 320 bar, 16 l/min, VSS1-306, HA5033

Flow (from ... up to) 16 l/min



**Figura 32:** Válvula de regulación de caudal

**Fuente:** <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/valvula-control-caudal-72057.html>

**Válvula de estrangulación de regulación de caudal** **ARGO**  
**HYTOS**

Pressure max. 100 bar

Max.Caudal: 20 l/min | VSO1-04/R, HA5054

Size 04, fine throttle valve, 100 bar, 20 l/min, VSO1-04/R, HA5054

Flow (from ... up to) 20 l/min



**Figura 33:** Válvula de regulación de caudal

**Fuente:** <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/valvula-control-caudal-72057.html>

## 6. CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo presenta las siguientes conclusiones:

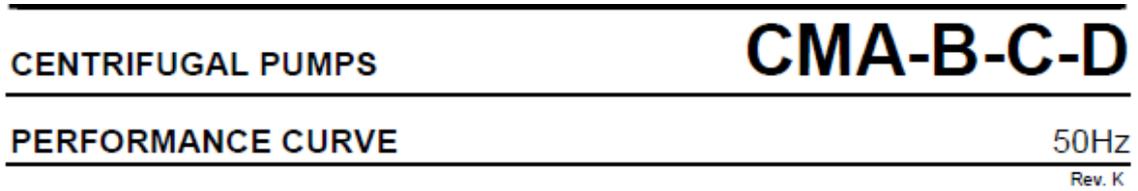
- Se identifico cada uno de los elementos principales que conforman la planta, donde se realizó una breve descripción de cada uno de estos, especialmente acerca de su funcionamiento por medio de formulas matemáticas.
- Se generaron modelos matemáticos en los cuales se pretendía acercarse lo más posible al comportamiento de cada elemento de la planta, donde se tuvieron en cuenta las pérdidas de carga.
- Se seleccionaron valores de parámetros reales de cada componente, para generar un sistema de ecuaciones que incluyera todas y cada una de las variables que intervienen en el proceso.
- Conociendo las ecuaciones que describen el sistema procedemos a modelar cada componente con los valores reales de los parámetros seleccionados, dejando pie a la primera etapa de control.
- Se generaron algoritmos iniciales de control donde se prueba el sistema modelado con un posicionamiento inicial, es decir se realizó una primera etapa de control que permitió ver la respuesta de la planta ante un valor de Presión y Caudal objetivo.
- Se generaron algoritmos de control a partir del sistema de posicionamiento para donde se pudo establecer dos modos de control, en donde se tuvo una respuesta positiva del sistema ante la asignación de valores a las variables operativas.
- Todos los algoritmos generados fueron probados con gran éxito en el software de simulación.

## 7. BIBLIOGRAFIA

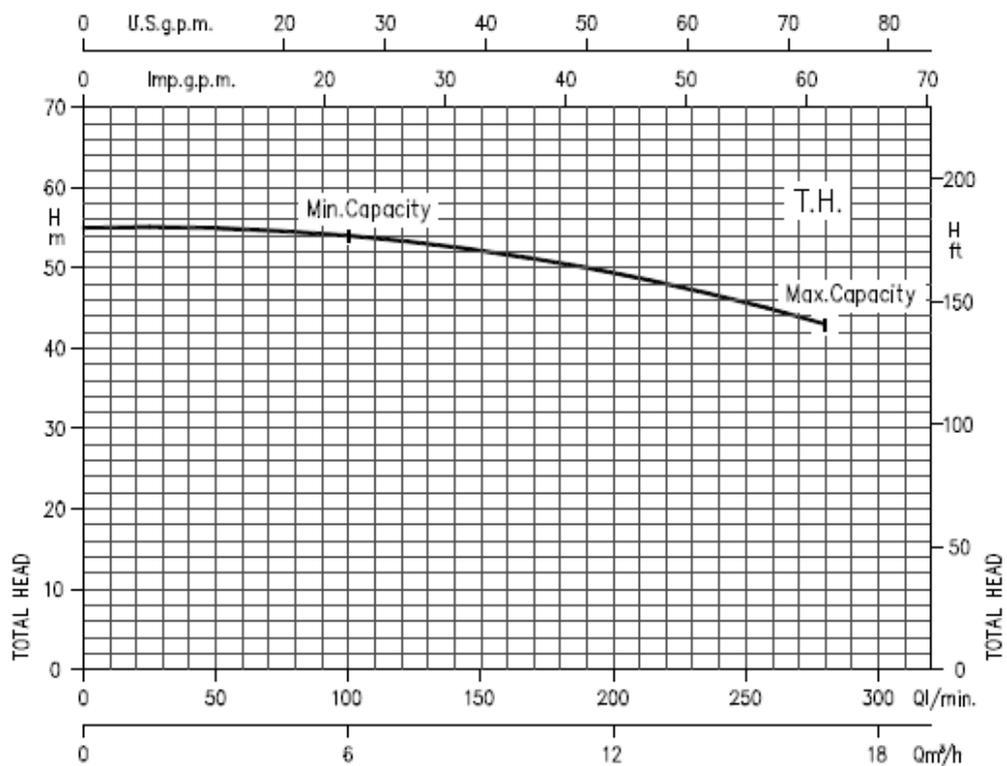
1. <http://www.lenntech.es/tecnologia-de-membrana.htm>
2. [http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba\\_hidr%C3%A1ulica](http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_hidr%C3%A1ulica)
3. [http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba\\_centrofuga](http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_centrofuga)
4. <http://bombasvolum.com/DATOS%20TECNICOS%20DE%20BOMBAS/cursodebombas.pdf>
5. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Mataix, Claudio, Editorial Alfaomega.
6. <http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp>
7. <http://sitioniche.nichese.com/valvulas-hidra.html>
8. [http://www.unav.es/adi/UserFiles/File/80980092/MF\\_Tema5\\_0809.pdf](http://www.unav.es/adi/UserFiles/File/80980092/MF_Tema5_0809.pdf)
9. Material de trabajo. Ingeniería de los Procesos de Membrana, M<sup>a</sup> Isabel Alcaina Miranda, Silvia Álvarez Blanco, María Sancho Fernández.
10. Estudio de la eliminación de nitratos mediante nanofiltración. Estudio realizado en compañía de M<sup>a</sup> Benimeli Cámara. Trabajo Final Asignatura: Ingeniería de los Procesos de Membrana 2011 - 2012.
11. DISEÑO DE UN SISTEMA INCREMENTADOR DE ESTABILIDAD SOBRE EL EJE LATERAL DE UNA AERONAVE UAV. Ingeniería Mecatrónica. Trabajo final de carrera. Universidad Autónoma de Occidente. 2008

## 8. ANEXOS

Anexo 1: Curva característica de bomba centrífuga.



CMB 5.50 (4 kW) - Impeller diameter = 204 mm



Fuente: [http://www.ebara.es/bombas centrifugas horizontales cma.asp](http://www.ebara.es/bombas_centrifugas_horizontales_cma.asp)

## Anexo 2: Hoja de características Bomba de pistones.



Model 5CP2120W Shown  
(Rais and shaft protector sold separately)

### FEATURES

- Triplex design offers high efficiency and low pulsation.
- Durable high pressure seals are lubricated and cooled by pumped liquid.
- Pre-set Lo-Pressure Seals provide secondary protection against external leaks and require no packing adjustment.
- Special high density, polished, concentric plungers provide a true wear surface and extended seal life.
- Optional STHT, FPM and EPDM elastomers for compatibility with many liquids and temperatures up to 200°F.
- Wet-end easily serviced without entering crankcase.

### COMMON SPECIFICATIONS

	U.S.	Metric
Inlet Pressure Range (950 rpm).....	5 to 60 psi	(- 0.35 to 4 bar)
Inlet Pressure Range (1725 rpm).....	Flooded to 60 psi	Flooded to 4 bar
Crankcase Capacity.....	17 oz.	(0.51 l)
Standard Liquid Temperature.....	160°F	(71°C)
Above 130°F call Cat Pumps for inlet conditions and elastomer recommendations.		
Inlet Ports (2).....	1/2" NPTF	(1/2" NPTF)
Discharge Ports (2).....	3/8" NPTF	(3/8" NPTF)
Shaft Diameter.....	0.787"	(20 mm)
Dimensions.....	10.35 x 10.0 x 5.78"	(263 x 254 x 147)

#### CAUTIONS AND WARNINGS

All High Pressure Systems require a primary pressure regulating device (i.e. regulator, unloader) and a secondary pressure relief device (i.e. pop-off valve, relief valve). Failure to install such relief devices could result in personal injury or damage to pump or property. CAT PUMPS does not assume any liability or responsibility for the operation of a customer's high pressure system.

Read all CAUTIONS and WARNINGS before commencing service or operation of any high pressure system. The CAUTIONS and WARNINGS are included in each service manual and with each Accessory Data sheet. CAUTIONS and WARNINGS can also be viewed online at [www.catpumps.com/cautions-warnings](http://www.catpumps.com/cautions-warnings) or can be requested directly from CAT PUMPS.

#### WARRANTY

View the Limited Warranty [on-line](http://www.catpumps.com/warranty) at [www.catpumps.com/warranty](http://www.catpumps.com/warranty).

## 5CP Plunger Pump

### Standard Models

**5CP2120W, 5CP2140WCS  
5CP2150W**

### Special Brass Models

**5CP2120B, 5CP2140B  
5CP2150B**

### SPECIFICATIONS

U.S. Measure    Metric Measure

#### MODEL 5CP2120W and 5CP2120B Belt-Drive

Flow.....	4.0 gpm	(15 lpm)
Pressure Range.....	100-2500 psi	(7-175 bar)
RPM.....	950 rpm	(950 rpm)
Bore.....	0.787"	(20 mm)
Stroke.....	0.709"	(18 mm)
Weight.....	19.14 lbs.	(8.7 kg)

#### MODEL 5CP2140WCS and 5CP2140B Direct-Drive

Flow.....	4.0 gpm	(15 lpm)
Pressure Range.....	100-2500 psi	(7-175 bar)
RPM.....	1725 rpm	(1725 rpm)
Bore.....	0.787"	(20 mm)
Stroke.....	0.394"	(10 mm)
Weight.....	19.14 lbs.	(8.7 kg)

#### MODEL 5CP2150W and 5CP2150B Direct-Drive

Flow.....	5.0 gpm	(19 lpm)
Pressure Range.....	100-2000 psi	(7-140 bar)
RPM.....	1725 rpm	(1725 rpm)
Bore.....	0.787"	(20 mm)
Stroke.....	0.472"	(12 mm)
Weight.....	19.14 lbs.	(8.7 kg)

### ELECTRIC HORSEPOWER REQUIREMENTS

MODELS	FLOW		PRESSURE				MOTOR PULLEY SIZE Using 1725 rpm Motor & Std. #7 Pump Pulley	
	U.S. gpm	lpm	psi	psi	psi	psi		
			1200	1500	2000	2500		
5CP2120W	4.0	15	3.3	4.1	5.5	6.9	950	4.2
Alternate	5.0	19	4.1	5.1	6.9	N/A	1180	5.5
5CP2140WCS	4.0	15	3.3	4.1	5.5	6.9	1725	Direct Drive
5CP2150W	5.0	19	4.1	5.1	6.9	N/A	1725	Direct Drive

DETERMINING THE PUMP R.P.M.      Rated gpm      =      "Desired" gpm  
Rated rpm      =      "Desired" rpm

DETERMINING THE REQUIRED H.P.      gpm x psi      =      Electric Brake  
1460      =      H. P. Required

DETERMINING MOTOR PULLEY SIZE      Motor Pulley O.D.      =      Pump Pulley O.D.  
Pump rpm      =      Motor rpm

See complete Drive Packages (Inclde: Pulleys, Belts, Hubs, Key) Tech Bulletin 003. Refer to pump Service Manual for repair procedure and additional technical information.

Fuente: [http://www.catpumps.com/products/pdfs/5CP2120W\\_F.pdf](http://www.catpumps.com/products/pdfs/5CP2120W_F.pdf)

### Anexo 3: DataSheet Membrana DURASLICK RO 4040.

# Duraslick\* Series

## Low Fouling NF/RO Elements

Duraslick\* is a family series of membrane elements engineered for use with fouling-prone brackish water applications. Duraslick\* is designed to utilize an innovative three-layer membrane, of which a proprietary middle layer creates extreme smoothness, and provide a high rejection of salts.

Independent studies have demonstrated that Duraslick\* elements are superior to standard polyamide spiral wound membrane elements for desalination of difficult feed water sources. Duraslick\* elements retrofit existing systems to obtain lower fouling, reduced overall energy usage, increased membrane service life and an extension of operating time between required cleanings, which in turn reduces expenditures on required chemicals. Duraslick\* HS elements are specially designed for comparatively higher suspended solids levels.

**Table 1: Element Specification**

Membrane	Thin-film membrane (TFM)
----------	--------------------------

Model	Flow average gpd (m3/day) <sup>1</sup>	Salt rejection average (NaCl) <sup>2</sup>	Salt rejection min. (NaCl) <sup>2</sup>
Duraslick RO 2540	675 (2.6)	98.6%	97.0%
Duraslick RO 4040	2,000 (7.6)	98.6%	97.0%
Duraslick RO 4040 HS	1,500 (5.7)	98.6%	97.0%
Duraslick RO 8040	7,700 (29.1)	98.6%	97.0%
Duraslick RO 8040 HS	6,100 (23.1)	98.6%	97.0%

<sup>1</sup> Average salt rejection after 24 hours operation. Individual flow rate may vary +25%/–25%.

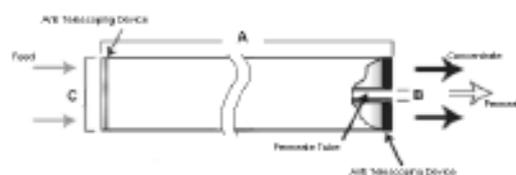
<sup>2</sup> Testing conditions: 800ppm NaCl solution at 225psig (1,551 kPa) operating pressure, 77°F, pH7.5 and 15% recovery.

Model	Flow average gpd (m3/day) <sup>1</sup>	Salt rejection average (MgSO <sub>4</sub> ) <sup>2</sup>	Salt rejection min. (MgSO <sub>4</sub> ) <sup>2</sup>
Duraslick NF 2540	690 (2.6)	98.6%	96.0%
Duraslick NF 4040	2,200 (8.3)	98.6%	96.0%
Duraslick NF 4040 HS	1,700 (5.7)	98.6%	96.0%
Duraslick NF 8040	10,200 (38.6)	98.6%	96.0%
Duraslick NF 8040 HS	7,600 (28.1)	98.6%	96.0%

<sup>1</sup> Average salt rejection after 24 hours operation. Individual flow rate may vary +25%/–25%.

<sup>2</sup> Testing conditions: 2,000ppm MgSO<sub>4</sub> solution at 100psig (690 kPa) operating pressure, 77°F, pH7.5 and 15% recovery.

Model	Spacer Mil (mm)	Active Area ft <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	Outerwrap	Part Number
Duraslick RO 2540	30 (0.76)	27 (2.5)	Fiberglass	1231055
Duraslick RO 4040	30 (0.76)	85 (7.9)	Fiberglass	1231048
Duraslick RO 4040 HS	35 (0.89)	64 (5.9)	Fiberglass	1234306
Duraslick RO 8040	30 (0.76)	350 (32.5)	Fiberglass	1231014
Duraslick RO 8040 HS	35 (0.89)	270 (25.8)	Fiberglass	1234403
Duraslick NF 2540	30 (0.76)	24 (2.2)	Fiberglass	1234305
Duraslick NF 4040	30 (0.76)	70 (7.2)	Fiberglass	1234307
Duraslick NF 4040 HS	35 (0.89)	60 (5.6)	Fiberglass	1234405
Duraslick NF 8040	30 (0.76)	350 (32.5)	Fiberglass	1234182
Duraslick NF 8040 HS	35 (0.89)	263 (24.4)	Fiberglass	1234183



**Figure 1: Element Dimensions Diagram - Female**



Find a contact near you by  
visiting [ge.com/water](http://ge.com/water) or  
e-mailing [custhelp@ge.com](mailto:custhelp@ge.com).

**Global Headquarters**  
Beverly, MA  
+1-215-355-3300

**Americas**  
Waterbury, MA  
+1-617-926-2500

**Europe/Middle East/Africa**  
Heverlee, Belgium  
+32-16-40-20-00

**Asia/Pacific**  
Shanghai, China  
+86 (0) 411-8366-6489

©2007 General Electric Company. All rights reserved.

\*Trademark of General Electric Company, may be registered in one or more countries.

0512692N

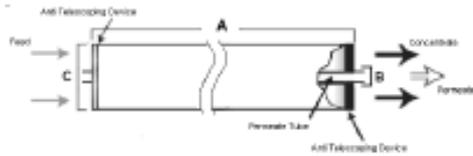


Figure 2: Element Dimensions Diagram - Male

Table 2: Dimensions and Weight

Model <sup>1</sup>	Dimensions, inches (cm)			Booed Weight lbs (kg)
	A	B <sup>2</sup>	C	
Duraslick RD 2540	40.0 (101.6)	0.75 (1.9 OD)	2.4 (6.1)	5 (2.3)
Duraslick RD 4040	40.0 (101.6)	0.75 (1.9 OD)	3.9 (9.9)	8 (3.5)
Duraslick RD 4040 HS	40.0 (101.6)	0.75 (1.9 OD)	3.9 (9.9)	8 (3.5)
Duraslick RD 8040	40.0 (101.6)	1.125 (2.86)	7.9 (20.0)	32 (14.5)
Duraslick RD 8040 HS	40.0 (101.6)	1.125 (2.86)	7.9 (20.0)	32 (14.5)
Duraslick NF 2540	40.0 (101.6)	0.75 (1.9 OD)	2.4 (6.1)	5 (2.3)
Duraslick NF 4040	40.0 (101.6)	0.75 (1.9 OD)	3.9 (9.9)	8 (3.5)
Duraslick NF 4040 HS	40.0 (101.6)	0.75 (1.9 OD)	3.9 (9.9)	8 (3.5)
Duraslick NF 8040	40.0 (101.6)	1.125 (2.86)	7.9 (20.0)	32 (14.5)
Duraslick NF 8040 HS	40.0 (101.6)	1.125 (2.86)	7.9 (20.0)	32 (14.5)

<sup>1</sup>Internal diameter unless specified OD (outside diameter).

<sup>2</sup>These elements ship dry.

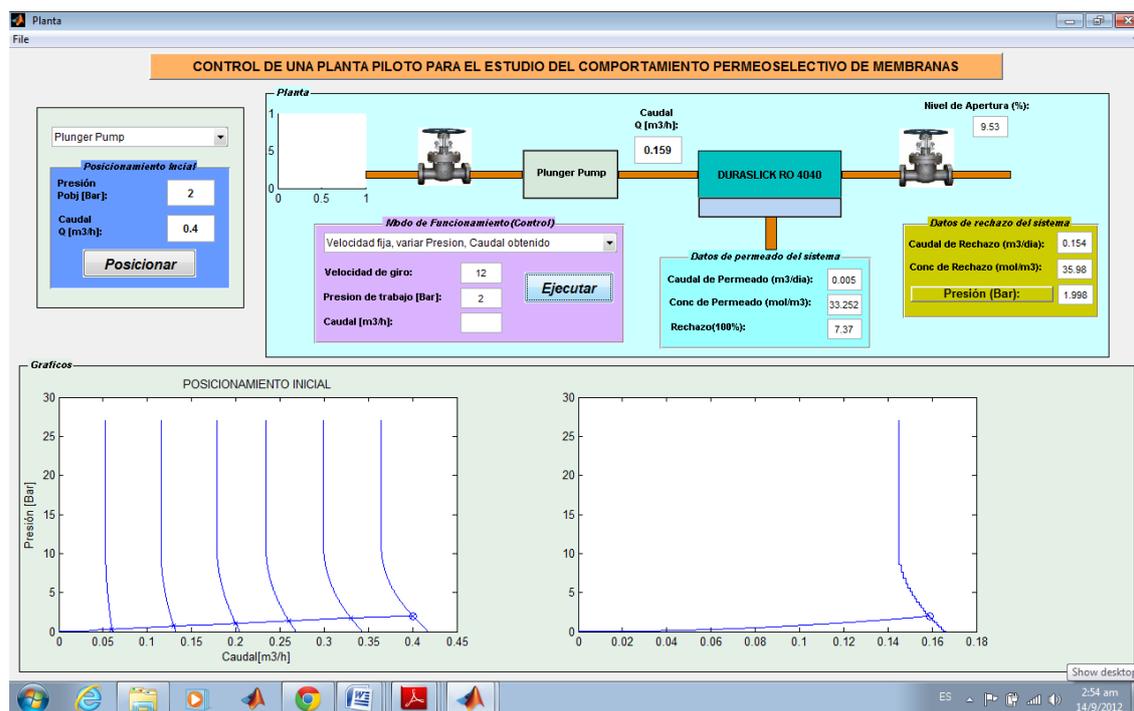
<sup>3</sup>The element diameter (dimension C) is designed for optimum performance in GE Water & Process Technologies pressure vessels. Other pressure vessel dimension and tolerance may result in excessive bypass and loss of capacity.

Table 4: Operating and CIP parameters

Typical Operating Pressure	Duraslick RD: 200 psig (1,379 kPa) Duraslick NF: 100 psig (690 kPa)
Typical Operating Flux	10-15GFD (15-25LMH)
Maximum Pressure	600 psig (4,137 kPa)
Maximum Temperature	Operating: 122°F (50°C) Duraslick RD Cleaning: 122°F (50°C) Duraslick NF Cleaning: 104°F (40°C)
Recommended pH	Duraslick RD: Operating Range pH: 4.0 - 10.0 Cleaning Range pH: 2.0 - 10.5 Duraslick NF: Operating Range pH: 3.0 - 9.0 Cleaning Range pH: 2.0 - 10.5
Recommended Pressure Drop	Over an element: 12 psig (83 kPa) Per housing: 50 psig (345 kPa)
Chlorine Tolerance	500 ppm-hrs, dechlorination recommended
Feedwater	NTU < 1 SDI < 5

Fuente: <http://www.gewater.com/pdf/1232263-%20Specs-%20Duraslick%20RO%202540.pdf>

## Anexo 4: Aplicación gráfica del sistema de control de la planta



**Fuente:** Propia.

Con esta aplicación podemos realizar el posicionamiento inicial, para luego seleccionar el modo de control, observar las graficas, los valores de los parámetros de la membrana se actualizan con cualquier cambio en las variables operativas.