

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



***ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN
SERVICIO DE VÁLVULAS DE FUNDICIÓN POR
MECANISMOS DE EROSIÓN-CAVITACIÓN.***

Máster:
Ingeniería Mecánica y Materiales.

AUTOR:
D. Antonio M. Romero Sedó.

DIRECTOR:
Dr. D. Alfonso C. Cárcel González.

Valencia, 1 de Septiembre de 2012



Índice

	Página
1.-INTRODUCCIÓN.	1
1.1.- Presentación.	1
1.2.- Cavitación.	2
1.2.1.- <i>La depresión, causa de la cavitación.</i>	2
1.2.2.- <i>Morfología de la cavitación.</i>	7
1.2.3.- <i>Materiales resistentes a la cavitación.</i>	8
1.2.4.- <i>Control de la cavitación.</i>	9
1.3.- Modelo hidráulico para el análisis y diagnóstico del fallo para el estudio de la erosión-cavitación en válvulas de compuerta.	10
1.3.1.- <i>Recursos hídricos, crecimiento demográfico, consumo de agua y rendimiento actual de las redes de abastecimiento.</i>	11
1.3.1.1.- <i>Recursos hídricos.</i>	11
1.3.1.2.- <i>Estudio estadístico del crecimiento demográfico.</i>	12
1.3.1.3.- <i>Estudio estadístico de consumos de agua potable.</i>	13
1.3.1.4.- <i>Rendimiento actual del servicio público de abastecimiento de agua potable.</i>	14
1.3.2.- <i>Obtención de la curva de modulación hidráulica a partir del estudio de los consumos durante el período agosto 2009 a agosto 2010.</i>	16
1.3.2.1.- <i>Introducción.</i>	16
1.3.2.2.- <i>Consumo anual.</i>	17
1.3.2.3.- <i>Consumo mensual.</i>	18
1.3.2.4.- <i>Consumo semanal.</i>	19
1.3.2.5.- <i>Consumo diario.</i>	20
1.3.3.- <i>Analíticas del agua de la población. Período de 1992 a 2008.</i>	22
1.3.4.- <i>Material de las tuberías.</i>	23
1.3.4.1.- <i>Amianto cemento (fibrocemento), material en servicio.</i>	24
1.3.4.2.- <i>Acero galvanizado (Fe-Zn), material nuevo.</i>	25
1.3.4.3.- <i>Acero galvanizado (Fe-Zn), material en servicio.</i>	27
1.3.4.4.- <i>Acero inoxidable, material nuevo.</i>	29
1.3.4.5.- <i>Acero, material nuevo.</i>	31
1.3.4.6.- <i>Cobre, material nuevo.</i>	33
1.3.4.7.- <i>Plomo, material en servicio.</i>	35
1.3.4.8.- <i>Poli-cloruro de vinilo no plastificado (PVC-U), material nuevo.</i>	37



(continuación del índice)

	Página
1.3.4.9.- Poli-etileno de alta densidad (HDPE), material nuevo.	38
1.3.4.10.- Poli-etileno de baja densidad (LDPE), material nuevo.	39
1.3.5.- Simulación dinámica del modelo hidráulico ajustado de la red general de abastecimiento de agua potable.	40
1.3.5.1.- Variables y criterios de cálculo.	40
1.3.5.2.- Ajustes del modelo.	40
1.3.5.3.- Resultados del modelo estado actual.	44
1.3.5.4.- Resultados del modelo para la válvula en estado de cavitación.	48
2.- DETALLES EXPERIMENTALES.	53
2.1.- Introducción.	53
2.2.- Características de las válvulas a estudio.	53
2.2.1.- Materiales.	53
2.2.2.- Válvula antiguo diseño o con resalte hidráulico (VA). Patologías.	54
2.2.3.- Válvula nuevo diseño o sin resalte hidráulico (VN).	60
2.3.- Condiciones de contorno. Variables hidráulicas y geométricas.	61
2.3.1.- Densidad y viscosidad cinemática del agua.	62
2.3.2.- Presión y caudal.	62
2.4.- Método de cálculo utilizado por MEF.	63
3.- RESULTADOS Y ANÁLISIS.	65
3.1.- Introducción.	65
3.1.1.- Series de cálculos. Altura de abertura, presión y caudal.	65
3.1.2.- Resultados necesarios para determinar la erosión-cavitación.	65
3.1.3.- Coordenadas y cotas de estudio.	66
3.1.4.- Mallado.	67
3.2.- Resultados válvula antiguo diseño o con resalte hidráulico (VA).	69
3.2.1.- VA. Abertura $h=3$ mm, $P=20$ mca, $Q=20$ l/s.	69
3.2.2.- VA. Abertura $h=3$ mm, $P=40$ mca, $Q=20$ l/s.	73
3.2.3.- VA. Abertura $h=3$ mm, $P=60$ mca, $Q=20$ l/s.	77
3.2.4.- VA. Abertura $h=3$ mm, $P=120$ mca, $Q=20$ l/s.	81
3.2.5.- VA. Resumen para $h=3$ mm, $P=20, 40, 60$ y 120 mca, $Q=20$ l/s.	85
3.2.6.- VA. Abertura $h=6$ mm, $P=20$ mca, $Q=20$ l/s.	87
3.2.7.- VA. Abertura $h=6$ mm, $P=40$ mca, $Q=20$ l/s.	91



	Página
3.2.8.- VA. Abertura $h=6$ mm, $P=60$ mca, $Q=20$ l/s.	95
3.2.9.- VA. Abertura $h=6$ mm, $P=120$ mca, $Q=20$ l/s.	99
3.2.10.- VA. Resumen para $h=6$ mm, $P=20, 40, 60$ y 120 mca, $Q=20$ l/s.	103
3.2.11.- VA. Abertura $h=9$ mm, $P=20$ mca, $Q=20$ l/s.	105
3.2.12.- VA. Abertura $h=9$ mm, $P=40$ mca, $Q=20$ l/s.	109
3.2.13.- VA. Abertura $h=9$ mm, $P=60$ mca, $Q=20$ l/s.	113
3.2.14.- VA. Abertura $h=9$ mm, $P=120$ mca, $Q=20$ l/s.	117
3.2.15.- VA. Resumen para $h=9$ mm, $P=20, 40, 60$ y 120 mca, $Q=20$ l/s.	121
3.3.- Resultados válvula nuevo diseño o sin resalte hidráulico (VN).	123
3.3.1.- VN. Abertura $h=3$ mm, $P=20$ mca, $Q=20$ l/s.	123
3.3.2.- VN. Abertura $h=3$ mm, $P=40$ mca, $Q=20$ l/s.	124
3.3.3.- VN. Abertura $h=3$ mm, $P=60$ mca, $Q=20$ l/s.	125
3.3.4.- VN. Abertura $h=3$ mm, $P=80$ mca, $Q=20$ l/s.	126
3.3.5.- VN. Abertura $h=6$ mm, $P=40$ mca, $Q=20$ l/s.	127
3.3.6.- VN. Abertura $h=6$ mm, $P=80$ mca, $Q=20$ l/s.	128
3.3.7.- VN. Abertura $h=9$ mm, $P=40$ mca, $Q=20$ l/s.	129
3.3.8.- VN. Resumen para $h=6$ mm, $P=20, 40$ y 80 mca, $Q=20$ l/s; $h=9$ mm, $P=40$ y 80 mca, $Q=20$ l/s.	130
3.3.- Análisis.	133
3.3.1.- Válvula antiguo diseño o con resalte hidráulico (VA).	133
3.3.2.- Válvula nuevo diseño o sin resalte hidráulico (VN).	136
4.- CONCLUSIONES.	139
4.1.- Resumen.	139
4.2.- Recomendaciones.	142
4.3.- Temas de investigación.	143
5.- REFERENCIAS.	145

1. INTRODUCCIÓN.

1.1.- Presentación.

Las válvulas de compuerta son accesorios utilizados de forma muy generalizada en las redes de abastecimiento de agua potable en la mayoría de los municipios, siendo su coste una parte muy importante en el conjunto global de las instalaciones. Los factores que permiten que este accesorio posea una vida útil elevada depende fundamentalmente del diseño del corte de la vena líquida, resistencia mecánica de los materiales, mantenimiento y manipulación. En este trabajo se analiza el diseño del corte de la vena líquida y su correlación con los daños por cavitación y erosión observados en los materiales. En redes de agua, este po de daños corrosivos se producen siempre asociados a determinadas condiciones de circulación del fluido, siendo además acelerados por la corrosividad intrínseca del agua circulante. Ambos producen pérdidas localizadas de material metálico. Los daños de corrosión por erosión se dan en condiciones de alta velocidad de circulación, normalmente por encima de 5m/s. Los daños por cavitación se dan en condiciones críticas que permiten la generación de vapor de agua [1,2].

Para estimar las condiciones críticas en diversas zonas de las válvulas se empleará un estudio mediante simulación MEF, que es la técnica actualmente empleada para el análisis de este tipo de problemas en componentes de geometría compleja, como bombas, válvulas o propulsores marinos [3,4] de las causas que han provocado la retirada del servicio de estos accesorios y se proponen recomendaciones para su correcta elección. Las variables hidráulicas que condicionan el estudio son la presión y el caudal.

La calidad del agua como la dureza total (TH) e índice de estabilidad (índice de Langelier, IS) no se han tenido en cuenta por razones atribuibles a otro tipo de patologías de daño por corrosión [1,2], las cuales merecen un estudio aparte y distinto al planteado.

Para el desarrollo de este capítulo introductorio cuya finalidad es el estudio de la erosión–cavitación en válvulas de compuerta se ha estimado conveniente dividirlo en dos apartados cuyos contenidos son:

1. “*Cavitación*”. Se centra en el conocimiento del fenómeno físico que lo provoca, la morfología de las patologías en instalaciones de elementos estáticos y máquinas hidráulicas, así como los materiales resistentes a la cavitación, y por último, en el control de la cavitación.

2. “*Modelo Hidráulico*”. Su estudio es imprescindible para el conocimiento y cuantificación de las condiciones de trabajo de la válvula. El hilo conductor de este apartado es la Mecánica de Fluidos cuyos datos se han procesado a través de software específico, y los resultados obtenidos son el origen de partida para establecer las condiciones de contorno del capítulo 2 “Detalles experimentales”. El estudio de este apartado se acota hasta el periodo de tiempo en el que se detectó la patología en las redes de abastecimiento.

1.2.- Cavitación.

1.2.1.- La depresión, causa de la cavitación.

La cavitación es un fenómeno físico que se produce cuando la presión de un fluido viscoso en régimen turbulento desciende por debajo de un valor mínimo admisible [5]. Este fenómeno físico puede producirse en elementos estáticos de la instalación (tuberías, codos, diafragmas, venturis, etc.), en máquinas hidráulicas (bombas, turbinas, hélices etc.), en dispositivos de regulación de caudal, presión (válvulas automáticas) y elementos auxiliares (válvulas manuales). La cavitación produce efectos destructivos sobre las instalaciones hidráulicas a corto o a largo plazo debido a los siguientes criterios:

- a. Diseño incorrecto de la instalación.
- b. Elección inadecuada de los materiales.
- c. Incorrecto funcionamiento de la instalación.

La bibliografía docente existente se centra en la mayoría de las ocasiones en poder describir este fenómeno a partir del estudio de las máquinas hidráulicas, tal vez por la facilidad de poder reproducir este fenómeno en el laboratorio. Partiendo de este premisa se describe a continuación una instalación formada por un una bomba roto-dinámica impulsada por un motor eléctrico y de las tuberías de aspiración e impulsión con todos los elementos mínimos necesarios, *figura 1.1*. Se representan la línea piezométrica del fluido con la finalidad de ver la variación de la presión del agua en el interior de la instalación en todo el proceso de trasiego. Se observa que la máxima depresión se alcanza en una parte de la cámara espiral del rodete a la entrada de la bomba (punto r). Si la depresión alcanzada es igual a la presión de saturación del líquido ($P_r = P_{sa}$) se genera una formación de burbujas que son arrastradas por la corriente de fluido aguas arriba e irán creciendo de tamaño cuanto más descienda P_r respecto de P_{sa} . El fenómeno de la cavitación se produce cuando las burbujas son sometidas a presiones elevadas superiores a la presión de saturación de una forma súbita provocando su colapso por eliminación de la fase gaseosa, en este proceso se libera calor con aparición de una onda de choque de elevada intensidad que golpea la pared del sólido que la contiene. La gran cantidad de burbujas formadas

por las bajas presiones alcanzadas seguidas de sus correspondientes colapsos por sobrepresión en periodos de frecuencia elevados lleva consigo a una fatiga mecánica del material con la formación de oquedades y arranque del material [6]. El fenómeno de la cavitación en máquinas hidráulicas es un tema bastante estudiado por los fabricantes y la mayoría de los catálogos comerciales incluyen las curvas del NPSHr, curva atribuible al diseño de la máquina, para que el proyectista junto con la curva del NPSHd, curva atribuible a diseño de la instalación, pueda predecir y evitar este fenómeno cuya justificación se describe a continuación [7].

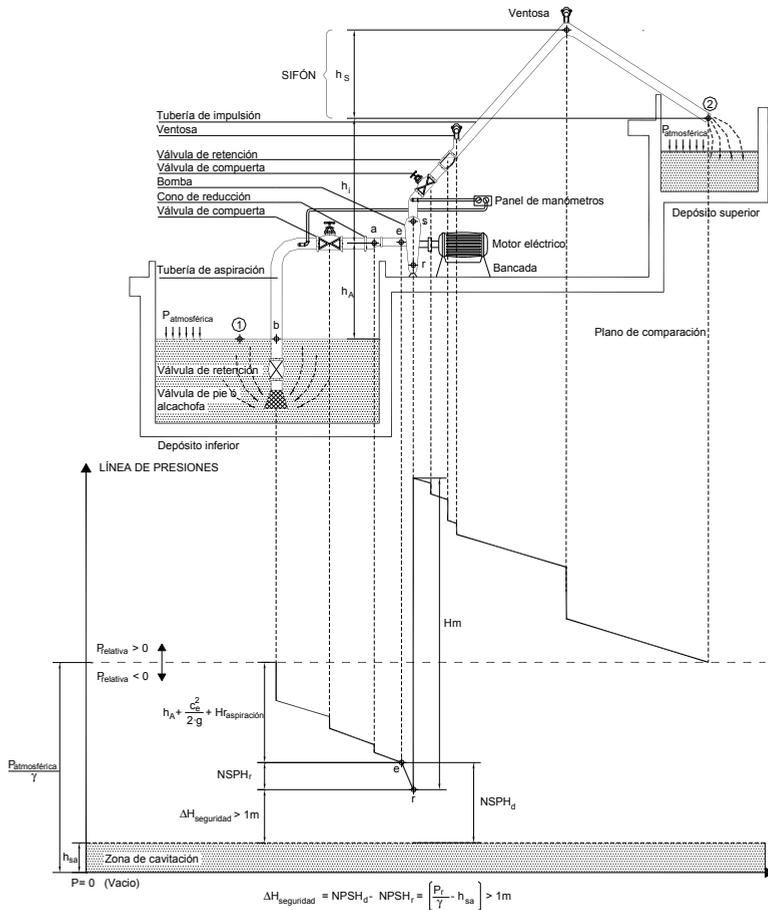
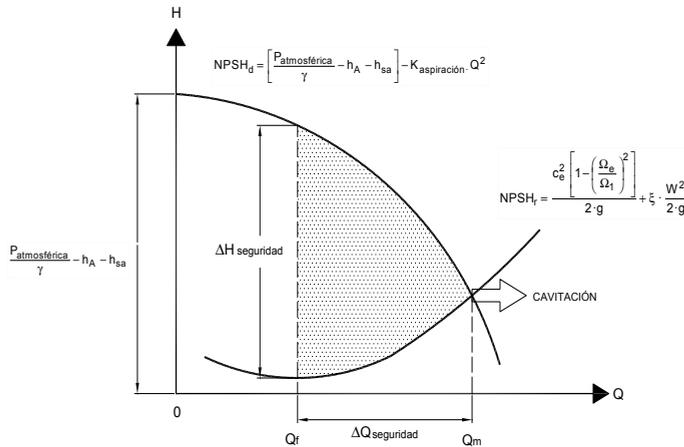


Fig. 1.1.- Esquema de la instalación de un grupo presión.

La condición de cavitación en la bomba se producirá cuando se cumpla la condición $NPSH_d = NPSH_r$, figura 1.2, ecuación (1.1).



La bomba nunca deberá de funcionar con caudales iguales a Q_m , por razones de seguridad. Para evitar situaciones extremas próximas a la cavitación deberá de cumplirse que:

$$Q_f < Q_m.$$

Fig. 1.2.- Esquema de las curvas NPSHd, y NPSHr.

$$NPSH_d = \left[\frac{P_{atmosférica}}{\gamma} - h_A - h_{sa} \right] - K_{aspiración} \cdot Q^2 = \left[\frac{P_{atmosférica}}{\gamma} - h_A - h_{sa} \right] - H_{r_{aspiración}} \quad (1.1)$$

El punto máximo de funcionamiento $H_m(Q)=f(Q)$, de la figura 1.3, indica el caudal máximo a presión mínima para evitar la cavitación en el rodete.

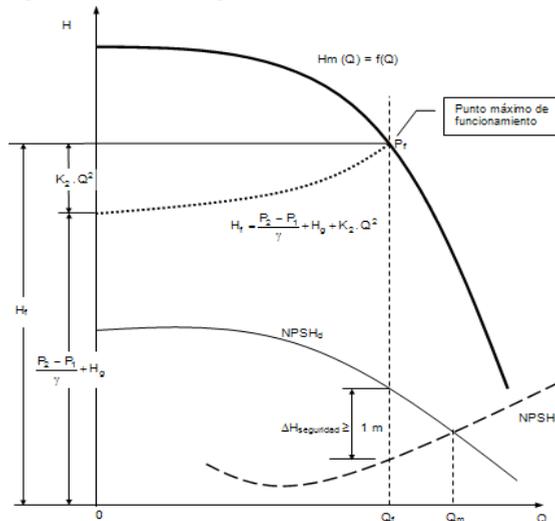


Fig. 1.3.- Punto máximo de funcionamiento de bomba.

También es posible la aparición de este fenómeno a presiones más elevadas y caudales más reducidos como se indica en la figura 1.4. Hacer trabajar la bomba en puntos de la curva NPSHr condicionada por la curva NPSHd, producen un

mayor o menor número de burbujas de vapor de agua, lo que restringe los valores de las variables correspondientes a la altura manométrica y caudal.

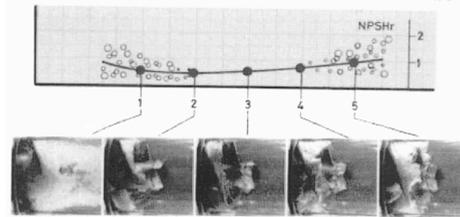


Fig. 1.4.- Turbulencias en el rodete en cada punto de la curva NPSHr.

Para evitar la cavitación en la bomba a caudal máximo y presión mínima (punto Pf), figura 1.3, debe de cumplirse la ecuación (1.2).

$$\Delta H_{\text{seguridad}} = \frac{P_r}{\gamma} - h_{sa} = NPSH_d - NPSH_r > 1 \text{ m} \quad (1.2)$$

La altura de saturación del agua mantiene una correlación con su temperatura a presión atmosférica que sigue un modelo de Gauss figura 1.5, estando condicionada la altura de aspiración de la bomba a la temperatura de trasiego del fluido.

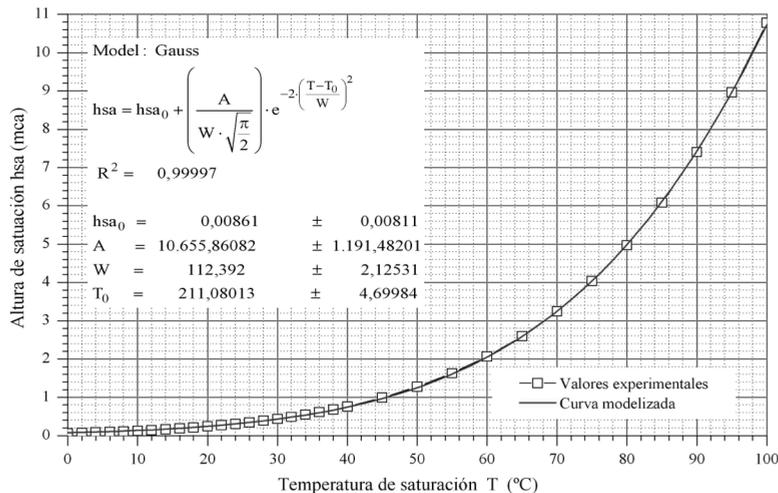


Fig. 1.5.- Correlación h_{sa} vs. T , para el agua a presión atmosférica.

A medida que aumenta la temperatura, también aumenta la altura de saturación disminuyendo la altura de aspiración de la bomba.

Las curvas características de las bombas se obtienen en un banco de ensayos, *figura 1.6* (laboratorio de instalaciones I, II e infraestructuras urbanas de la UPV). Cuyos datos obtenidos se procesan de forma matemática a través de ajustes mediante regresión parabólica por mínimos cuadrados, *figura 1.7*.

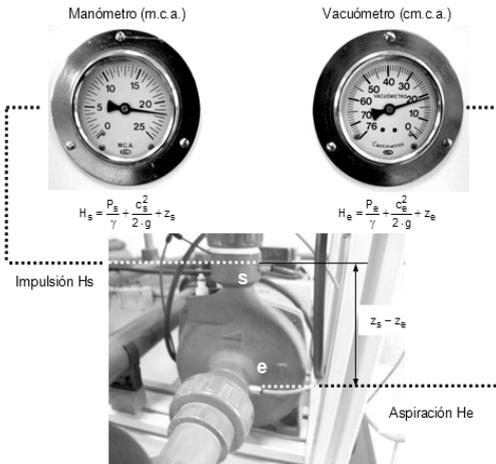


Fig. 1.6.- Banco de ensayos.

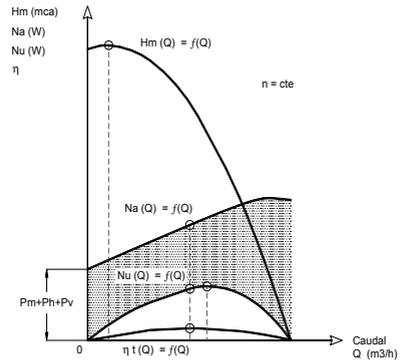


Fig. 1.7.- Curvas características.

Como ejemplo se puede modelizar la altura manométrica $H_m(Q) = f(Q)$, *figura 1.7*, a través del ajuste teórico $H_m(Q) = A + B \cdot Q + C \cdot Q^2$ cuyo procedimiento de resolución se realiza a través del momento cuadrático M (ecuación 1.3a, 1.3b).

$$M = \sum_{i=1}^n (H_{m_i} - n \cdot A - B \cdot Q_i - C \cdot Q_i^2)^2 \quad (1.3a)$$

Siendo “n” el número total de ensayos ($n=10$ como mínimo) y A, B y C los valores a obtener del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial A} &= -2 \cdot \sum_{i=1}^n (H_{m_i} - n \cdot A - B \cdot Q_i - C \cdot Q_i^2) = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial B} &= -2 \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \cdot (H_{m_i} - A - B \cdot Q_i - C \cdot Q_i^2) = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial C} &= -2 \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^2 \cdot (H_{m_i} - A - B \cdot Q_i - C \cdot Q_i^2) = 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \sum_{i=1}^n H_{m_i} &= n \cdot A + B \cdot \sum_{i=1}^n Q_i + C \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^2 \\ \sum_{i=1}^n Q_i \cdot H_{m_i} &= A \cdot \sum_{i=1}^n Q_i + B \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^2 + C \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^3 \\ \sum_{i=1}^n Q_i^2 \cdot H_{m_i} &= A \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^2 + B \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^3 + C \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^4 \end{aligned} \quad (1.3b)$$

1.2.2.- Morfología de la cavitación.

A nivel macro la cavitación se distingue por la formación de picaduras en el material hasta producirse verdaderas oquedades de profundidad y extensión considerable, como resultado de la eliminación progresiva del material de la superficie por efecto mecánico de impacto repetido de las implosiones de las burbujas de gas sobre la superficie de la pieza. El proceso prosigue con la formación de una superficie rugosa que contiene un gran número de microcráteres de diámetro variable llegando incluso a la perforación del material, *figuras 1.8 y 1.9.*



Cavitación en una tubería de cobre (elemento estático), *figura 1.8* en una instalación doméstica de agua potable. Este tipo de patología aparece en la mayoría de las ocasiones por un mal diseño en el trazado de las instalaciones y estableciendo de forma errónea las variables de caudal y presión a suministrar por las compañías de aguas potables como valores constantes a lo largo del tiempo. Perforación interior $\phi=0,5$ mm.

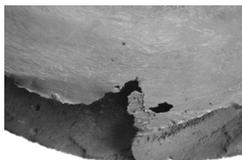
Fig. 1.8.-Tubería de cobre 18x0,8 mm.



Cavitación en un cono de reducción (elemento estático), *figura 1.9* en la tubería de impulsión de una instalación de abastecimiento de agua potable. Esta patología suele aparecer en los sifones del trazado de la propia tubería debido a los fuertes desniveles del terreno. Perforación interior $\phi=5$ mm.

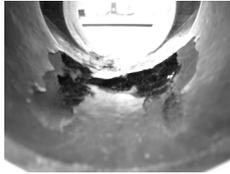
Fig. 1.9.-Codo de reducción de acero DN-250/200.

Cuando la cavitación es muy severa, el arranque del material es considerable llegando a alcanzar la pérdida parcial y en algunos casos total de la pieza metálica, *figura 1.10 y 1.11.*



Cavitación en el rodete de una bomba roto-dinámica (máquina hidráulica). En la *figura 1.10* se muestra la rotura del rodete de $\phi=120$ mm, de una bomba roto-dinámica con rotura parcial por el efecto de cavitación en el interior de la bomba. La cavitación en los rodetes de las bombas suele producirse en la mayoría de los casos por hacer trabajar a la bomba con depresiones bastante importantes en la voluta de la bomba.

Fig. 1.10.- Rodete de bronce al aluminio.



Válvula de compuerta (elemento estático). Patología producida por erosión – cavitación *figura 1.11* debido a un diseño inadecuado del cuerpo inferior metálico de la válvula. Este tipo de patología es muy común en las válvulas de compuerta de ahí su interés en el análisis y modelización en esta Tesis del Máster.

Fig. 1.11.-Válvula de fundición gris DN-100.

A nivel micro-fractográfico el proceso de dañado por cavitación se diferencia según la dureza de los materiales, de baja o alta dureza [6].

- a. Materiales blandos. La cavitación se inicia con signos de formación plástica, con líneas de deslizamiento conformando intrusiones y extrusiones sobre la superficie, típico de metales sometidos a cargas de fatiga. En este proceso la superficie del material toma la apariencia de ondulaciones.
- b. Aleaciones duras. El proceso de plastificación puede obviarse en gran parte, conduciendo a la formación de grietas de fatiga que pueden propagarse de forma inter-granular.

1.2.3.- Materiales resistentes a la cavitación.

En general los requisitos que se demandan para la construcción de álabes en las máquinas hidráulicas son [6]:

- Facilidad de fabricación por moldes.
- Alta resistencia mecánica.
- Buena resistencia a la corrosión en función del fluido a trasegar.
- Resistencia a la erosión por cavitación.
- Dificultad al ensuciamiento.
- Facilidad de reparación por aporte de material.

Los materiales empleados para altos requisitos como hélices marinas son:

- Bronces al aluminio con adición de níquel.
- Bronces al manganeso con adición de hierro.
- Aceros inoxidable austeníticos tipo 316 L.
- Aceros inoxidable martensíticos con adiciones de níquel, cobalto o manganeso.
- Aleaciones base cromo con adiciones de manganeso y cobalto.
- Aleaciones base cobalto con adiciones de níquel, cromo o carbón.

1.2.4.- Control de la cavitación.

En general el control de la cavitación por parte de la industria tiene como objetivo la construcción de máquinas hidráulicas (bombas, turbinas, hélices etc.), disponiendo de laboratorios y equipos para su ensayo con la finalidad de diseñar y mejorar sus productos. Los ensayos para reproducir la cavitación en máquinas hidráulicas entran en una cierta dificultad de espacio en función del tamaño de la máquina a ensayar, pero no en su concepto físico y matemático para su estudio cuya bibliografía docente y de investigación es bastante extensa.

En lo que respecta al estudio de la cavitación en válvulas, es bien distinto, la escasa bibliografía en este campo hace que su estudio se realice de forma puntual y en cada caso esta subyugado a las variables hidráulicas, diseño de la instalación y principalmente al diseño del fabricante (geometría, materiales empleados, resistencia mecánica, etc.). La escasa atención del fenómeno de la cavitación en este tipo de accesorios puede venir justificada por los siguientes criterios:

- Costes de adquisición relativamente bajos debido al gran número de fabricantes existentes con un mercado competitivo.
- Facilidad de montaje y reposición con escasos tiempos de montaje debido a su estandarización.
- Escasa relevancia como accesorio en comparativa con el resto de las instalaciones (grupos de presión sumergidos, tuberías de aducción, válvulas anti-ariete, válvulas reguladoras, sostenedoras, etc.).
- Escaso número de válvulas con patologías para su estudio. En la mayoría de las ocasiones las válvulas suelen reciclarse dificultando la localización de las piezas con la patología.
- Coste de peritaje muy elevado en comparativa con el coste de adquisición.

Esto añadido al desconocimiento y falta de formación por parte de los proyectistas en las disciplinas de la mecánica de fluidos, ciencia de los materiales, mecánica, etc., hace que en multitud de ocasiones las instalaciones funcionen de forma incorrecta con el consiguiente coste económico, atribuible siempre, para evadir responsabilidades de los proyectistas, a la falta de mantenimiento, manipulación, variación de la calidad del agua, etc. En la actualidad existen herramientas de trabajo basadas en la computarización (con limitaciones) que hace posible su análisis y modelización así como la definición de su campo de trabajo.

1.3.- Modelo hidráulico para el análisis y diagnóstico del fallo para el estudio de la erosión - cavitación en válvulas de compuerta.

El funcionamiento de las redes urbanas y su modelización es imprescindible para:

- A. Conocer las condiciones de servicio: presión, caudal y las condiciones de salubridad del agua distribuida en las redes urbanas a través del cloro residual.
- B. Ubicar el lugar donde se encuentra la válvula de compuerta la cual está sometida a patologías de erosión – cavitación.
- C. Cuantificar las condiciones teóricas de servicio de caudal y presión en la válvula de compuerta que dará lugar a establecer los parámetros iniciales del estudio por MEF.

Para ello es necesario realizar el estudio de los siguientes apartados:

1. Recursos hídricos, crecimiento demográfico, consumo de agua potable y rendimiento actual de las redes de abastecimiento.
2. Obtención de la curva de modulación hidráulica del estudio de consumos.
3. Analíticas del agua potable de la población.
4. Materiales de las tuberías.
5. Simulación dinámica del modelo hidráulico.

Apartados que se estudian por separado dentro del periodo de tiempo en el que se detectó la patología en la válvula de erosión – cavitación. Los cálculos hidráulicos se han realizado a través del software especializado con la finalidad de conseguir:

- a. La obtención y procesamiento de datos hidráulicos (caudal y presión) [8].
- b. La simulación hidráulica en régimen dinámico [9, 10].

Así mismo el ajuste del modelo hidráulico se ha realizado mediante métodos basados en técnicas de optimización de la función matemática denominada función de discrepancia (DISC).

Los datos y cálculos iniciales parten del proyecto final de carrera del cual soy autor [11], habiendo sido ampliados y adaptados para la obtención del modelo para la válvula en estado de cavitación.

1.3.1.- Recursos hídricos, crecimiento demográfico, consumo de agua y rendimiento actual de las redes de abastecimiento.

1.3.1.1.- Recursos hídricos.

El Ayuntamiento de Pedralba dispone del derecho de aprovechamiento de tres pozos situados en el término municipal de Pedralba cuya denominación y volumen máximo anual son los siguientes:

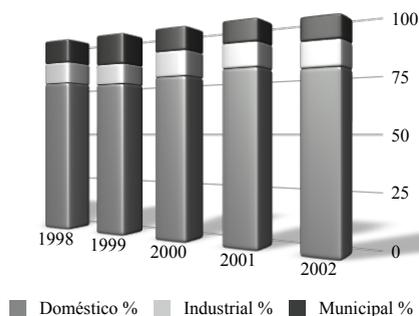
- Pozo Barranco Chiva (actualmente sin explotación).
- Pozo La Serretilla, volumen de explotación: 365.204 m³/año.
- Pozo Serretilla 2, cuyo caudal es de 40 litros/segundo. Este pozo puede suministrar para una explotación de 10 horas al día un volumen anual de 525.600 m³/año.

El volumen anual disponible es de 890.804 m³/año para garantizar la suficiencia de los recursos hídricos para la población y actividades (industriales, artesanas, etc.). En lo que respecta a la estructura de consumo la distribución en función de los usos en el periodo de estudio viene en la *tabla 1.1*, representado en la *figura 1.12*.

DISTRIBUCIÓN DEL USO DEL AGUA

Periodo	Doméstico %	Industrial %	Municipal %
1998	77	11	12
1999	75	10	15
2000	77	12	11
2001	79	11	10
2002	77	11	10

Tabla 1.1.- Distribución del uso del agua.



La mayor parte del agua consumida se emplea para uso doméstico en torno al 77% y el resto se destina a los usos industrial y municipal.

Fig. 1.12.- Distribución gráfica de uso del agua según tabla 1.2.

1.3.1.2.- Estudio estadístico del crecimiento demográfico.

El estudio demográfico del crecimiento de la población se ha realizado basándose en los datos estadísticos del censo de la población de Pedralba y del INE. La curva modelizada de mayor ajuste viene dada por la *figura 1.13*.

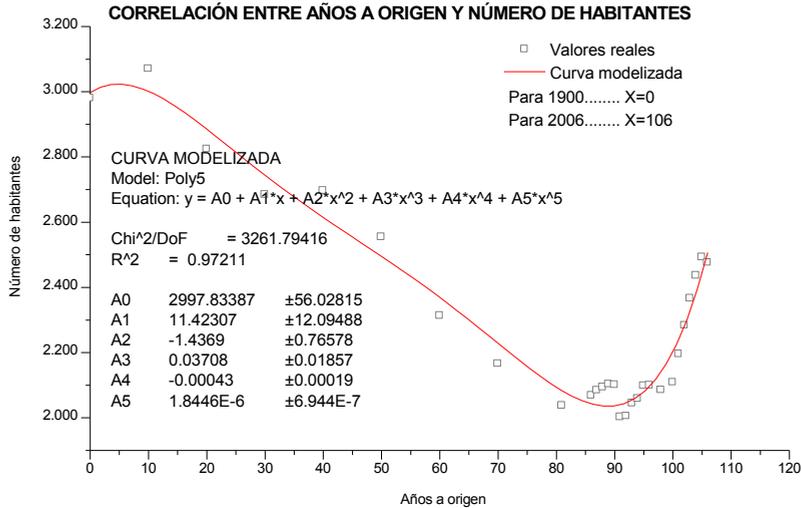


Fig. 1.13.- Correlación Número de habitantes vs. Año estimado.

Los valores de crecimiento estimados hasta el 2037 vine dado por la *tabla 1.2*.

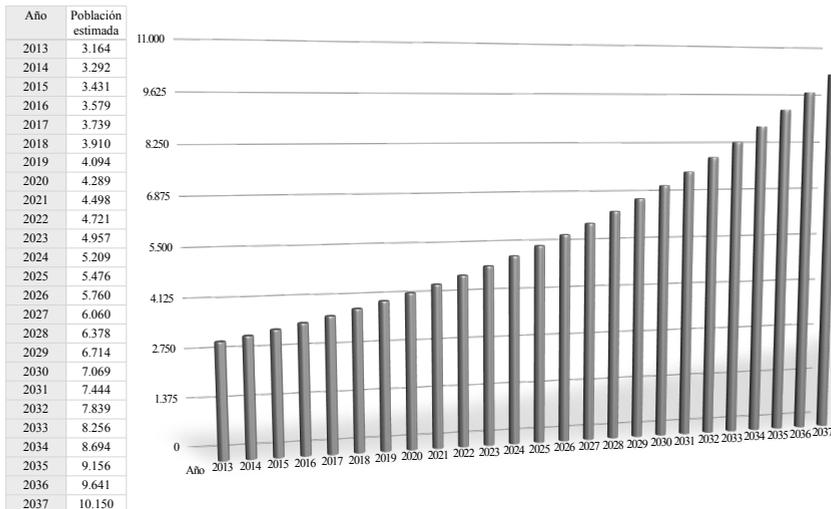


Tabla 1.2.- Crecimiento estimado de la población.

1.3.1.3.- Estudio estadístico de consumos de agua potable.

El siguiente estudio se ha obtenido en base a los datos facilitados por la compañía que gestiona la red de abastecimiento de agua potable Egevasa cuyo resultado viene dado por la *tabla 1.3* y se representa gráficamente en la *figura 1.14*.

Año	Año origen	Consumo facturado litros/hab·día
1997	0	160,75
1998	1	144,39
1999	2	140,34
2000	3	142,49
2001	4	146,21
2002	5	138,81
2003	6	139,17
2004	7	133,76
2005	8	140,82
2006	9	141,14

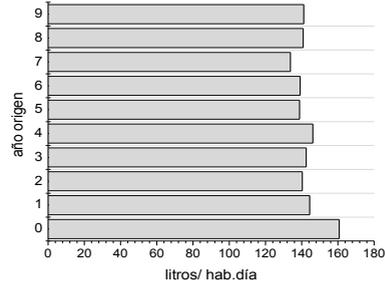


Tabla 1.3.- Consumos facturados vs. Año. Fig. 1.14.- Consumos facturados vs. Año.

La curva teórica según los datos de la *tabla 1.3* se representan en la *figura 1.15*.

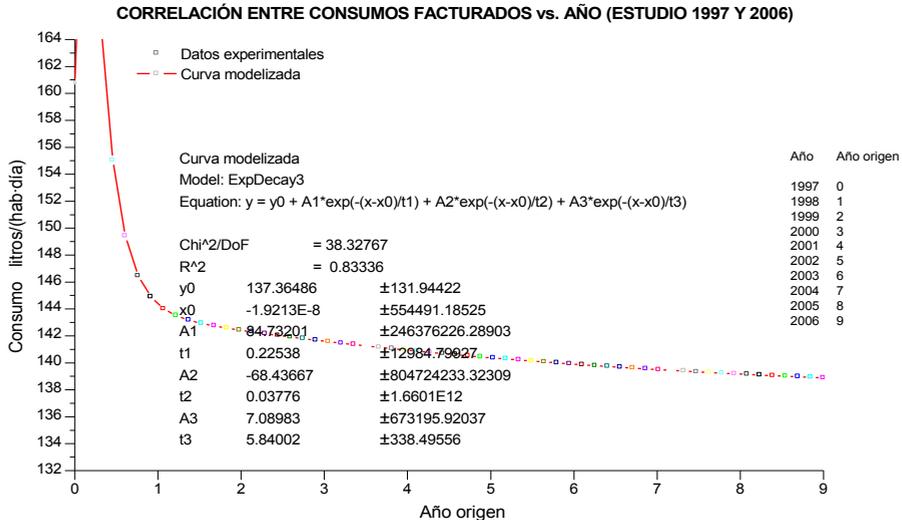


Fig. 1.15.- Correlación Consumos facturados vs. Año estimado.

La tendencia de la curva teórica (*figura 1.15*) es de valores próximos a 141 litros/habitante/día. No obstante los valores lógicos de una población agrícola como Pedralba se pueden estimar en un consumo de 150 litros/habitante/día.

1.3.1.4.- Rendimiento actual del servicio público de abastecimiento de agua potable.

Los datos facilitados por la compañía Egevasa correspondientes al volumen de explotación y de facturación para los periodos del año 2008 y 2009 vienen dados en la *tabla 1.4.*

VOLUMEN DISTRIBUIDO O DE EXPLOTACIÓN A PEDRALBA

Mes	Año 2008	Año 2009	
Enero	24.470	22.152	m ³ /mes
Febrero	21.814	24.428	m ³ /mes
Marzo	25.434	23.288	m ³ /mes
Abril	24.722	21.138	m ³ /mes
Mayo	24.842	21.627	m ³ /mes
Junio	24.801	29.758	m ³ /mes
Julio	26.298	27.989	m ³ /mes
Agosto	32.551	28.633	m ³ /mes
Septiembre	28.812	23.087	m ³ /mes
Octubre	26.016	21.376	m ³ /mes
Noviembre	27.191	19.705	m ³ /mes
Diciembre	26.522	20.607	m ³ /mes
Totales	313.473	283.788	m ³ /año

VOLUMEN FACTURADO

	Año 2008	Año 2009	
Totales	124.974	117.476	m ³ /año

Tabla 1.4.- Volumen de explotación y de facturación. Período 2008 y 2009.

A través de la *figura 1.16* puede observarse la distribución de los caudales de explotación y su comparativa entre los distintos meses del año.

EXPLOTACIÓN RECURSO HÍDRICOS EN PEDRALBA (Valencia). Periodos: Año 2008 y 2009

CORRELACIÓN: Periodo (mes) vs. Volumen de explotación (m^3)

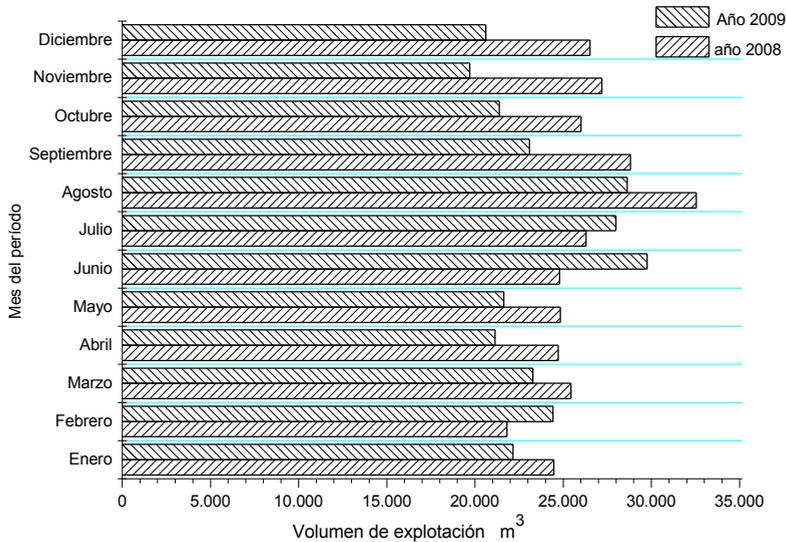


Fig. 1.16.- Volumen de explotación de agua por meses en el período 2008 y 2009.

El volumen de explotación en el año 2009 es inferior al del 2008 en todos los meses a excepción de febrero y julio. Esto ha sido debido a un mejor control de la red por parte de la compañía Egevasa en la búsqueda y reparación de las fugas en las redes.

A partir de los volúmenes de explotación y de los volúmenes de agua facturad se puede deducir que los rendimientos obtenidos son del orden del 39,87% para el año 2008 y del 41,40% para el 2009. Los rendimientos son muy pequeños y con toda probabilidad es debido a los siguientes factores:

- Fugas de agua en las redes de abastecimiento.
- Robo de agua.
- Parque de contadores parados.
- Parque de contadores mal diseñados por el excesivo error de lectura.
- Error de lectura del operario en la toma de datos.

Y en consecuencia es recomendable que se actúe en cada uno de los factores hasta conseguir rendimientos aceptables con valores comprendidos entre el 65 y el 70 %.

1.3.2.- Obtención de la curva de modulación hidráulica a partir del estudio de los consumos durante el período agosto 2009 a agosto 2010.

1.3.2.1.- Introducción.

Con la finalidad de obtener un control sobre los consumos de las redes se dotaron de sistemas inteligentes a través de aparatos electrónicos e hidrodinámicos (fig. 1.17 y 1.18) basados en la lectura cada 15 minutos de los siguientes datos: caudales, presión manométrica, pH, cloro residual y temperatura del agua.

Los datos obtenidos son enviados por vía SMS [12, 13] cada día a un receptor o base central para ser procesados mediante software específico [8].

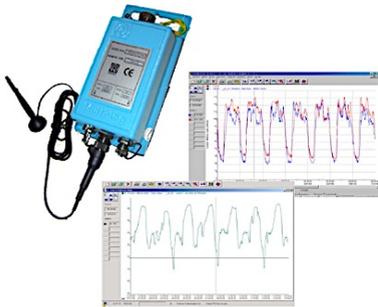


Fig. 1.17.- Aparato MULTILOG SMS.



Fig. 1.18.- Analizador de cloro residual, pH y temperatura del agua.

Con la finalidad de poder realizar un estudio fiable de todo el sistema de abastecimiento de agua potable de la población se estudia un año completo correspondiente al periodo de agosto de 2009 a agosto de 2010, siendo este periodo de tiempo en el que se detectaron las patologías en la válvula de compuerta.

Los datos que a continuación se analizan son: consumo anual, mensual, semanal y horario con la finalidad de obtener la curva de modulación hidráulica para su aplicación en los cálculos hidráulicos en régimen dinámico [9, 10].

1.3.2.2.- Consumo anual.

Los consumos anuales vienen representados a través de la *figura 1.19*, donde se correlaciona el caudal con el tiempo. El valor máximo y mínimo del caudal viene dado por la *tabla 1.5*.

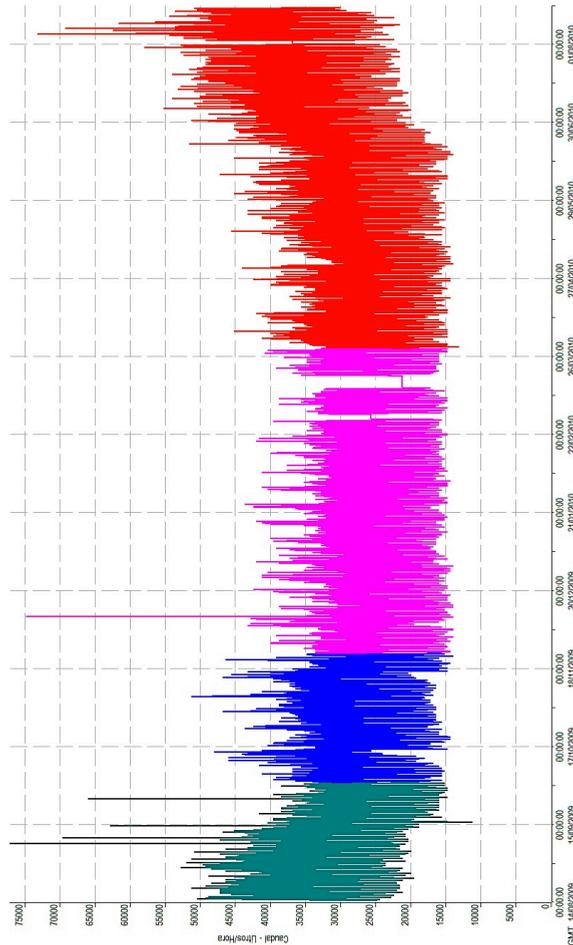


Fig. 1.19.- Correlación Caudal vs. Tiempo. Período anual de agosto 2009 a 2010.

CANAL 4	Fecha	Día de la semana	Hora	Caudal (litros/hora)
Mínimo	30/03/2010	Martes	2:15	13.200
Máximo	05/08/2010	Jueves	12:00	73.200

Tabla 1.5.- Valores máximos y mínimos del caudal anual.
 Período de agosto 2009 a 2010.

1.3.2.3.- Consumo mensual.

Los consumos mensuales vienen representados a través de la *figura 1.20*, donde se correlaciona el caudal con el tiempo. El valor máximo y mínimo del caudal viene dado por la *tabla 1.6*.

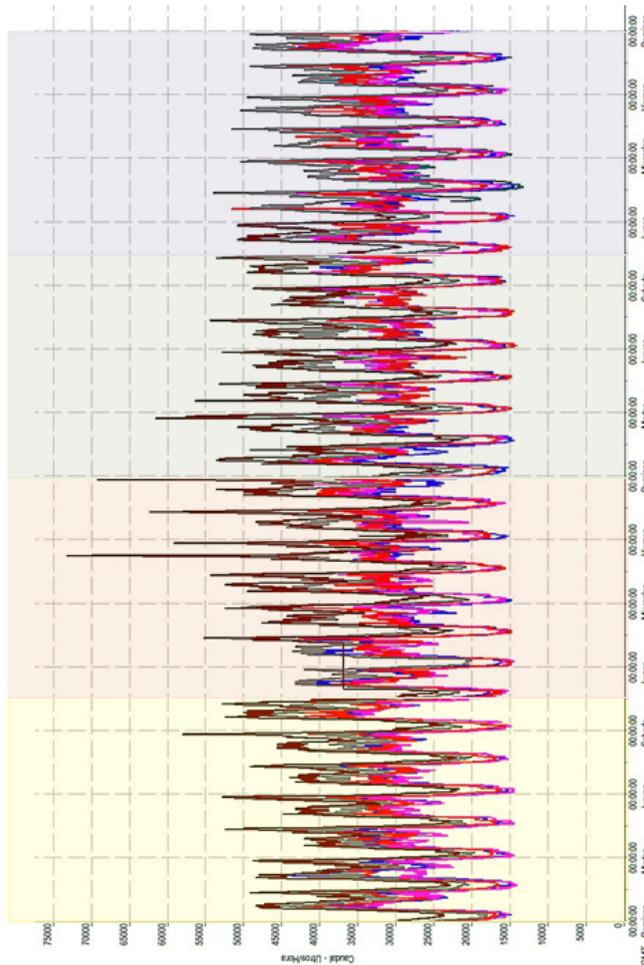


Fig. 1.20.- Caudal vs. Tiempo. Período mensual de agosto 2009 a agosto 2010.

CANAL 6	Fecha	Día de la semana	Hora	Caudal (litros/hora)
Mínimos	06/04/2010	Martes	3:00	21.600
Máximos	15/04/2010	Jueves	12:00	73.000

*Tabla 1.6.- Valores máximos y mínimos del caudal mensual.
 Período de agosto 2009 a agosto 2010.*

1.3.2.4.- Consumo semanal.

Los consumos semanales vienen representados a través de la *figura 1.21*, donde se correlaciona el caudal con el tiempo. El valor máximo y mínimo del caudal viene dado por la *tabla 1.7*.

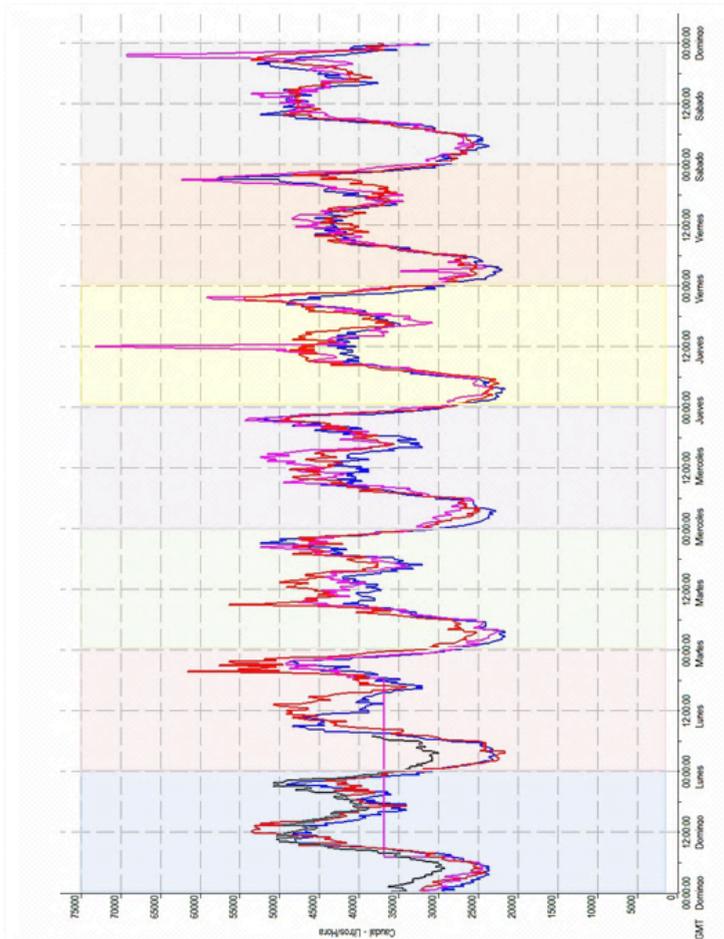


Fig. 1.21.- Caudal vs. Tiempo. Período semanal de agosto 2009 a agosto 2010.

CANAL 5	Fecha	Día de la semana	Hora	Caudal (litros/hora)
Mínimos	04/04/2010	Domingo	5:00	29.200
Máximos	04/04/2010	domingo	21:15	50.800

*Tabla 1.7.- Valores máximos y mínimos del caudal semanal.
 Período de agosto 2009 a agosto 2010.*

1.3.2.5.- Consumo diario.

Los consumos diarios vienen representados a través de la *figura 1.22*, donde se correlaciona el caudal con el tiempo. El valor máximo y mínimo del caudal viene dado por la *tabla 1.8*.

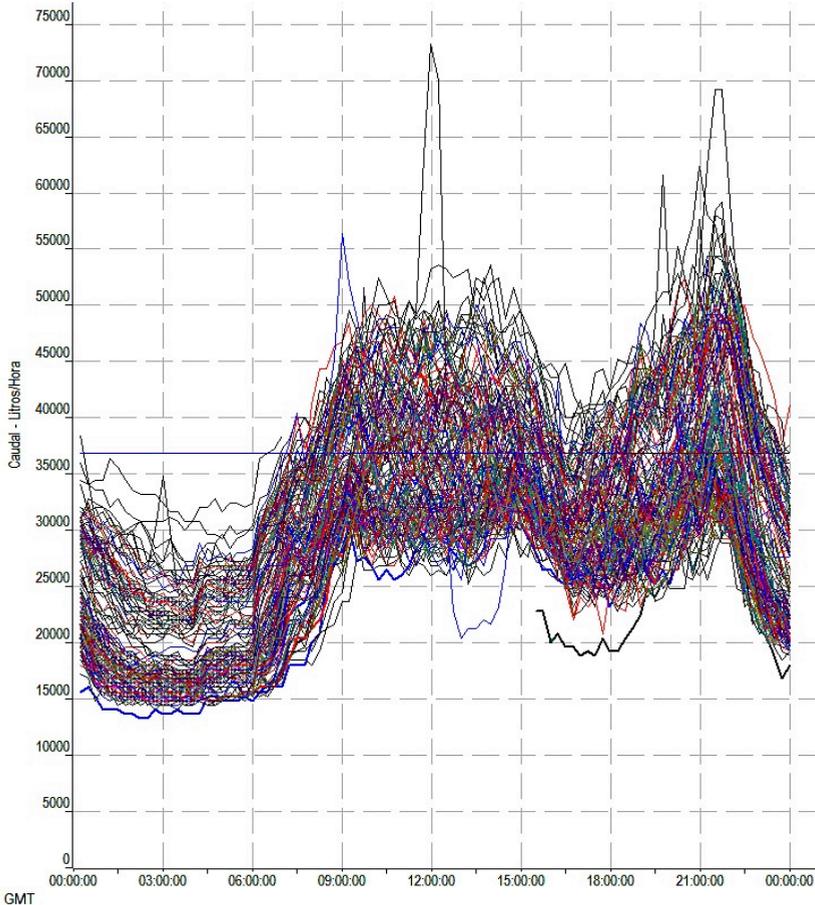
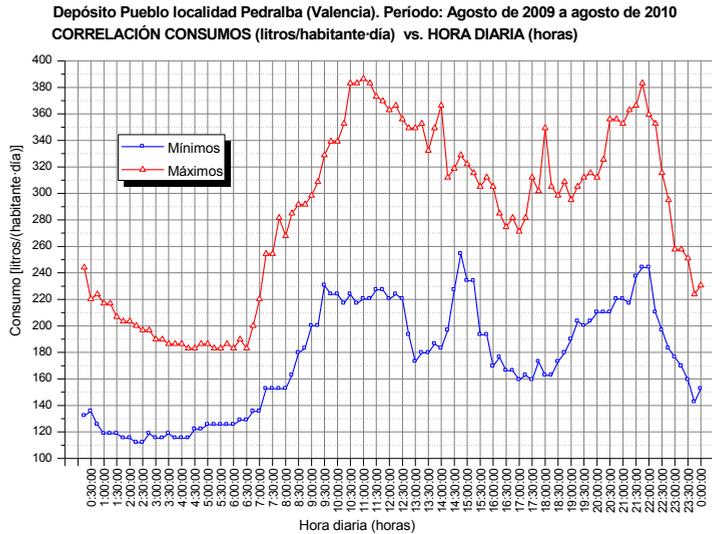


Fig. 1.22.- Caudal vs. Tiempo. Período diario agosto 2009, agosto de 2010.

CANAL 64	Fecha	Día de la semana	Hora	Caudal (litros/hora)
Mínimos	30/03/2010	Martes	2:30	16.400
Máximos	30/03/2010	Martes	21:45	45.200

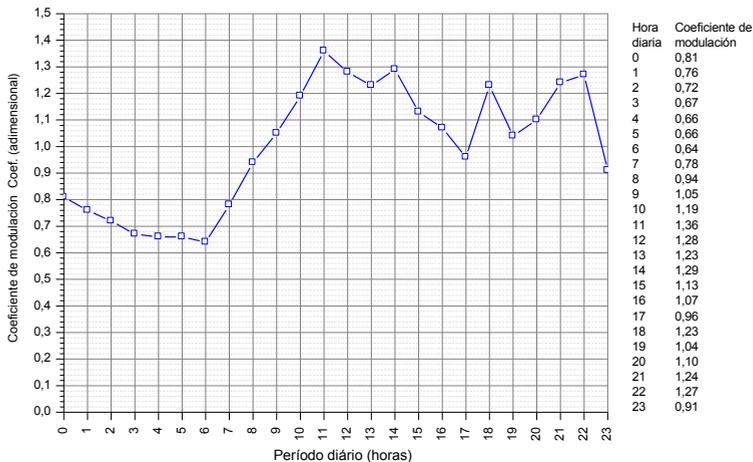
Tabla 1.8.- Valores máximos y mínimos del caudal semanal.
 Período agosto 2009 a agosto 2010.

Los consumos máximos y mínimos horarios en función del número de habitantes censados por el INE de 2.831 habitantes (año 2009) para el periodo a estudio viene dado por la *figura 1.23* y la curva de modulación hidráulica por la *figura 1.24*.



*Fig. 1.23.- Correlación Caudal vs. Tiempo.
 Período máximo y mínimo diario de agosto 2009 a agosto 2010.*

Depósito Pueblo localidad Pedralba (Valencia). Período: Agosto de 2009 a agosto de 2010
 CURVA DE MODULACIÓN, CORRELACIÓN Coef. vs. Período diario



*Fig. 1.24.- Curva de modulación hidráulica.
 Período máximo y mínimo diario de agosto 2009 a agosto 2010.*

1.3.3.- Analíticas del agua potable de la población. Período de 1992 a 2008.

En las figuras 1.25 y 1.26 se representan la correlación de los valores correspondientes a la dureza total e índice de estabilidad para los años comprendidos entre el 1992 y 2008.

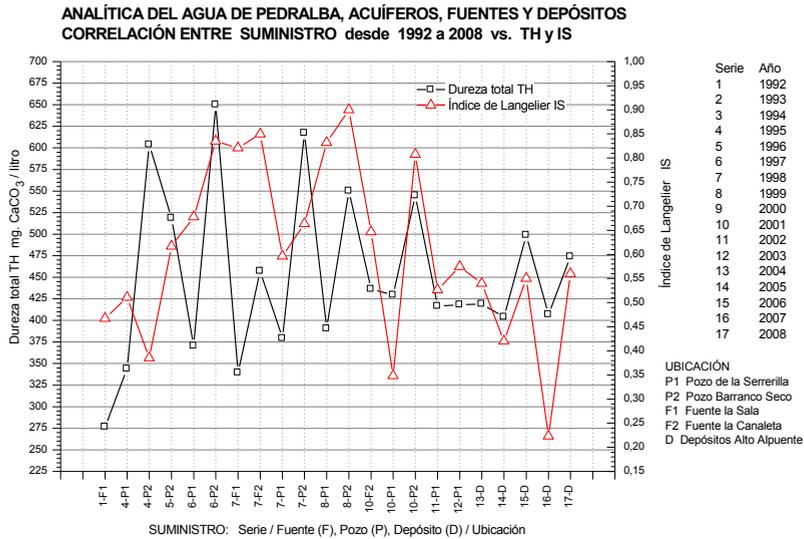


Fig. 1.25.- Analítica del agua de Pedralba en acuíferos, fuentes y depósitos. Período 1992 a 2008.

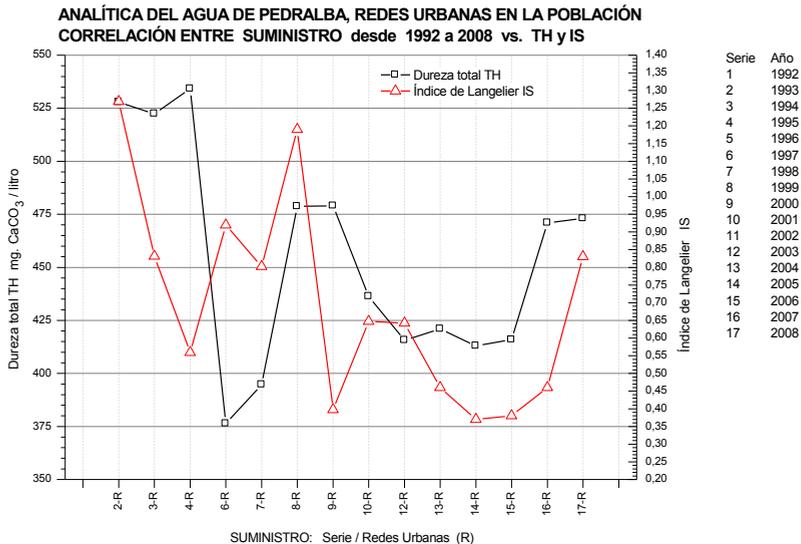


Fig. 1.26.- Analítica del agua de Pedralba en las redes urbanas en la población. Período 1992 a 2008.



1.3.4.- Materiales de las tuberías.

Los materiales que forman el conjunto de las redes de abastecimiento de alta son los siguientes [11]:

1. Amianto cemento (fibrocemento), material en servicio.
2. Acero galvanizado (Fe-Zn), material nuevo.
3. Acero galvanizado (Fe-Zn), material en servicio.
4. Acero inoxidable, material nuevo.
5. Acero, material nuevo.
6. Cobre, material nuevo.
7. Plomo, material en servicio.
8. Poli-cloruro de vinilo no plastificado (PVC-U), material en servicio.
9. Poli-etileno de alta densidad (HDPE), material nuevo.
10. Poli-etileno de baja densidad (LDPE), material nuevo.

De todos los materiales que forman las redes de abastecimiento, aproximadamente el 80% de las tuberías son poliméricas predominando las tuberías de HDPE y LDPE. Para cada uno de los materiales se han realizado los ensayos correspondientes a la obtención de la rugosidad absoluta de cada material con la finalidad de determinar cuál es la rugosidad absoluta de partida para realizar el modelo dinámico de las redes.

1.3.4.1.- Amianto cemento (fibrocemento), material en servicio.

Tubería de la redes de abastecimiento primarias *figura 1.27* con patologías típicas de deposiciones de CaCO_3 en el interior de la tubería debido a un elevado índice de estabilidad (IS) del agua potable. Para medir la rugosidad se ha realizado un estudio a través de la probeta de la *figura 1.28* cuyos resultados vienen dados en las *figuras 1.29* y *1.30*.



Fig. 1.27.- Tubería de amianto cemento (fibrocemento) DN-125.

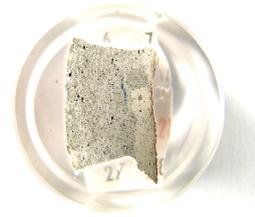


Fig. 1.28.- Probeta sección de la pared de la tubería DN-125.

a. Micrografías.

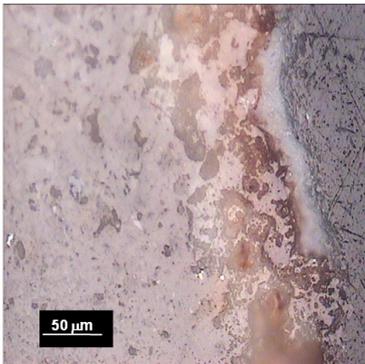


Fig. 1.29.- Micrografía 1x200 (sa).
Deposición de carbonato cálcico en el interior de la tubería.

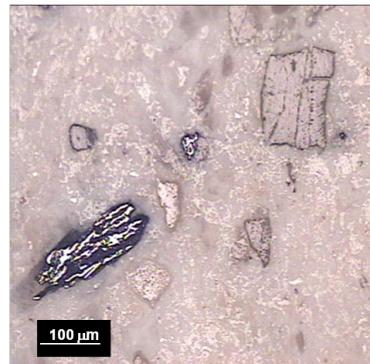


Fig. 1.30.- Micrografía 1x100 (sa).
Núcleo de la pared de la tubería.

b. Rugosidad.

Rugosidad absoluta del orden de 0,5 mm, *figuras 1.29* y *1.30*. El periodo de tiempo transcurrido en aparecer este tipo de patologías es aproximadamente de 20 a 30 años.

1.3.4.2.- Acero galvanizado (Fe-Zn), material nuevo.

Tubería utilizada en las acometidas para uso doméstico e industrial, *figura 1.31.*

Material	ACERO GALVANIZADO (Fe-Zn)
Calidad	NUEVO
Norma UNE	UNE 19-048-1985
Diámetro nominal	DN 15
Diámetro exterior	21,8 mm
Espesor	2,6 mm
Diámetro interior	16,6 mm



Fig. 1.31.- Probeta Fe-Zn, material nuevo.

Las micrografías obtenidas vienen dadas por las *figuras 1.32 a la 1.37* inclusive.

a. Micrografías.

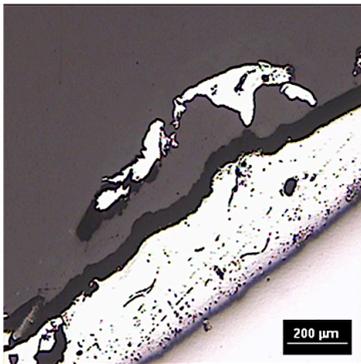


Fig. 1.32.- Fe-Zn 1x50 Pared interior (sa).

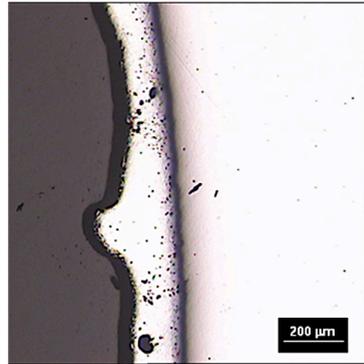


Fig. 1.33.- Fe-Zn 1x50 Pared interior (sa).

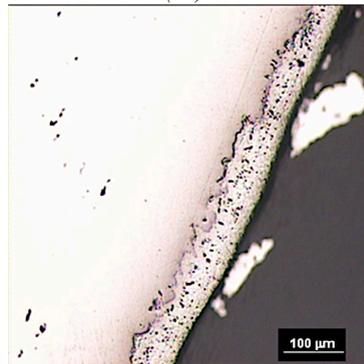
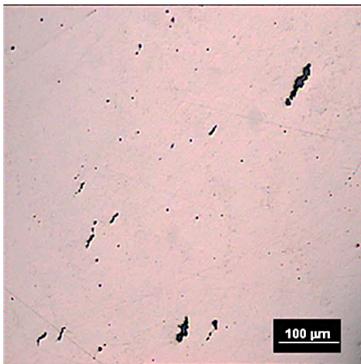


Fig. 1.34.- Fe-Zn 1x100 Núcleo central (sa). Fig. 1.35.- Fe-Zn 1x100 Pared exterior (sa).

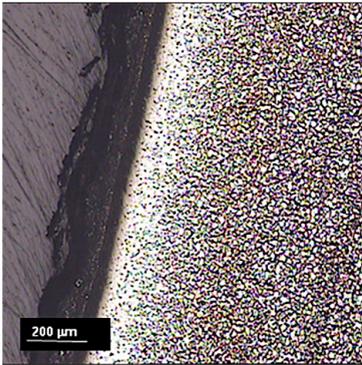


Fig. 1.36.- Fe-Zn 1x50 Pared interior(a).

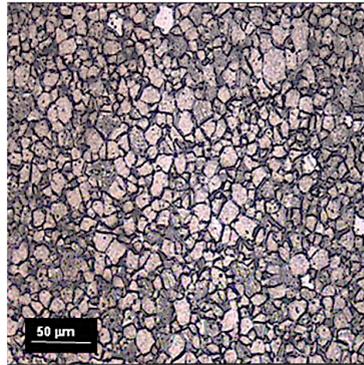


Fig. 1.37.- Fe-Zn 1x200 Núcleo central (a).

La rugosidad absoluta se ha obtenido a partir de la probeta de la figura 1.38 cuyos resultados numéricos se adjuntan, así como el perfil de la rugosidad a través de la figura 1.39 mediante el rugosímetro.

b. Rugosidad.

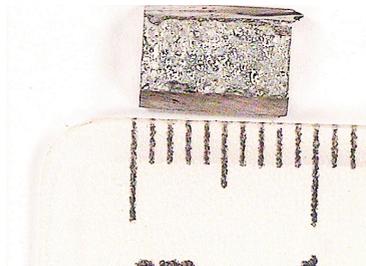


Fig. 1.38.- Probeta de Fe-Zn.

Material	ACERO GALVANIZADO
Calidad	NUEVO
Lt	5,6 mm
Lc	0,8 mm
Ra	6,869 μm
Rz	35,5 μm
R _{máxima}	45,7 μm
Rp	17,5 μm
R Perfil	
Lc	0,8 mm
VER	25 μm

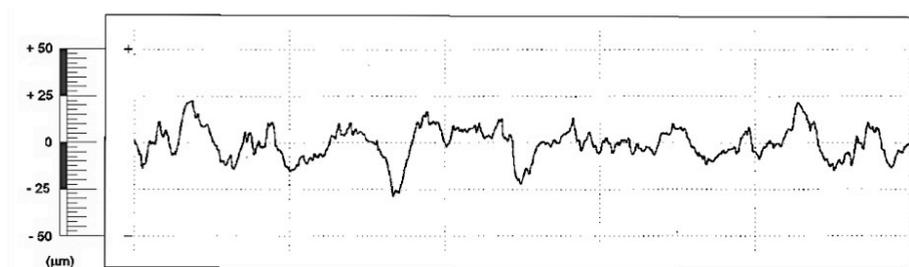


Fig. 1.39.- Acero galvanizado (Fe-Zn), material nuevo. Ra vs. Lt.

1.3.4.3.- Acero galvanizado (Fe-Zn), material en servicio.

Tubería utilizada en las acometidas para uso doméstico e industrial, *figura 1.40.*



Material	ACERO GALVANIZADO (Fe-Zn)
Calidad	EN SERVICIO (20 años)
TH	145,45 mg CaCO ₃ /litro
IS	-0,30 adimensional
Norma UNE	UNE 19-048-1985
Diámetro nominal	DN 15
Diámetro exterior	21,8 mm
Espesor	2,6 mm
Diámetro interior	16,6 mm

Fig. 1.40.- Probeta Fe-Zn, material en servicio.

Las micrografías obtenidas vienen dadas por las *figuras 1.41 a la 1.48* inclusive.

a. Micrografías.

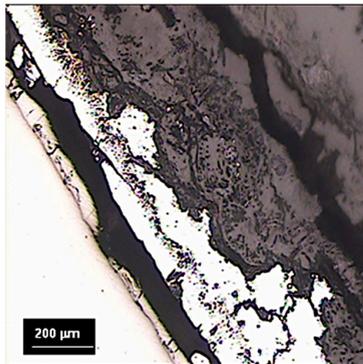


Fig. 1.41.- Fe-Zn 1x50 Pared interior (sa).

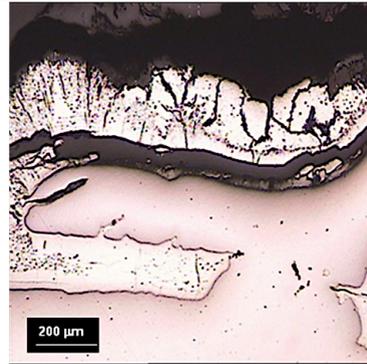


Fig. 1.42.- Fe-Zn 1x50 Pared interior (sa).

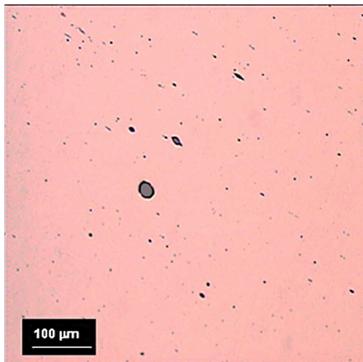


Fig. 1.43.- Fe-Zn 1x100 Núcleo central (sa).

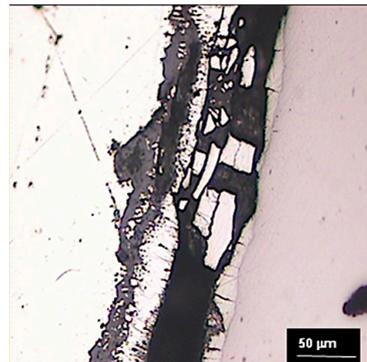


Fig. 1.44.- Fe-Zn 1x100 Pared interior (sa).

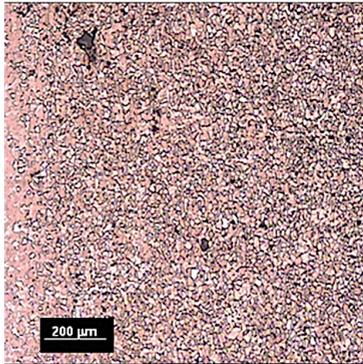


Fig. 1.45.- Fe-Zn 1x50 Pared interior (a).

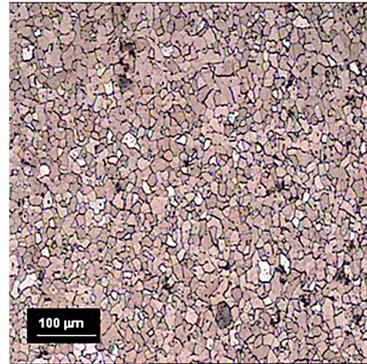


Fig. 1.46.- Fe-Zn 1x100 Pared interior (a).

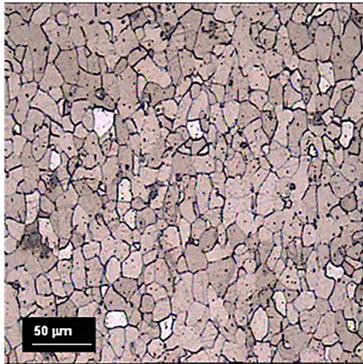


Fig. 1.47.- Fe-Zn 1x200 Núcleo central (a).

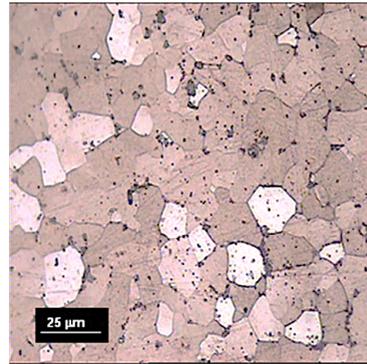


Fig. 1.48.- Fe-Zn 1x400 Núcleo central (a).

b. Rugosidad.

No se ha podido realizar la medición con el rugosímetro por exceder la rugosidad el valor máximo del aparato.

La rugosidad media interior de la tubería medida a través de las micrografías es del orden de 0,8 mm.

1.3.4.4.- Acero inoxidable, material nuevo.

Tubería utilizada en las acometidas para uso doméstico e industrial, *figura 1.49*.



Material	ACERO INOXIDABLE
Calidad	NUEVO
Norma UNE	UNE EN 19049-1/97

Diámetro nominal	DN 35
Diámetro exterior	34,965 mm
Espesor	1 mm
Diámetro interior	32,965 mm

Fig. 1.49.-Probeta acero inoxidable, material nuevo.

Las micrografías obtenidas vienen dadas por las *figuras 1.50 a la 1.55* inclusive.

a. Micrografías.

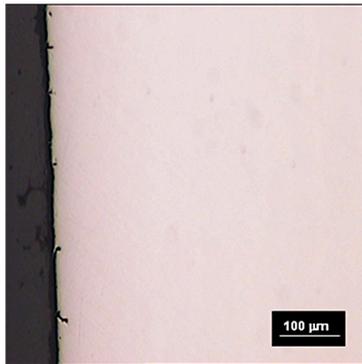


Fig. 1.50.-Acero inoxidable 1x100 Pared interior (sa).

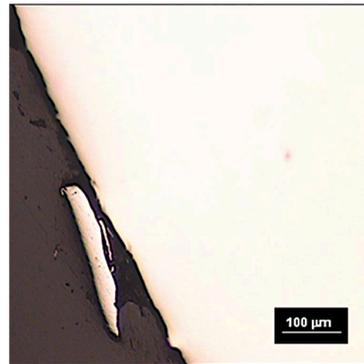


Fig. 1.51.-Acero inoxidable 1x100 Pared interior (sa).

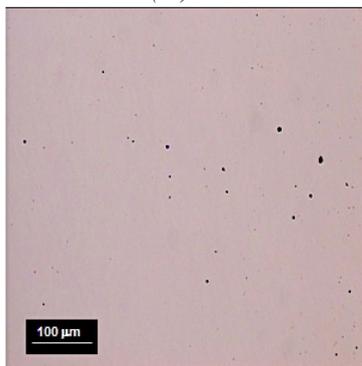


Fig. 1.52.-Acero inoxidable 1x100 Núcleo (sa).

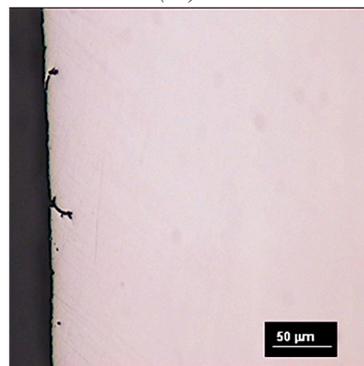


Fig. 1.53.-Acero inoxidable 1x200 Pared interior (sa).

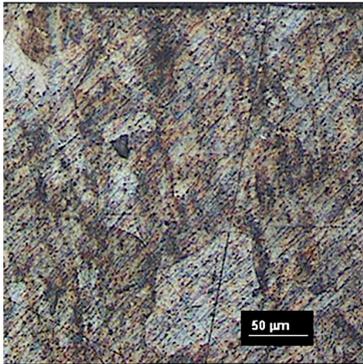


Fig. 1.54.- Acero inoxidable 1x200
 Núcleo (a).

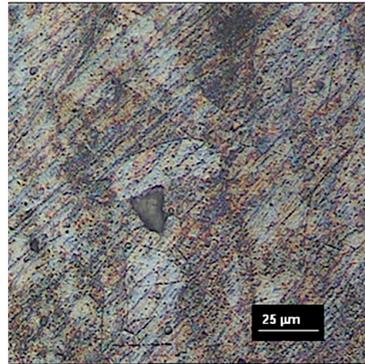


Fig. 1.55.- Acero inoxidable 1x200
 Núcleo (a).

La rugosidad absoluta se ha obtenido a partir de la probeta de la figura 1.56 cuyos resultados numéricos se adjuntan, así como el perfil de la rugosidad a través de la figura 1.57 mediante el rugosímetro.

b. Rugosidad.

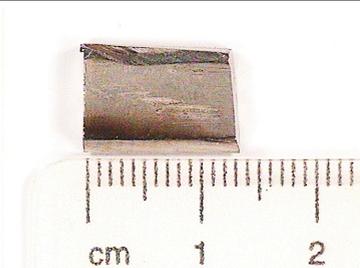


Fig. 1.56.- Probeta de acero inoxidable.

Material	ACERO GALVANIZADO
Calidad	NUEVO
Lt	5,6 mm
Lc	0,8 mm
Ra	0,432 μm
Rz	3,83 μm
Rmáxima	5,81 μm
Rp	2,46 μm
R Perfil	
Lc	0,8 mm
VER	2,5 μm

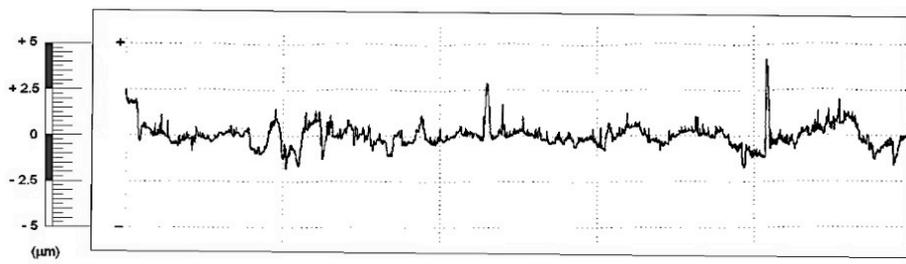


Fig. 1.57.- Acero inoxidable, material nuevo. Ra vs. Lt.

1.3.4.5.- Acero, material nuevo.

Tubería utilizada en las acometidas para uso doméstico e industrial, *figura 1.58.*



Material	ACERO
Calidad	NUEVO
Norma UNE	UNE EN 10255:2004
D. exterior especificado	33,7 Serie media
Diámetro exterior	34,2 mm
Espesor	3,2 mm
Diámetro interior	27,8 mm

Fig. 1.58.- Probeta acero, material nuevo.

Las micrografías obtenidas vienen dadas por las *figuras 1.59 a la 1.64* inclusive.

a. Micrografías.

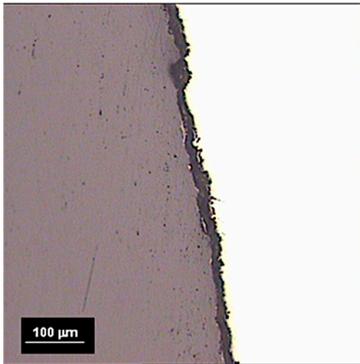


Fig. 1.59.-Acero 1x100 Pared interior (sa).

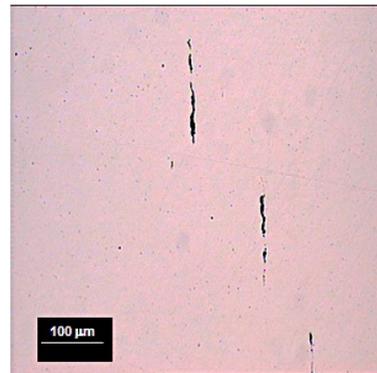


Fig. 1.60.-Acero 1x100 Núcleo (sa).

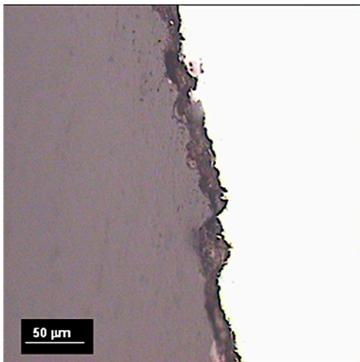


Fig.1.61.-Acero 1x200 Pared interior (sa).

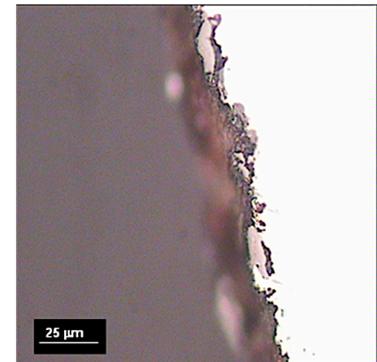


Fig. 1.62.-Acero 1x400 Pared interior (sa).

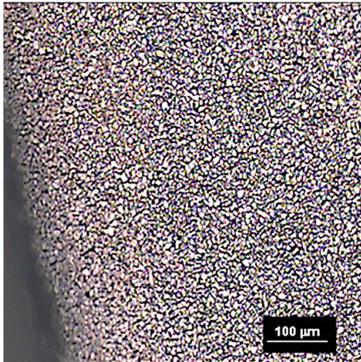


Fig. 1.63.- Acero 1x100 Pared interior (a).

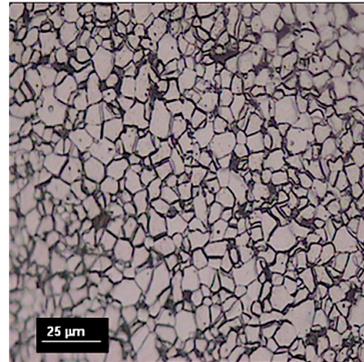


Fig. 1.64.- Acero 1x400 Núcleo (a).

La rugosidad absoluta se ha obtenido a partir de la probeta de la figura 1.65 cuyos resultados numéricos se adjuntan, así como el perfil de la rugosidad a través de la figura 1.66 mediante el rugosímetro.

b. Rugosidad.

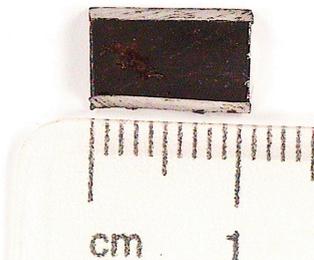


Fig. 1.65.- Probeta de acero.

Material	ACERO
Calidad	NUEVO
Lt	5,6 mm
Lc	0,8 mm
Ra	2,556 μm
Rz	17,2 μm
R _{máxima}	26,8 μm
Rp	8,76 μm
R Perfil	
Lc	0,8 mm
VER	10 μm

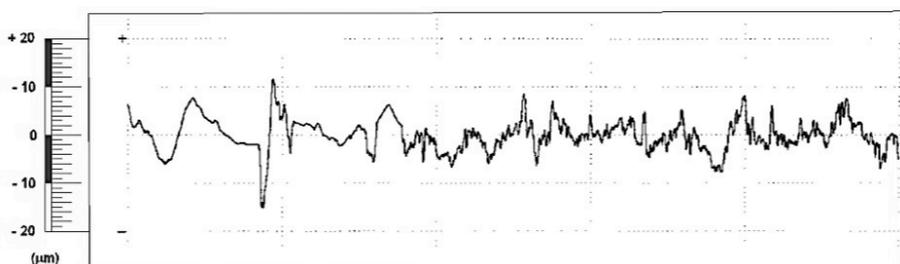


Fig. 1.66.- Acero, material nuevo. Ra vs. Lt.

1.3.4.6.- Cobre, material nuevo.

Tubería utilizada en las acometidas para uso doméstico e industrial, *figura 1.67.*



Material	COBRE
Calidad	NUEVO
Norma UNE	UNE EN 1057

Diámetro exterior	18 mm
Espesor	0,8 mm
Diámetro interior	16,4 mm

Fig. 1.67.- Probeta cobre, material nuevo.

Las micrografías obtenidas vienen dadas por las *figuras 1.68 a la 1.73* inclusive.

a. Micrografías.

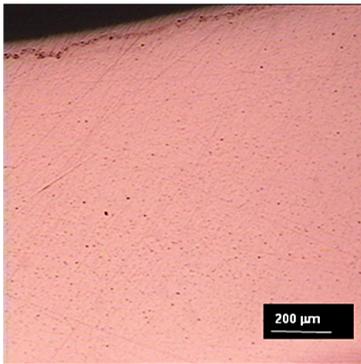


Fig. 1.68.-Cobre 1x50 Pared interior (sa).

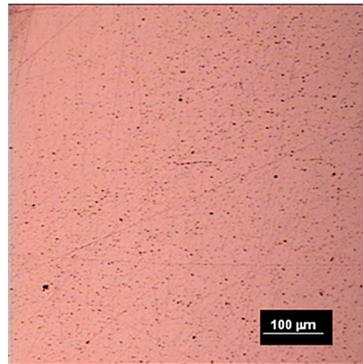


Fig. 1.69.-Cobre 1x100 Núcleo (sa).

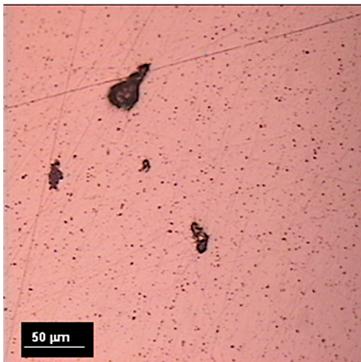


Fig. 1.70.-Cobre 1x200 Núcleo (sa).

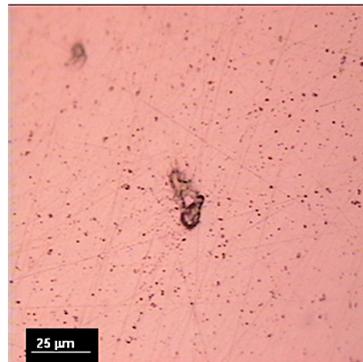


Fig. 1.71.- Cobre 1x400 Núcleo (sa).



Fig. 1.72.- Cobre 1x200 Pared interior (a).

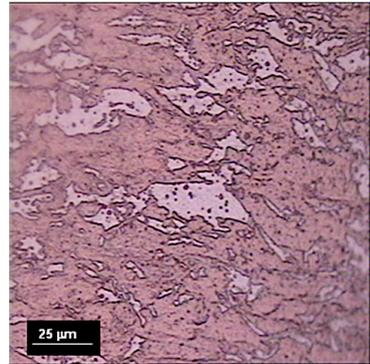


Fig. 1.73.- Cobre 1x400 Núcleo (a).

La rugosidad absoluta se ha obtenido a partir de la probeta de la figura 1.74 cuyos resultados numéricos se adjuntan, así como el perfil de la rugosidad a través de la figura 1.75 mediante el rugosímetro.

b. Rugosidad.

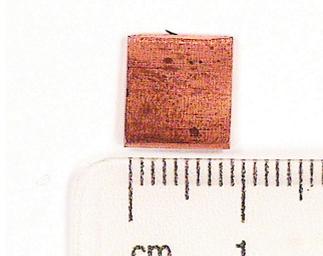


Fig. 1.74.- Probeta de cobre.

Material	COBRE
Calidad	NUEVO
Lt	5,6 mm
Lc	0,8 mm
Ra	0,479 μm
Rz	2,69 μm
Rmáxima	4,06 μm
Rp	1,09 μm
R Perfil	
Lc	0,8 mm
VER	2,5 μm

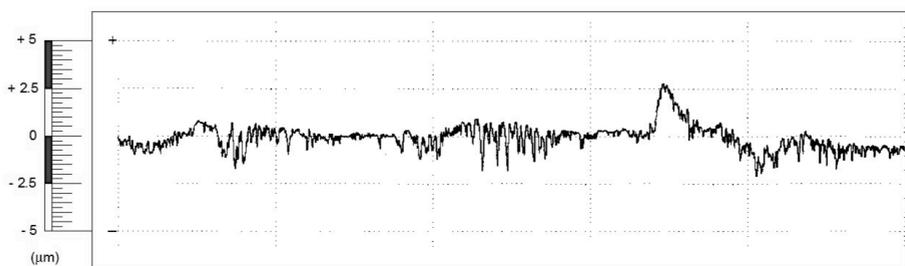


Fig. 1.75.- Cobre, material nuevo. Ra vs. Lt.

1.3.4.7.- Plomo, material en servicio.

Tubería utilizada en las acometidas para uso doméstico, *figura 1.76.*



Material	PLOMO
Calidad	EN SERVICIO (30 años)
TH	550,13 mg CaCO ₃ /litro
IS	0,90 adimensional
Norma UNE	UNE 37-202-78
Diámetro exterior	15 mm
Espesor	2,5 mm
Diámetro interior	10 mm

Fig. 1.76.- Probeta plomo, material en servicio.

Las micrografías obtenidas vienen dadas por las *figuras 1.77 a la 1.82* inclusive.

a. Micrografías.

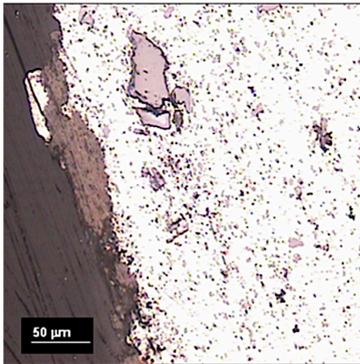


Fig. 1.77.- Plomo 1x200 Pared interior (sa).

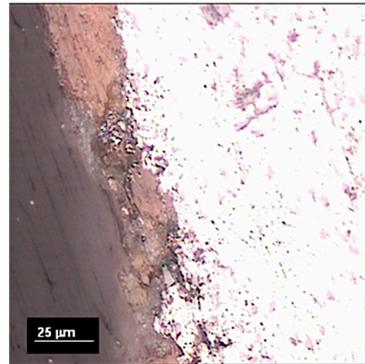


Fig. 1.78.- Plomo 1x400 Pared interior (sa).

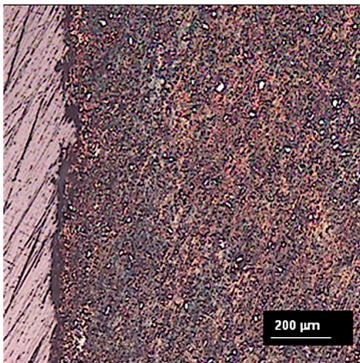


Fig. 1.79.- Plomo 1x50 Pared interior (a).

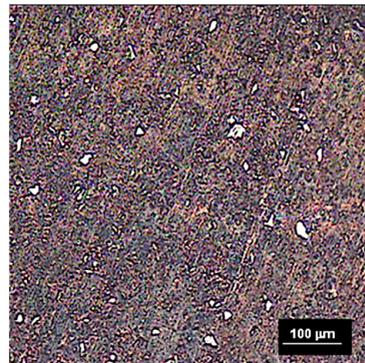


Fig. 1.80.- Plomo 1x100 Núcleo (a).

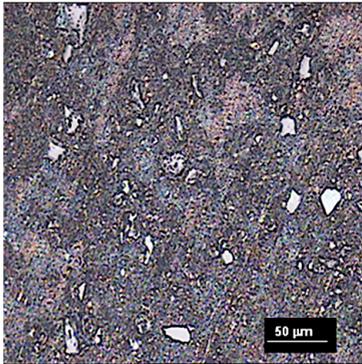


Fig. 1.81.- Plomo 1x200 Núcleo (a).

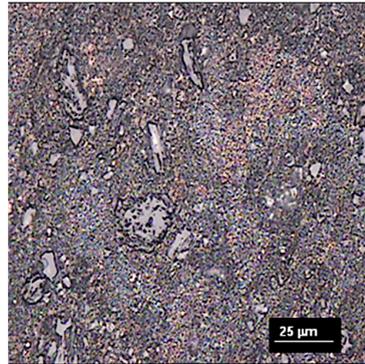


Fig. 1.82.- Plomo 1x400 Núcleo (a).

La rugosidad absoluta se ha obtenido a partir de la probeta de la figura 1.83 cuyos resultados numéricos se adjuntan, así como el perfil de la rugosidad a través de la figura 1.84 mediante el rugosímetro.

b. Rugosidad.

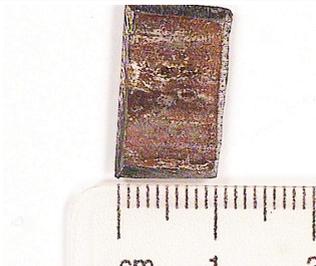


Fig. 1.83.- Probeta de plomo.

Material	PLOMO
Calidad	MATERIAL EN SERVICIO (30 años)
Lt	5,6 mm
Lc	0,8 mm
Ra	0,479 μm
Rz	2,69 μm
Rmáxima	4,06 μm
Rp	1,09 μm
R Perfil	
Lc	0,8 mm
VER	2,5 μm

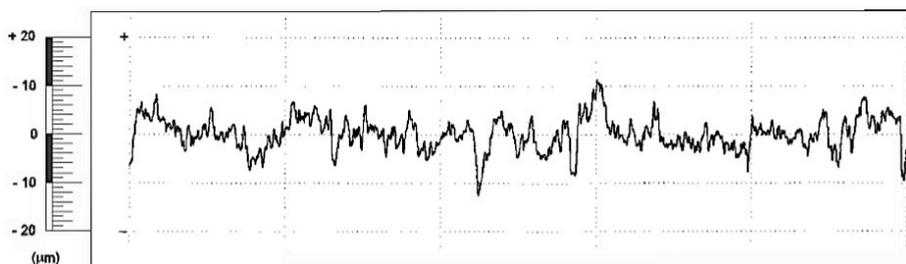


Fig. 1.84.- Plomo, material en servicio. Ra vs. Lt.

1.3.4.8.- Poli-cloruro de vinilo no plastificado (PVC-U), material nuevo.

Tubería empleada en las redes de abastecimiento secundarias, *figura 1.85*.



Material	PVC-U
Calidad	NUEVO
Norma UNE	UNE EN 1452:2010

Diámetro exterior	63 mm
Espesor	2,5 mm
Diámetro interior	58 mm

Fig. 1.85.- Probeta de PVC-U, material nuevo.

La rugosidad absoluta se ha obtenido a partir de la probeta de la *figura 1.86* cuyos resultados numéricos se adjuntan, así como el perfil de la rugosidad a través de la *figura 1.87* mediante el rugosímetro.

b. Rugosidad.

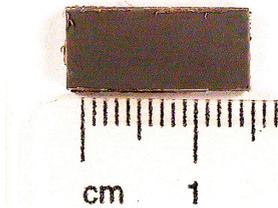


Fig. 1.86.- Probeta de PVC-U.

Material	PVC
Calidad	NUEVO
Lt	5,6 mm
Lc	0,8 mm
Ra	0,715 μm
Rz	4,87 μm
Rmáxima	5,37 μm
Rp	2,29 μm
R Perfil	
Lc	0,8 mm
VER	2,5 μm

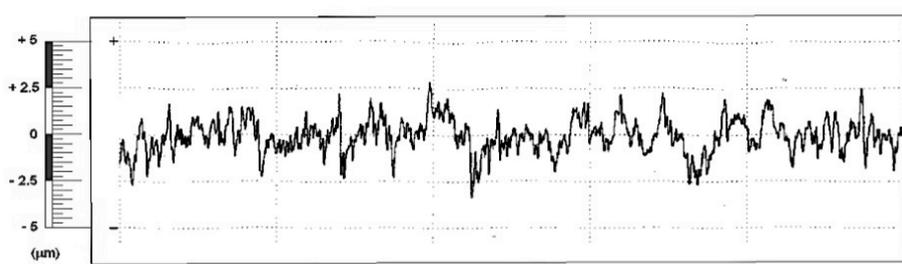


Fig. 1. 87.- PVC-U, material nuevo. Ra vs. Lt.

1.3.4.9.- Poli-etileno de alta densidad (HDPE), material nuevo.

Tubería empleada en las redes de abastecimiento primarias, secundarias y en acometidas. En la *figura 1.88* se describe solamente la correspondiente a la acometida para usos domésticos e industriales.



Material	HDPE
Calidad	NUEVO
Norma UNE	UNE EN 12201:2003

Diámetro exterior	32 mm
Espesor	2,4 mm
Diámetro interior	27,2 mm

Fig. 1.88.- Probeta de HDPE, material nuevo.

La rugosidad absoluta se ha obtenido a partir de la probeta de la *figura 1.89* cuyos resultados numéricos se adjuntan, así como el perfil de la rugosidad a través de la *figura 1.90* mediante el rugosímetro.

b. Rugosidad.

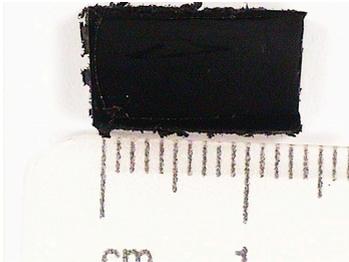


Fig. 1.89.- Probeta de HDPE.

Material	HDPE
Calidad	NUEVO
Lt	5,6 mm
Lc	0,8 mm
Ra	1,08 μm
Rz	5,64 μm
Rmáxima	9,34 μm
Rp	2,71 μm
R Perfil	
Lc	0,8 mm
VER	5 μm

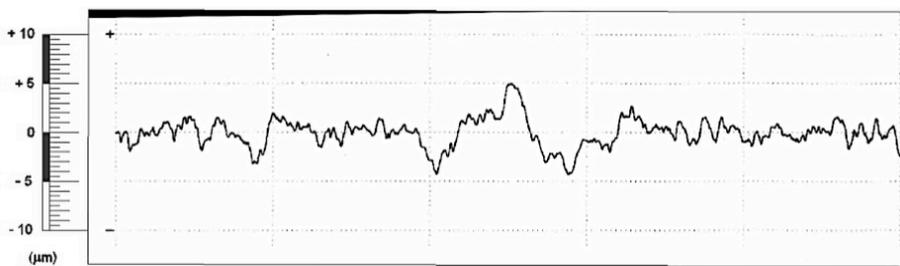


Fig. 1.90.- HDPE, material nuevo. Ra vs. Lt.

1.3.4.10.- Poli-etileno de baja densidad (LDPE), material nuevo.

Tubería empleada en las redes de abastecimiento primarias, secundarias y en acometidas. En la *figura 1.91* se describe solamente la correspondiente a la acometida para usos domésticos e industriales.

	Material	LDPE
	Calidad	NUEVO
	Norma UNE	UNE 53.131
	Diámetro exterior	32 mm
	Espesor	4,4 mm
	Diámetro interior	23,2 mm

Fig. 1.91.- Probeta de LDPE, material nuevo.

La rugosidad absoluta se ha obtenido a partir de la probeta de la *figura 1.92* cuyos resultados numéricos se adjuntan, así como el perfil de la rugosidad a través de la *figura 1.93* mediante el rugosímetro.

b. Rugosidad.

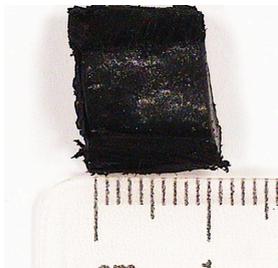


Fig. 1.92.- Probeta de LDPE.

Material	LDPE
Calidad	NUEVO
Lt	5,6 mm
Lc	0,8 mm
Ra	2,587 μm
Rz	18 μm
Rmáxima	36,7 μm
Rp	9,78 μm
R Perfil	
Lc	0,8 mm
VER	5 μm

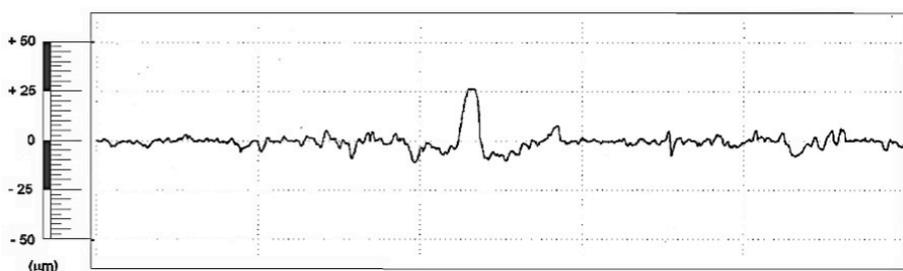


Fig. 1.93.- LDPE, material nuevo. Ra vs. Lt.

1.3.5.- Simulación dinámica del modelo hidráulico ajustado de la red general de abastecimiento de agua potable.

1.3.5.1.- Variables y criterios de cálculo.

Para la elaboración de los cálculos hidráulicos en las redes de abastecimiento se han utilizado los siguientes criterios de cálculo.

– Pérdida de carga:	Darcy-Weisbach [14]
– Coeficiente de fricción:	Colebrook, C.F. [15]
– Diámetros, longitudes y alturas topográficas de los nudos:	<i>Figuras 1.96 y 1.97</i>
– Materiales de las tuberías:	<i>Apartado 1.3.4</i>
– Unidades de caudal:	l/s.
– Peso específico relativo:	1 (T=4°C).
– Viscosidad cinemática relativa:	1 (T=4°C).
– Máximo número de iteraciones:	40
– Precisión en los cálculos (error):	1·10 ⁻⁴
– Punto de inyección del cloro:	Depósitos.
– Concentración máxima de cloro residual en las redes:	1 mg/l.
– Tiempo máximo de permanencia del cloro en las redes:	72 h.
– Curva de modulación hidráulica:	Valores <i>fig. 1.23</i>
– Número de nudos de la red de abastecimiento:	406
– Número de habitantes censados INE año 2009:	2.831

1.3.5.2.- Ajuste del modelo.

Parámetros del modelo susceptibles a modificar durante la fase de ajuste:

- Rugosidades de las conducciones.
- Diámetros efectivos de las tuberías.
- Caudal no controlado en cada nudo.

Variables hidráulicas a utilizar para orientar el ajuste y sobre las que se han realizado las mediciones para varios Estados de la Red (ER).

- Presiones en varios nudos de la red.
- Caudal circulante en algunas líneas principales.
- Caudal inyectado a la red desde los depósitos.

El ajuste inicial del modelo aún no siendo muy aconsejable se ha realizado mediante el método trivial de prueba error debido a la sencillez de las redes con la finalidad de obtener un pre-calibrado, para posteriormente realizar el ajuste por métodos basados en técnicas de optimización.

Los métodos basados en técnicas de optimización se realizan a través de una función matemática denominada función discrepancia (DISC), que tiene en cuenta los errores cuadráticos medios ponderados de las variables medidas. Se trata de métodos no deterministas que intentan minimizar el valor de esta función, y por lo tanto, disminuir la discrepancia [16, 17, 18, 19, 20]. La función discrepancia viene definida por la ecuación (1.4).

$$\text{DISC} = \frac{\sum_{i=1}^{MP} \left(\frac{PM_i - PC_i}{VLP_i} \right)^2 + \sum_{i=1}^{Mq} \left(\frac{qM_i - qC_i}{VLq_i} \right)^2 + \sum_{i=1}^{MQ} \left(\frac{QM_i - QC_i}{VLQ_i} \right)^2}{MP + Mq + MQ} \quad (1.4)$$

Siendo:

MP: Número de medidas de presión.

MQ: Número de medidas de caudal de inyección a red.

Mq: Número de medidas de caudal circulante por las líneas.

PM_i: Presión medida en el nudo *i*.

PC_i: Presión calculada con el modelo en el nudo *i*.

QM_i: Caudal de inyección medido en el punto *i*.

QC_i: Caudal de inyección calculado para el punto *i*.

qM_i: Caudal medido circulante por la línea *i*.

qC_i: Caudal circulante por la línea *i*, calculado con el modelo.

VLP_i: Factor de ponderación de la medida de presión en el nudo *i*.

VLQ_i: Factor de ponderación de la medida de caudal inyección en *i*.

VLq_i: Factor de ponderación de la medida de caudal circulante por la línea *i*.

Mediante la aplicación de la función DISC, se ha mantenido la rugosidad de las tuberías como constante por dos razones:

1. Porque la mayor parte de las tuberías instaladas en las redes urbanas (aproximadamente el 80%) están formadas por materiales poliméricos (HDPE y LDPE).
2. Para la rugosidad absoluta de las tuberías se ha adoptado el valor real de las mediciones realizadas en el estudio de los materiales, por su fiabilidad y el buen estado de conservación de los materiales. Siendo la rugosidad absoluta adoptada $Ra=0,002587$ mm (LDPE) por ser el estado de mayor rugosidad.

Para los cálculos mecánicos de timbrado (presión nominal PN) es conveniente conocer las características físicas del material [21] cuyos valores son los siguientes:

- Material: PE (Low/Medium Density, Branched Homopolymer).
- Polymer Class: Thermoplastic: Semi-cristalline.
- Composición: $(CH_2 - CH_2)_n$
- Tipo de modelo del material: Isotrópico elástico lineal.
- Densidad: 917 kg/m^3
- Módulo elástico: $1,72 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$
- Módulo cortante: $5,94 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$
- Límite de tracción: $1,327 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$
- Límite elástico: $8,96 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$
- Coeficiente de Poisson: 0,439
- Conductividad térmica: $0,322 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$
- Calor específico: $1.842 \text{ J / (kg} \cdot \text{K)}$

Algunas de las características físicas y mecánicas se representan en las *figuras 1.94, 1.95 y 1.96*, [21].

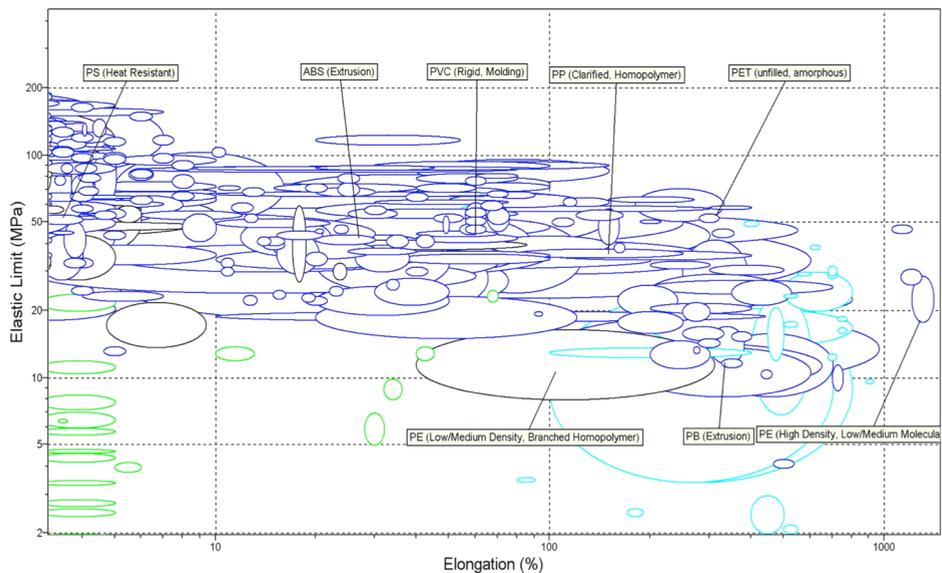


Fig. 1.94.- Correlación Límite Elástico vs. Alargamiento.

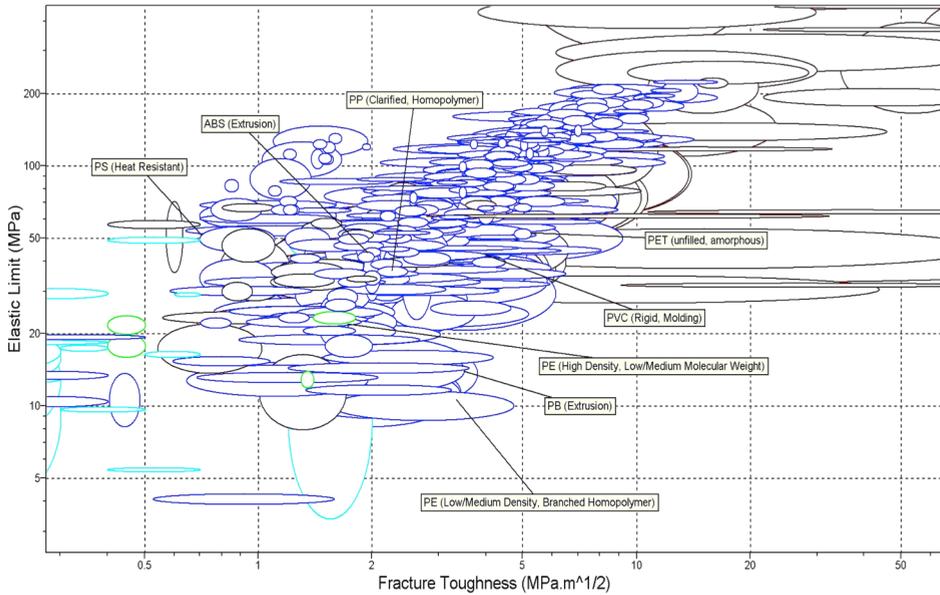


Fig. 1.95.- Correlación Limite Elástico vs. Factor de Intensidad de Tensiones FIT.

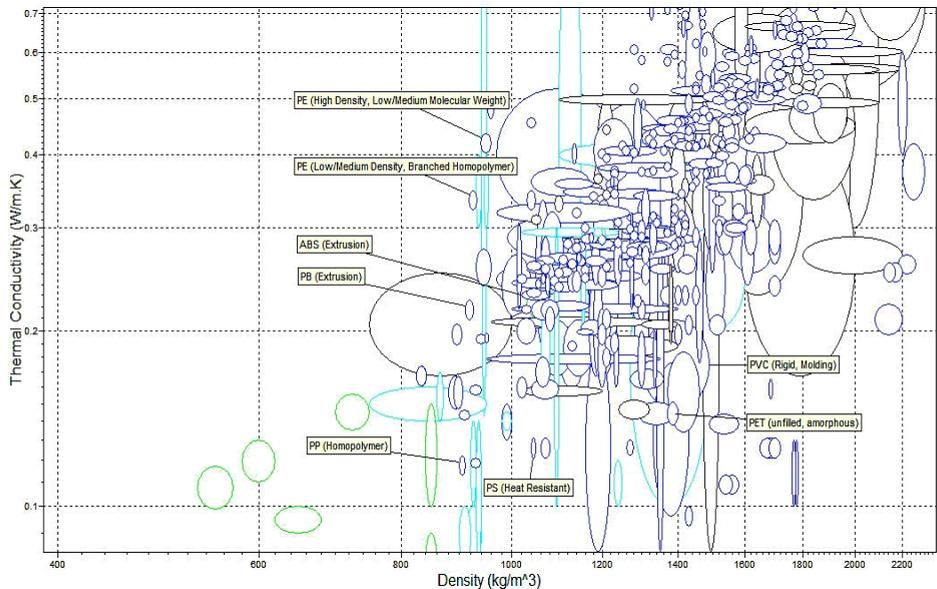


Fig. 1.96.- Correlación Conductividad Térmica vs. Densidad del Material.

1.3.5.3.- Resultados del modelo estado actual.

Mediante este estudio se pretende dar a conocer el estado de funcionamiento actual de las redes del sistema con ausencia de cavitación de la válvula de compuerta, para posteriormente ajustar el modelo con cavitación y localizar el punto donde se produce.

A través de las *figuras 1.97 y 1.98* se representan los diámetros, cotas topográficas, longitud de las tuberías y de la demanda de caudal en los nudos.

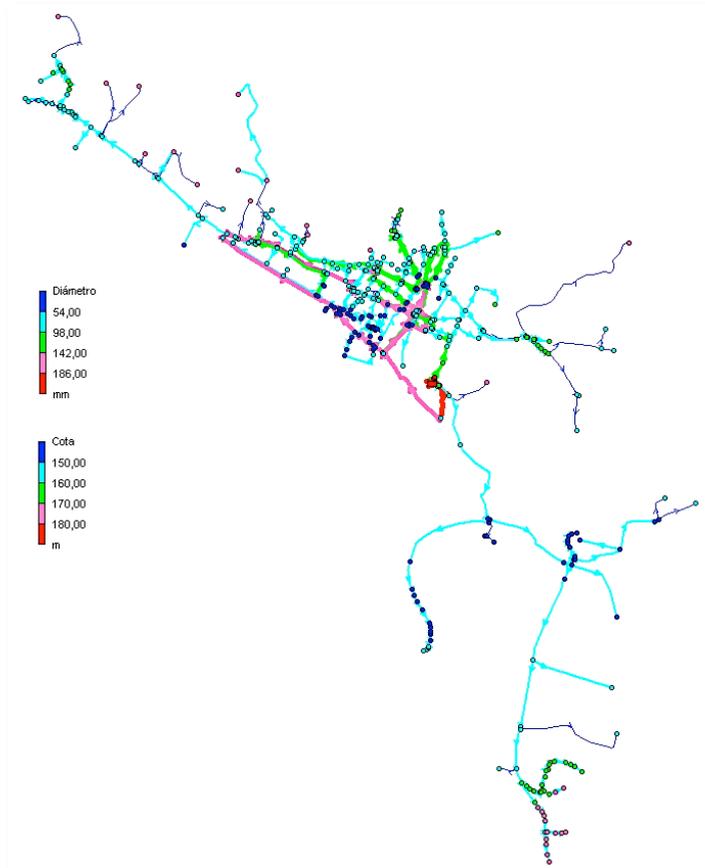


Fig.1.97.- Estado actual de las redes. Diámetros y cotas topográficas de los nudos.

A través de la *figura 1.99*, se ha representado la correlación entre el Caudal (demanda) vs. Tiempo durante un periodo de 24 horas, con la finalidad de obtener las horas de mayor y menor caudal.

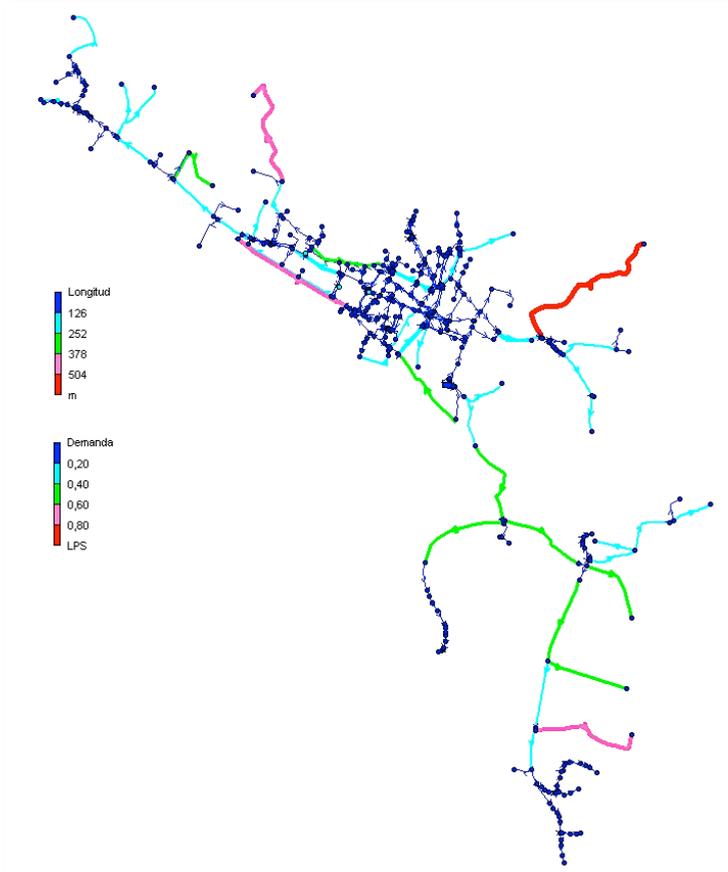


Fig.1.98.- Estado actual de las redes. Longitud de las tuberías y demanda en nudos.

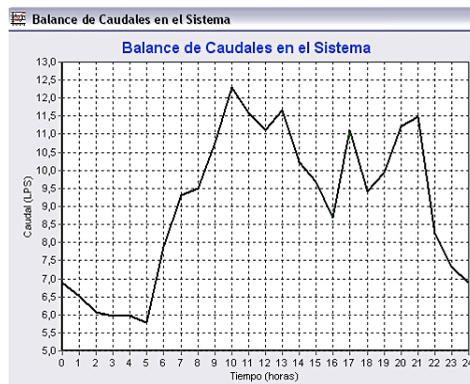


Fig. 1.99.- Correlación Caudal en el sistema (demanda) vs. Tiempo.

A través de las *figuras 1.100 a la 1.103* se representan los resultados del modelo hidráulico, siendo a las 5:00 horas el estado mínima demanda de caudal y máxima presión y a las 10:00 horas el estado de máxima demanda y mínima presión en las redes hidráulicas.

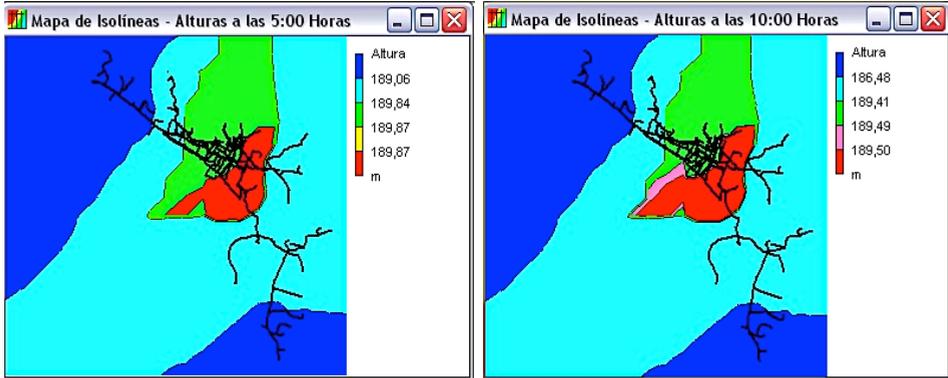


Fig. 1.100.- Mapa de isolíneas de las alturas.

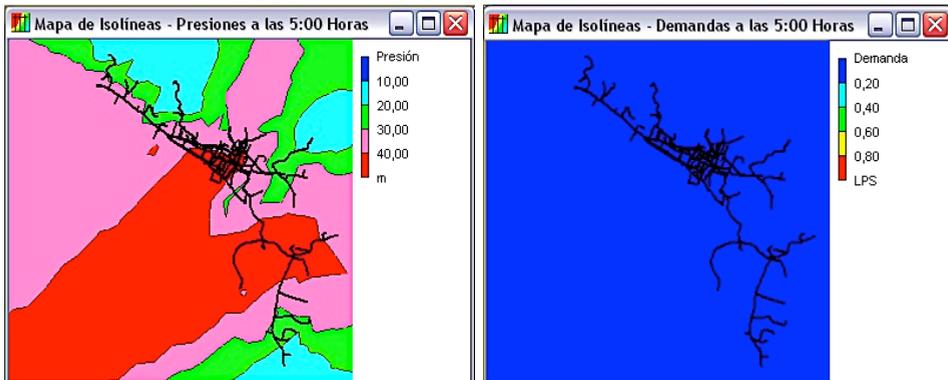


Fig. 1.101.- Mapa de isolíneas Presión y Demanda a las 5:00 horas.

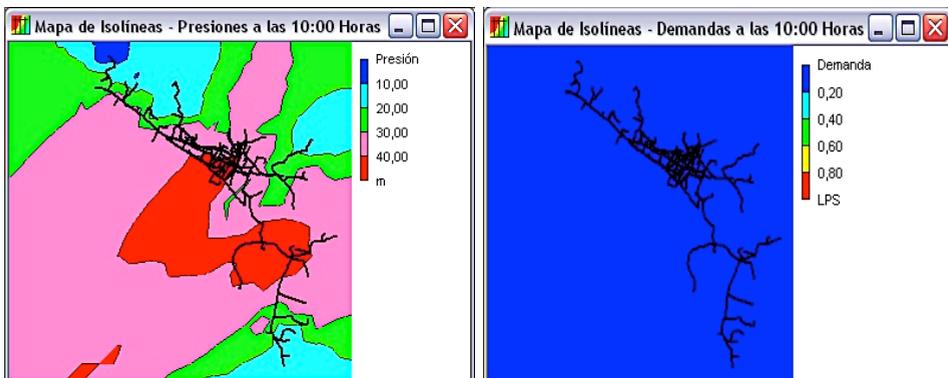
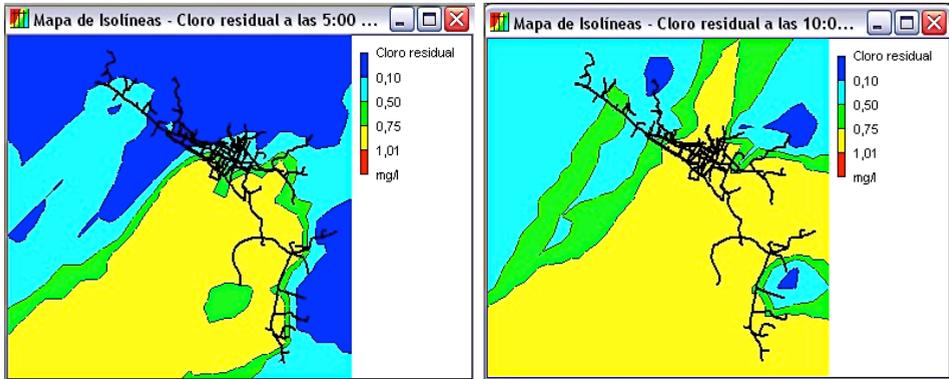
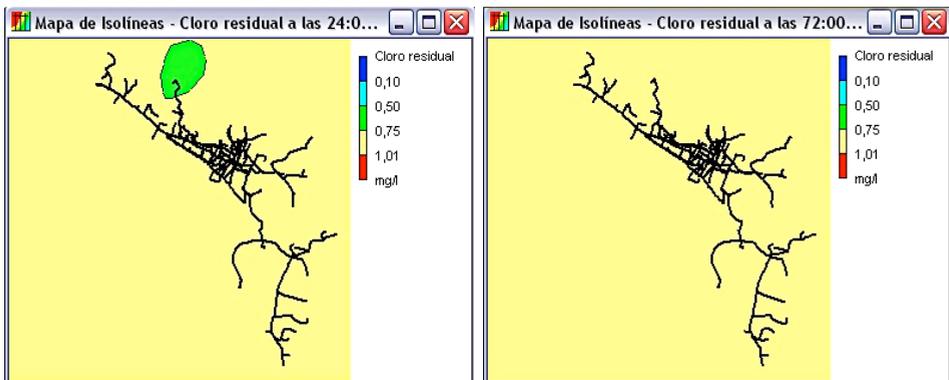


Fig. 1.102.- Mapa de isolíneas Presión y Demanda a las 10:00 horas.



*Fig. 1.103.- Mapa de isolíneas de la concentración de cloro residual.
A las 5:00 y a las 10:00 horas.*

Con la finalidad de saber el estado de salubridad de las redes se ha obtenido el mapa de isolíneas del cloro residual para un periodo de tiempo de 24 y 72 horas de funcionamiento, *figura 104*.



*Fig. 1.104.- Mapa de isolíneas de la concentración de cloro residual.
A las 24:00 y a las 72:00 horas.*

A través de los resultados obtenidos se desprenden las siguientes conclusiones:

- i. La calidad del servicio tanto en presión, caudal y cloro residual en las redes de abastecimiento está garantizado.
- ii. La correlación entre los caudales inyectados y de demanda revela un rendimiento del sistema próximo al 41,4% (muy bajo).
- iii. Se recomienda realizar los ajustes necesarios en las redes con la finalidad de aumentar el rendimiento del sistema.

1.3.5.4.- Resultados del modelo para la válvula en estado de cavitación.

Partiendo de los datos del modelo anterior se procedió al nuevo ajuste del modelo hidráulico con la finalidad de localizar la fuga de agua mediante equipo portátil localizador de fugas [22] que estaba provocando la patología en la válvula de compuerta *figura 1.105*.



Fig. 1.105.- Localización de la fuga mediante ultrasonidos.

La fuga se localizó en una de las dos tuberías principales de abastecimiento a las redes a una distancia próxima a los depósitos de almacenamiento de la población. El balance del caudal inyectado a las redes obtenido a través de los contadores instalados en el interior de los depósitos viene representado a través de la *figura 1.106*.

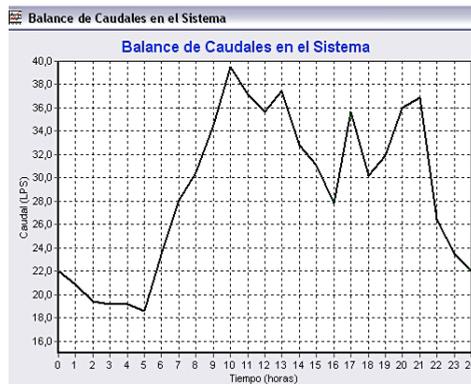


Fig. 1.106.- Correlación Caudal en el sistema (demanda) vs. Tiempo.

A través de la *figura 1.107* se representa el esquema de mínimo y máximo caudal inyectado a las redes.

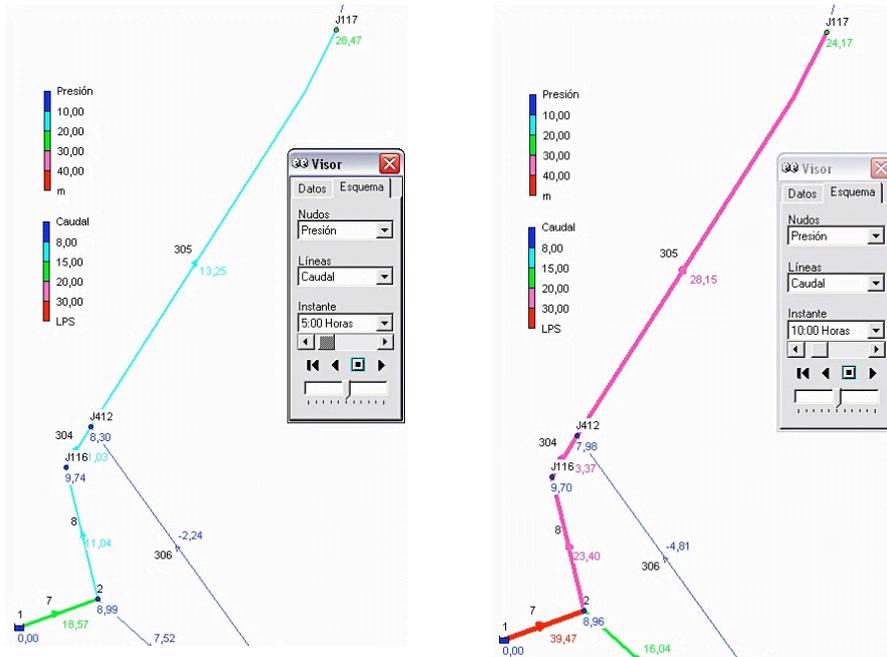


Fig. 1.107.- Esquema de presión y caudal a las 5:00 y 10:00 horas.

Mediante la figura 1.108, se representa la correlación entre la Presión y Caudal vs. Tiempo para el nudo J117 donde se está instalada la válvula de compuerta sometida a los efectos de la cavitación.

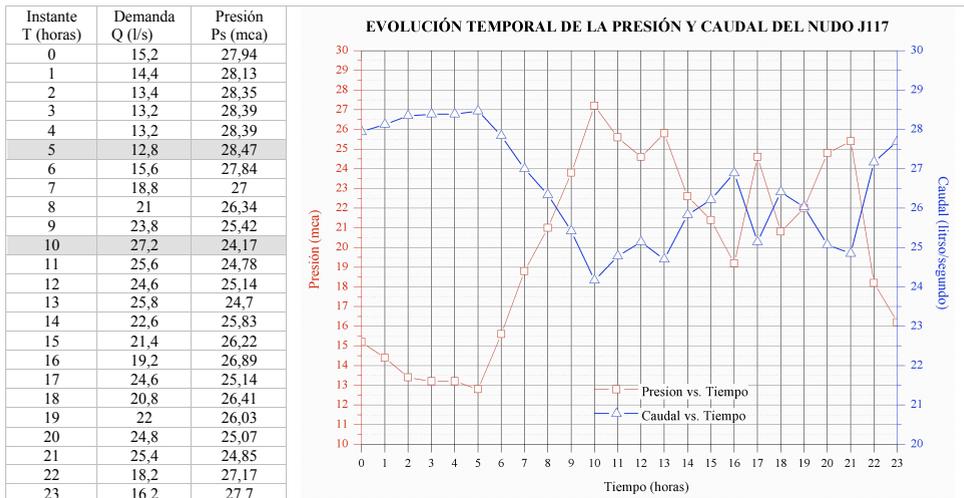


Fig. 1.108.- Presión y caudal vs. Tiempo en el nudo J117.

A través de las *figuras 1.109 y 1.110* se representan los resultados del modelo hidráulico, siendo a las 5:00 horas el estado mínima demanda de caudal y máxima presión y a las 10:00 horas el estado de máxima demanda y mínima presión en las redes hidráulicas.

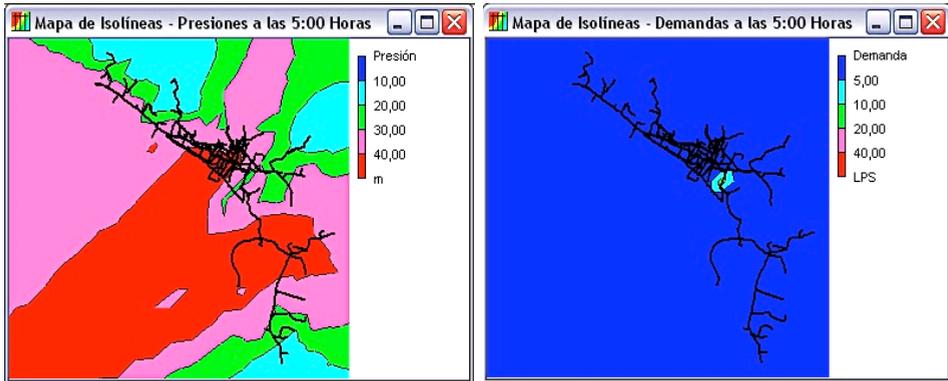


Fig. 1.109.- Mapa de isolíneas Presión y Demanda a las 5:00 horas.

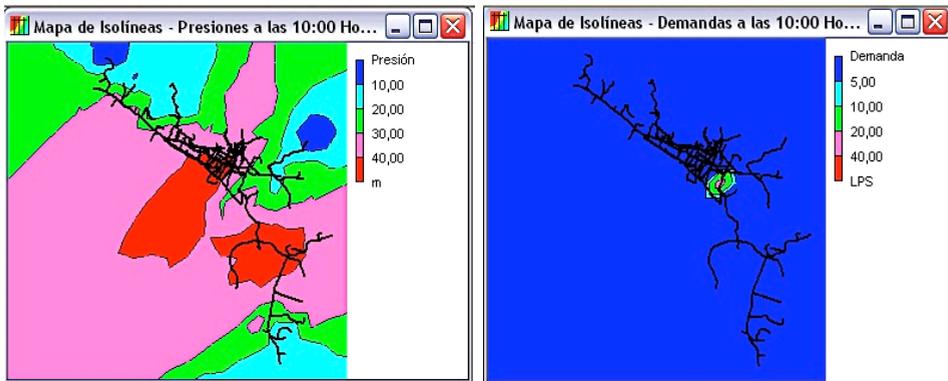
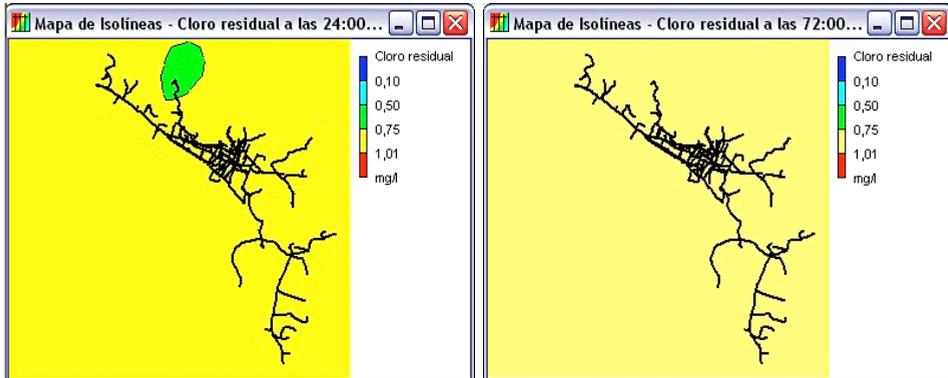


Fig. 1.110.- Mapa de isolíneas Presión y Demanda a las 10:00 horas.

Se puede observar a través del mapa de isolíneas de demanda (en este caso de inyección de agua a la redes) el lugar donde se está produciendo la fuga de agua. En este punto es donde se localizó la válvula de compuerta objeto del estudio de la cavitación. Es importante destacar que los resultados cuantitativos obtenidos de caudal y de presión en régimen dinámico son las variables de contorno que van a condicionar la modelización por MEF.

Además, con la finalidad de garantizar la salubridad del agua en las redes se ha obtenido los resultados del cloro residual, *figura 1.111*.



*Fig. 1.111.- Mapa de isolíneas de la concentración de cloro residual.
A las 24:00 y a las 72:00 horas.*

De los resultados obtenidos se deduce que:

- i. La calidad del servicio tanto en presión, caudal y cloro residual en las redes de abastecimiento está garantizado.
- ii. La correlación entre los caudales inyectados y de demanda revela un rendimiento del sistema menor que el caso anterior.
- iii. Los valores teóricos de presión y caudal inyectado para la modelización de la válvula de compuerta por MEF son los descritos en la *figura 1.108*, sin transitorios. Valores que pueden aumentar de forma considerable para estados temporales dependiendo de la época del año, mes y día por ser una población con un índice de ocupación considerable en verano.

2. DETALLES EXPERIMENTALES.

2.1.- Introducción.

Para el estudio se ha partido de la válvula de compuerta en servicio de calibre DN-100 con presión nominal PN-10/16 cuya justificación viene por:

1. Son las más comunes en las redes de abastecimiento de agua potable.
2. Es estudio de la patología a estudio por erosión – cavitación se ha encontrado en este tipo de calibre actualmente disponible para su modelización.
3. El análisis y diagnóstico del fallo ha sido posible realizarlo por correlación entre la válvula con patologías en adelante válvula antiguo diseño o válvula con resalte hidráulico (VA), y la válvula con nuevo diseño que el fabricante comercializa en la actualidad, en adelante válvula nuevo diseño o válvula sin resalto hidráulico (VN). Las dos válvulas VA y VN proceden del mismo fabricante siendo este de la firma Belgicast (www.belgicast.eu).

La variación en el diseño de las válvulas VA y VN objeto de este trabajo se centra fundamentalmente en el corte de la vena líquida en la parte inferior del cuerpo de la válvula donde se encuentran las guías o nervios metálicos cuya función es dirigir la compuerta polimérica para su abertura o cierre. La válvula VA se describe en el *apartado 2.2.2*, en esta válvula las guías o nervios se inician desde la generatriz inferior de la válvula, mientras que en la válvula VN descrita en el *apartado 2.2.3* las guías tienen su inicio muy cerca de la mitad de la sección de la válvula.

2.2.- Características de las válvulas a estudio.

2.2.1.- Materiales.

Las características de los materiales para las válvulas VA y VN según datos obtenidos del catalogo comercial del fabricante son:

- Cuerpo y tapa de fundición nodular EN-GJS-500-7 (GGG-50), UNE EN 1563, con recubrimiento interior y exterior de resina epoxi aplicado electrostáticamente.
- Cierre de fundición nodular EN-GJS-500-7 (GGG-50), UNE EN 1563, revestido interior y exteriormente de EPDM, UNE EN 681-1.
- Eje de acero inoxidable AISI-420 (X20Cr13), UNE EN 10080.

- Junta tapa-cuerpo y compuerta en EPDM y NBR.
- Tornillería cuerpo y tapa en acero al carbono 8.8, dimensiones según DIM 912, recubrimiento anticorrosivo GEOMET y protegida mediante sellado. Opciones en acero inoxidable A2 (AISI-304 / X5CrNi18 10) y calidad A4 (AISI-316 / X5CRNiMo1713-3).
- Volante de acero estampado o cuadradillo en fundición nodular EN-GJS-500-7 (GGG-50).

2.2.2.- Válvula antiguo diseño o con resalte hidráulico (VA). Patologías.

Las piezas que componen los elementos a estudio de la válvula VA vienen dado por las *figuras 2.1 a la 2.6* inclusive. En estos momentos esta válvula ya no se comercializa habiéndose sustituido por el fabricante por el nuevo diseño (VN) que se describe en el *apartado 2.2.3*. De cualquier modo el fabricante ha tenido un exquisito rigor para ambas válvulas en el diseño hidráulico de la compuerta por las siguientes razones:

- a) La sección transversal de la compuerta *figura 2.5* está formada por una media tobera convergente – divergente con la finalidad de encauzar las líneas de corriente y conseguir de esta forma disminuir las pérdidas de carga secundarias para cada estado de abertura Altura abertura vs. Caudal y Presión. La tobera es de sección variable según se puede observar en la *figura 2.4* debido a la curvatura inferior de la propia compuerta y del espesor de la misma *figura 2.6*.
- b) La utilización de materiales poliméricos del tipo EPDM es totalmente adecuado. La justificación de utilizar este material es por ser totalmente elástico lo cual permite el cierre total de la vena líquida por deformación del propio material recuperando su forma inicial (memoria) cuando la válvula se encuentra parcialmente abierta, y lo más importante, debido a su elasticidad permite la deformación sin arranque del material en estados de cavitación o de erosión por el arrastre del sílice que lleva disuelto el agua.

No obstante, el diseño no es totalmente perfecto debido a que para cada estado de correlación entre la Altura abertura vs. Caudal y Presión los estados de comportamiento de la tobera son distintos, lo que comporta en casos extremos a patologías como las que se describe en las *figuras 2.7 a la 2.10* inclusive. Para poder evitar este tipo de patologías sería necesario una compuerta cuyo diseño de la tobera fuese regulable lo que conllevaría a costes económicos muy elevados y de difícil justificación teniendo en cuenta que este tipo de válvulas no se diseñan para regular el caudal ni la presión, son válvulas cuyo diseño se basa en todo o nada aunque en la práctica diaria debido a los escasos recursos económi-

cos de las empresas de gestión y servicio del agua potable o en su caso los municipios que gestionan el agua potable las utilizan para este fin totalmente inadecuado.



Fig. 2.1.- Válvula vista lateral.



Fig. 2.2.- Cuerpo inferior de la válvula.



Fig. 2.3.- Compuerta polimérica.



Fig. 2.4.- Vista frontal de la compuerta.



Fig. 2.5.- Vista lateral de la compuerta.



Fig. 2.6.- Vista inferior de la compuerta.

Las patologías que se han encontrado en esta válvula tal y como se ha mencionado anteriormente se describen en las *figuras 2.7 a la 2.10*, en el que se observa un arranque no uniforme del material en la parte inferior del cuerpo de la válvula debido a los estados de cavitación a la que ha sido sometida. Aparentemente cabe pensar que la cavitación se ha iniciado al pié de la compuerta aguas abajo del fluido disminuyendo su efecto a medida que el fluido se separa de la compuerta, cuando realmente no sucede de esta forma. Se justificará en el *capítulo 3 Resultados y Análisis*, como se inicia la cavitación y como se propaga, así como la influencia de la elevada velocidad del fluido al pié de tobera que contribuye a la erosión del material.



Fig. 2.7.- Sección transversal vena líquida, compuerta abierta 3 mm.



Fig. 2.8.- Sección transversal vena líquida compuerta totalmente abierta.



Fig. 2.9.- Vista superior del cuerpo de la válvula. Patología en la dirección y sentido del fluido.



Fig. 2.10.- Detalle de la patología por erosión – cavitación. Se puede observar la perforación del cuerpo de la válvula.

En la *figura 2.8* pueden observarse un arranque de material mediante una forma geométrica semejante a dos lóbulos simétricos al eje vertical (en adelante eje Y *figura 2.11*) a una misma distancia sobre un eje perpendicular al eje al eje Y (en adelante eje X, *figura 2.11*) cuya propagación se realiza de forma paralela al

pie del cuerpo de la válvula *figura 2.10* (en adelante eje Z, *figura 2.11*) en la misma dirección y sentido del flujo del agua.

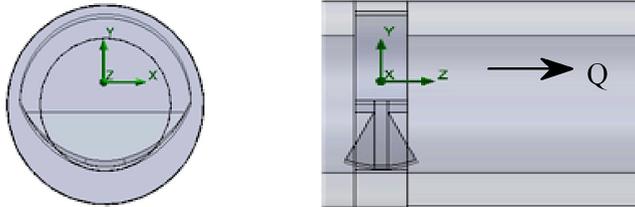


Fig. 2.11.- Esquema sección transversal y longitudinal de la válvula.

El estado de fatiga del material ha estado sometido a largos periodos de tiempo que ha provocado la perforación del cuerpo de la válvula *figura 2.10*, en el lugar donde la erosión del fluido es mayor como consecuencia de la elevada velocidad de salida del agua de la tobera.

La formación de estas patologías poseen un denominador común atribuible al grado de apertura de la compuerta, cuanto más pequeña es la altura de apertura se alcanza con mayor facilidad la depresión del fluido y en consecuencia el fenómeno de la cavitación. La morfología y geometría de las patologías necesariamente está correlacionado con el tipo de material de la válvula (características mecánicas), su análisis y estudio no se contempla en esta Tesis.

Para conocer un poco mejor la estructura del material se han realizado micrografías del cuerpo de la válvula cerca de la zona donde se han producido las patologías *figuras 2.12 y 2.13*.



Fig. 2.12.- Sección transversal de la válvula. Toma de muestra en la pared lateral.

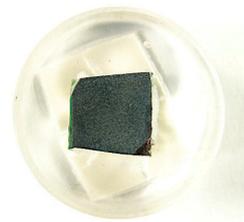


Fig. 2.13.- Probeta con la muestra del material.

En las figuras 2.14 a la 2.19 inclusive, se muestran las micrografías del material sin ataque químico (sa). El material está formado por una fundición con inclusiones de grafito esférico con una elevada heterogeneidad en el tamaño de los nódulos de carbono.

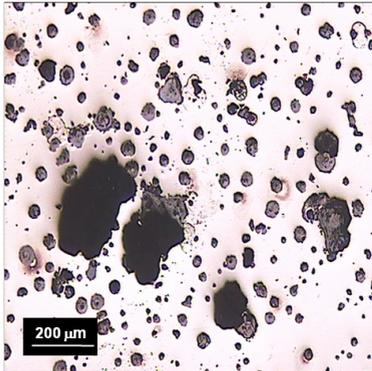


Fig. 2.14.- Núcleo 1x50 (sa)

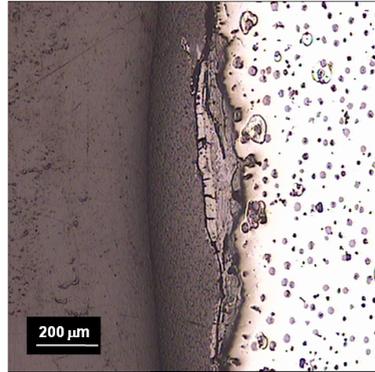


Fig. 2.15.- Borde interior 1x50 (sa).

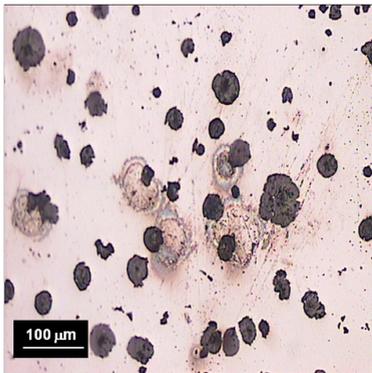


Fig. 2.16.- Núcleo 1x100 (sa).

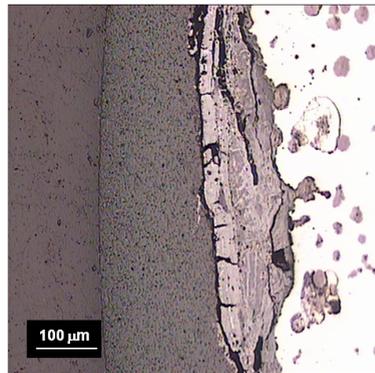


Fig. 2.17.- Borde interior 1x100 (sa).

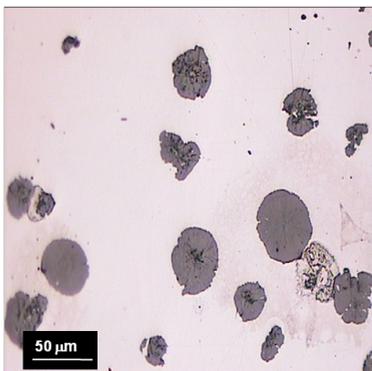


Fig. 2.18.- Núcleo 1x200 (sa).



Fig. 2.19.- Núcleo 1x400 (sa).

En las *figuras 2.20 a la 2.25* inclusive se muestran micrografías con ataque químico (a), se donde se observa una matriz metálica formada por ferrita y perlita con inclusiones de carbono esférico [23, 24].

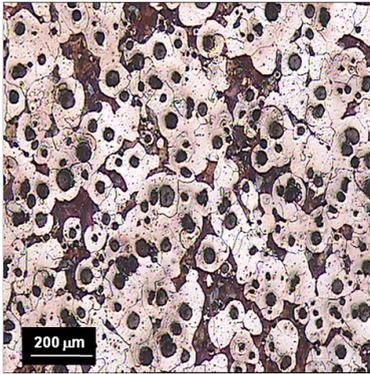


Fig. 2.20.- Núcleo 1x50 (a).

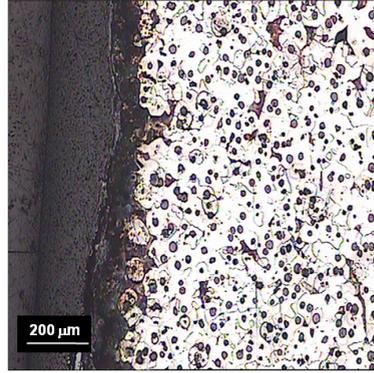


Fig. 2.21.- Borde interior 1x50 (a).

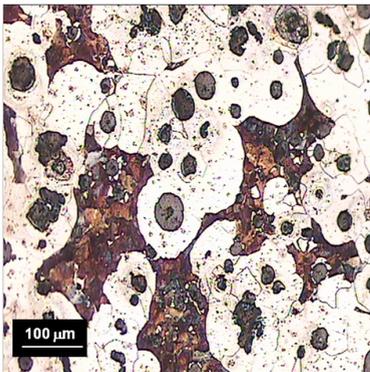


Fig. 2.22.- Núcleo 1x100 (a).

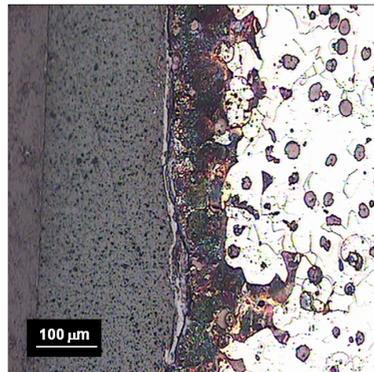


Fig. 2.23.- Borde interior 1x100 (a).

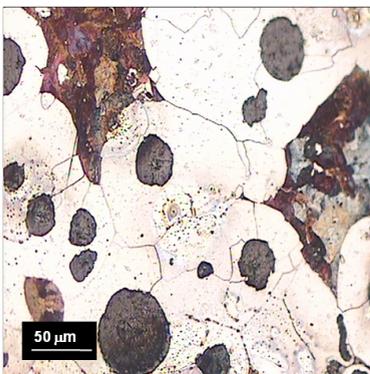


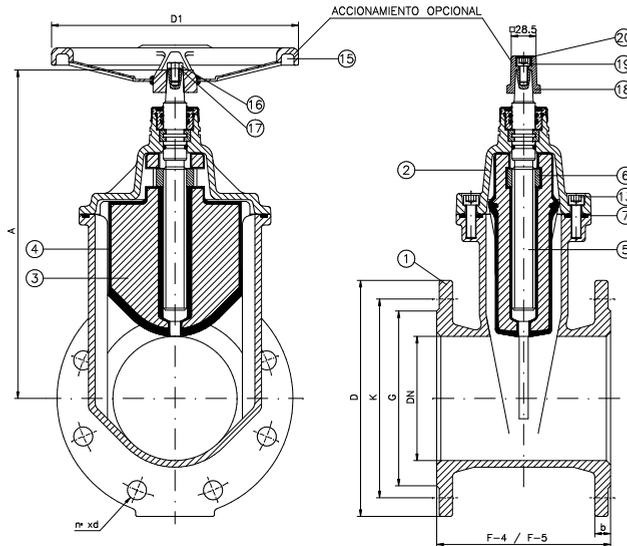
Fig. 2.24.- Núcleo 1x200 (a).



Fig. 2.25.- Núcleo 1x400 (a).

2.2.3.- Válvula nuevo diseño o sin resalte hidráulico (VN).

En la *figura 2.26* se representan las series de las válvulas de nuevo diseño, siendo estos datos obtenidos del fabricante.



DN	ISO 2531 PN-10				ISO 2531 PN-16				EN 558 (DIN 3202)		PESO Kg		A	D1	N° vueltas para cierre	
	K	G	b	n°xd	D	K	G	b	n°xd	F-4	F-5	F-4				F-5
40	110	84	19	4x19	150	110	84	19	4x19	140	240	8	9	192	125	10
50	125	99	19	4x19	165	125	99	19	4x19	150	250	10	11	202.5	125	12.5
65	145	118	19	4x19	185	145	118	19	4x19	170	270	12.5	13.5	233	150	13
80	160	132	19	8x19	200	160	132	19	8x19	180	280	17	18.5	268	175	16
100	180	156	19	8x19	220	180	156	19	8x19	190	300	21	22.5	310	200	20
125	210	184	19	8x19	250	210	184	19	8x19	200	325	29.5	32	357.5	250	25
150	240	211	19	8x23	285	240	211	19	8x23	210	350	38	41	398.5	300	30
200	295	266	20	8x23	340	295	266	20	12x23	230	400	58	66	488.5	350	33
250	350	319	22	12x23	400	355	319	22	12x28	250	450	85.5	100.5	581.5	400	45
300	400	370	24.5	12x23	455	410	370	24.5	12x28	270	500	121	141	656.5	500	50

20	TAPON CUADRADILLO	1	LUPOLEN													
19	TORNILLO CUADRADILLO	1	X5 CrNi 18 10	DIN 17440											DIMENSIONES S/DIN 912	
18	CUADRADILLO	1	GGG-50	DIN EN 1563											□ 28.5	
17	ARANDELA DE VOLANTE	1	X5 CrNi 18 10	DIN 17440											DIMENSIONES S/DIN 9021	
16	TORNILLO DE VOLANTE	1	X5 CrNi 18 10	DIN 17440											DIMENSIONES S/DIN933	
15	VOLANTE	1	Acero Estampado													
14	GUARDAPOLVO	1	EPDM / NBR	UNE EN 681-1												
13	TORNILLO CUERPO-TAPA	s/DN	Acero 8.8												DIMENSIONES S/DIN 912 (Prot. DACROMET)	
12	JUNTA TOR. T.PRENSA / TAPA	1	NBR	ASTM 2000												
11	JUNTA TORICA TUERCA PRENSA	2	NBR	ASTM 2000												
10	TUERCA PRENSA	1	Aleación Cobre	UNE EN 12165	CW718R (CuZn39Mn1AlPbSi)											
9	JUNTA TORICA EN EJJE	1	EPDM	UNE EN 681-1												
8	ARANDELA DE SUJECION	1	Aleación Cobre	UNE EN 12165	CW721R (CuZn40Mn1Pb1AlFeSn)											
7	JUNTA CUERPO-TAPA	1	EPDM / NBR	UNE EN 681-1												
6	TUERCA SUJECION CIERRE	1	Aleación Cobre	UNE EN 12165	CW718R (CuZn39Mn1AlPbSi)											
5	EJJE	1	X20 Cr13	DIN 17440												
4	REVESTIMIENTO DE CIERRE	1	EPDM / NBR	UNE EN 681-1												
3	CIERRE	1	GGG-50	DIN EN 1563												
2	TAPA	1	GGG-50	DIN EN 1563												
1	CUERPO	1	GGG-50	DIN EN 1563											BRIDAS SEGÚN ISO 2531	
MARCA	DENOMINACION	N° PIEZAS	MATERIAL	NORMA											OBSERVACIONES	

Fig. 2.26.- Series de válvulas de compuerta embridadas nuevo diseño.

En este nuevo diseño el fabricante hace una pequeña modificación en las guías o nervios para conducir la compuerta, estos inician su arranque a una determinada altura del cuerpo inferior de la válvula por debajo del eje X según la *figura 2.11* y puede comprobarse en la *figura 2.28*.



Fig. 2.27.- Sección de la válvula.

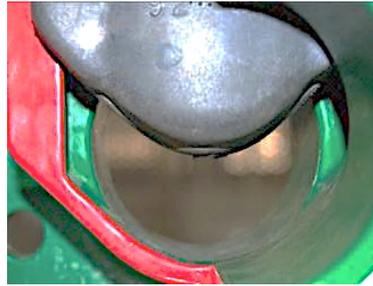


Fig. 2.28.- Sección transversal vena líquida. Compuerta abierta entre el 60 y el 70% de la sección transversal.

No se poseen datos sobre patologías en válvulas en servicio para los mismos estados de abertura, caudal y presión que en el caso anterior. Es por ello que la única forma de saber de forma teórica su comportamiento frente a estados de cavitación es realizar un modelo válido a través de MEF para la válvula antigua (VA) y aplicar este método en la válvula de nuevo diseño (VN) con las correcciones oportunas de la posición de las guías o nervios.

2.3.- Condiciones de contorno. Variables hidráulicas y geométricas.

Las condiciones de contorno para poder realizar los cálculos por MEF poseen una importancia muy relevante ya que van a determinar que variables hidráulicas y geométricas son las que van a estar sujetas a variación cuya finalidad es obtener el modelo válido de las patologías encontradas en la VA.

Las variables hidráulicas se pueden acotar en función de los resultados obtenidos en el *capítulo 1 Introducción*, siendo éstas la presión y el caudal de servicio, mientras que las variables geométricas son atribuibles a la posición o abertura de la válvula y el diseño de las guías o nervios.

2.3.1.- Densidad y viscosidad cinemática del agua.

La densidad y la viscosidad cinemática del agua se ha establecido para una temperatura máxima de 20°C (293,15 K), justificado por ser la temperatura máxima recomendable para el transporte de agua potable según la normativa de obligado cumplimiento en redes de abastecimiento, además de ser el estado más desfavorable para el estado de cavitación *figura 1.5*. En ningún momento se ha superado esta temperatura en las redes de abastecimiento de la localidad de Pedralba (Valencia), la temperatura media del agua según mediciones realizadas se sitúa alrededor de los 7°C.

El error cometido en los cálculos al utilizar la temperatura máxima de 20°C en los cálculos frente a la temperatura media de las redes de 7°C es despreciable para los cálculos por MEF, no así para los cálculos hidráulicos que se han realizado en el *capítulo 1 Introducción* donde la temperatura de cálculo se ha fijado en 4°C con la finalidad de obtener el estado más desfavorable desde el punto de vista de máximo rozamiento en las redes.

2.3.2- Presión y caudal.

Los resultados obtenidos en el *capítulo 1 Introducción* en su apartado 1.3.5.4 *Resultados del modelo para la válvula en estado de cavitación*, la presión y caudal vienen dados por la *figura 1.107*.

Instante T (horas)	Demanda Q (l/s)	Presión Ps (mca)
0	15,2	27,94
1	14,4	28,13
2	13,4	28,35
3	13,2	28,39
4	13,2	28,39
5	12,8	28,47
6	15,6	27,84
7	18,8	27
8	21	26,34
9	23,8	25,42
10	27,2	24,17
11	25,6	24,78
12	24,6	25,14
13	25,8	24,7
14	22,6	25,83
15	21,4	26,22
16	19,2	26,89
17	24,6	25,14
18	20,8	26,41
19	22	26,03
20	24,8	25,07
21	25,4	24,85
22	18,2	27,17
23	16,2	27,7

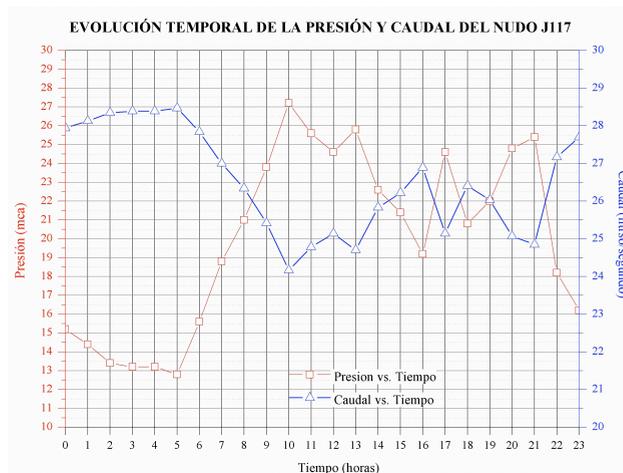


Fig. 1.107.- Presión y caudal vs. Tiempo en el nudo J117.

No obstante, estos resultados deben de ser tenidos en cuenta con moderación ya que son datos obtenidos a través de un modelo hidráulico sin los efectos de los transitorios en las redes. Debido a este problema ha sido conveniente realizar modificaciones en las series de caudal y presión de forma aleatoria pero ajustada a la realidad del sistema ya que ha sido imposible realizar un ajuste de las series a través de criterios de selección estadística (diseño factorial 2ⁿ) de optimización. Las series de caudal, presión y abertura de la válvula estimadas vienen dadas en la *tabla 2.1*.

Tabla 2.1.- Condiciones de contorno caudal, presión y abertura de válvula.

Abertura de válvula h (mm)	Presión de servicio P · 10 ⁻⁵ (Pa)	Caudal Q · 10 ⁻³ (m ³ /s)
Válvula antiguo diseño o con resalte hidráulico (VA).		
3	2, 4, 6 y 12	20 (*)
6	2, 4, 6 y 12	
9	2, 4 6 y 12	
Válvula nuevo diseño o sin resalte hidráulico (VN).		
3	2, 4, 6 y 8	20(*)
6	4 y 8	
9	4 y 8	

Se han realizado cálculos por MEF en muchas más series que las expuestas en la *tabla 2.1*, no obstante debido a la extensión de los cálculos solamente se exponen aquellas que han sido más representativas para el análisis. Así mismo se ha establecido un caudal de fuga de 20 l/s (*) por ser este el que se ha basado del modelo hidráulico del *apartado 1.3.5.4 Resultados del modelo para la válvula en estado de cavitación*.

2.4.-Método de cálculo utilizado por MEF.

El método de cálculo utilizado se ha basado en las ecuaciones de Navier-Stokes y de Euler [4, 25, 26], considerando el agua como fluido real e incompresible, *ecuaciones (2.1a, 2.1b)*.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla F + \nabla G + G = 0 \quad (2.1a)$$

Ecuación que puede escribirse de la forma:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{\partial G_i}{\partial x_i} + Q = 0 \quad (2.1b)$$

El vector de incógnitas independientes utilizando las notaciones inicial y cartesiana, *ecuaciones (2.2a, b, c, d, e)*.

$$\Phi = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ \rho E \end{Bmatrix} \quad \text{o, en notación cartesiana,} \quad \Phi = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho \omega \\ \rho E \end{Bmatrix} \quad (2.2a)$$

$$F_i = \begin{Bmatrix} \rho u_i \\ \rho u_1 u_i + p \delta_{1i} \\ \rho u_2 u_i + p \delta_{2i} \\ \rho u_3 u_i + p \delta_{3i} \\ \rho H u_i \end{Bmatrix} \quad \text{o} \quad F_x = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u v \\ \rho u \omega \\ \rho H u \end{Bmatrix}, \text{ etc.} \quad (2.2b)$$

$$G_i = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{1i} \\ \tau_{2i} \\ \tau_{3i} \\ \tau_{3i} - k \frac{\partial T}{\partial x_i} \end{Bmatrix} \quad \text{o,} \quad G_x = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\tau_{xx} \\ -\tau_{yx} \\ -\tau_{zx} \\ -\left(\tau_{xx} u + \tau_{xy} v + \tau_{xz} \omega - k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \end{Bmatrix}, \text{ etc.} \quad (2.2c)$$

$$Q = \begin{Bmatrix} 0 \\ \rho f_1 \\ \rho f_2 \\ \rho f_3 \\ -\rho f_i u_i - q_H \end{Bmatrix} \quad \text{o,} \quad Q = \begin{Bmatrix} 0 \\ \rho f_x \\ \rho f_y \\ \rho f_z \\ -\rho (f_x u + f_y v + f_z \omega) - q_H \end{Bmatrix}, \text{ etc.} \quad (2.2d)$$

Con

$$\tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (2.2.e)$$

Un caso particular suponiendo la viscosidad y la conducción de calor nulas ($\tau_{ij}=k=0$) se conoce con el nombre de “ecuaciones de Euler”. Las ecuaciones anteriores son el punto de partida para todos los estudios de mecánica de fluidos [27, 28]. El cálculo por MEF se ha realizado mediante técnicas computacionales [29, 30, 31], que no toman en consideración la naturaleza del material de la válvula.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

3.1.- Introducción.

Para poder establecer los criterios a estudio mediante MEF [31] de las válvulas VA y VN se ha propuesto la siguiente metodología de trabajo:

- A. Series de cálculo. Altura de abertura, presión y caudal.
- B. Resultados necesarios para determinar la erosión-cavitación.
- C. Coordenadas y cotas de estudio.
- D. Mallado.

3.1.1.- Series de cálculo. Altura de abertura, presión y caudal.

Las series de cálculo a estudio mediante MEF vienen dadas en base a los criterios establecidos en el capítulo 2 *Detalles experimentales en el apartado 2.3.2*, cuyos valores son los de la *tabla 2.1*.

Tabla 2.1.- Condiciones de contorno caudal, presión y abertura de válvula.

Abertura de válvula h (mm)	Presión de servicio $P \cdot 10^{-5}$ (Pa)	Caudal $Q \cdot 10^{-3}$ (m ³ /s)
Válvula antiguo diseño o con resalte hidráulico (VA).		
3	2, 4, 6 y 12	20 (*)
6	2, 4, 6 y 12	
9	2, 4 6 y 12	
Válvula nuevo diseño o sin resalte hidráulico (VN).		
3	2, 4, 6 y 8	20(*)
6	4 y 8	
9	4 y 8	

3.1.2.- Resultados necesarios para determinar la erosión-cavitación.

Los resultados necesarios que determinan la erosión – cavitación en la válvula de compuerta a estudio son:

1. La velocidad del fluido.
2. La depresión o presión inferior a la atmosférica.

Y como resultados secundarios para conocer que fenómenos adquiere el fluido aguas abajo de la compuerta los siguientes:

3. La densidad del fluido.
4. La temperatura del fluido.
5. La fracción de la masa y volumen del vapor.

3.1.3.- Coordenadas y cotas de estudio.

Con la finalidad de obtener el punto de inicio de la cavitación (coordenadas x , y , z) en base a la patología presentada en el capítulo 2 *Detalles experimentales* correspondiente a las figuras 2.7; 2.8; 2.9 y 2.10, el criterio establecido es el siguiente: Coordenada “ x ” coincidente con la anchura de la válvula, coordenada “ z ” para el sentido de la dirección del flujo, y coordenada “ y ” para la altura con respecto a la base de la válvula para cada altura de apertura de la válvula h , figura 3.1.

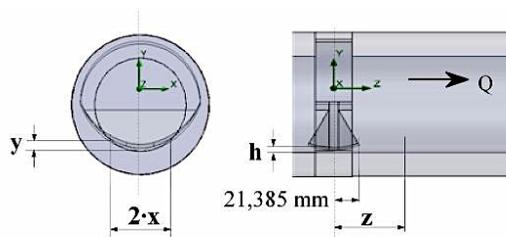
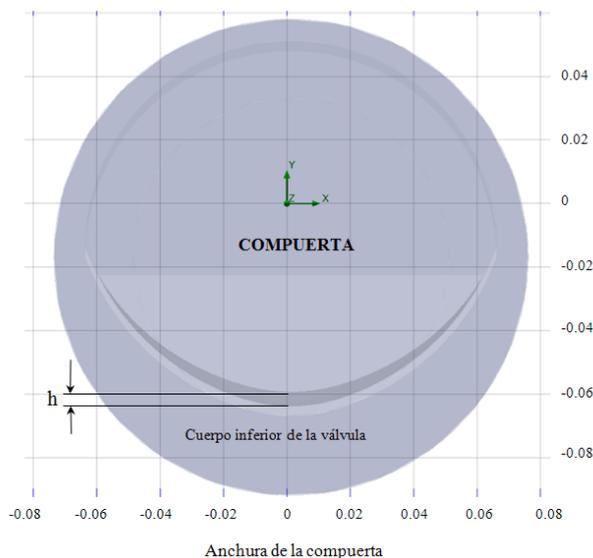


Fig. 3.1.- Vista frontal y longitudinal de la válvula. Coordenadas y cotas de estudio.

Para conocer el punto de inicio de la cavitación en las coordenadas x e y , se ha diseñado la parte frontal de la válvula según el criterio de cuadrículas expuesto en la figura 3.2a para la toma de datos y construcción del resumen de resultados al final de cada serie de cálculo.



Con la finalidad de estudiar la variación de la velocidad, presión, densidad, temperatura y fracción del vapor de agua a lo largo de la coordenada z (sentido y dirección del flujo) se han realizado secciones transversales para cada una de las series a estudio. El valor de las cotas z a estudio consideradas (figura 3.2b) son:

- $z=0$ mm.
- $z=21,385$ mm.
- $z=50$ mm.
- $z=100$ mm.

Fig. 3.2a.- Vista frontal de la válvula. Diseño de cuadrículas.

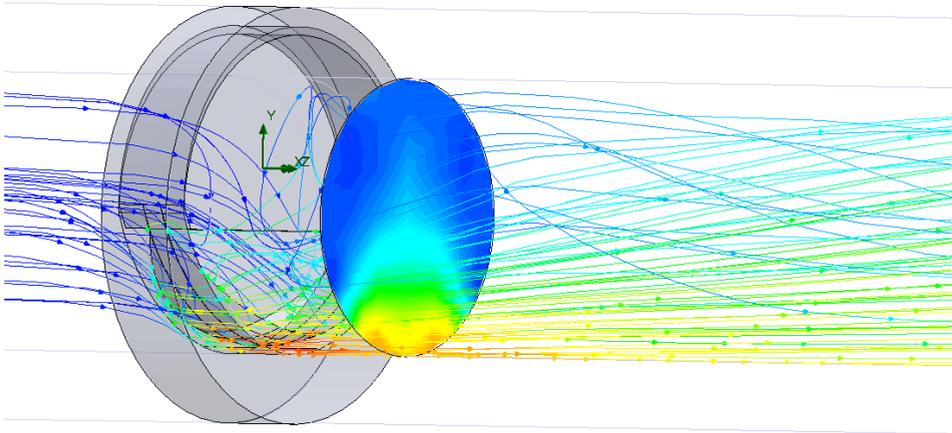


Fig. 3.2b.- Vista longitudinal de las líneas de corriente.
Sección transversal para cada serie $z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

3.1.4.- Mallado.

El mallado para realizar los cálculos por MEF se ha realizado utilizando la optimización propuesta por el software en base a la altura de abertura “h” por ser la opción más eficiente, la modificación propuesta de forma manual ha sido el ajustar el error de cálculo cuyo valor ha sido del orden de 0,1, cuyo tiempo de cálculo para cada una de las series estudiadas ha estado comprendida entre 7.200 y 9.000 minutos utilizando un ordenador Mac OSX con procesador de 3,6 GHz Intel Core i5 con memoria de 8GB 1333 MHz DDR3. La distribución del mallado se representan a través de las figuras 3.3 a la 3.7 inclusive.

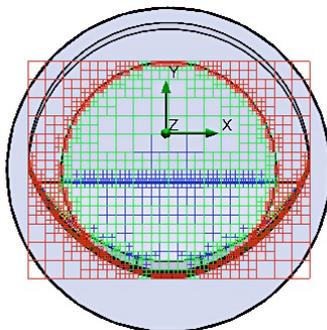


Fig. 3.3.- Vista frontal compuerta.

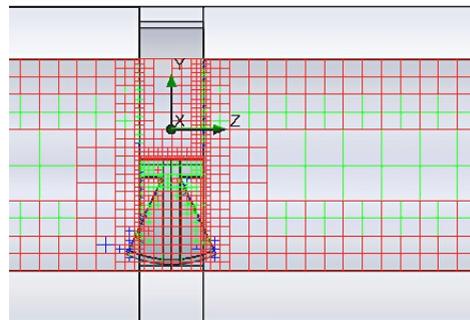


Fig. 3.4.- Vista lateral de la compuerta.

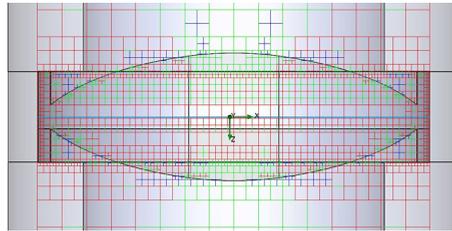


Fig. 3.5.- Vista superior de la compuerta.



Fig. 3.6.- Vista sección longitudinal central del tramo analizado.

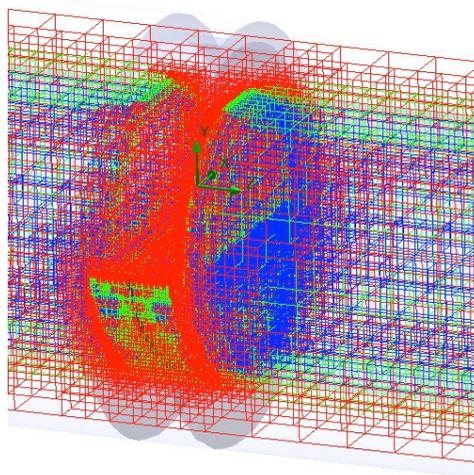


Fig. 3.7.- Vista genérica en perspectiva del mallado, compuerta y tubería.

3.2.- Resultados válvula antiguo diseño o con resalte hidráulico (VA).

3.2.1.- VA. Abertura $h=3\text{ mm}$, $P=20\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

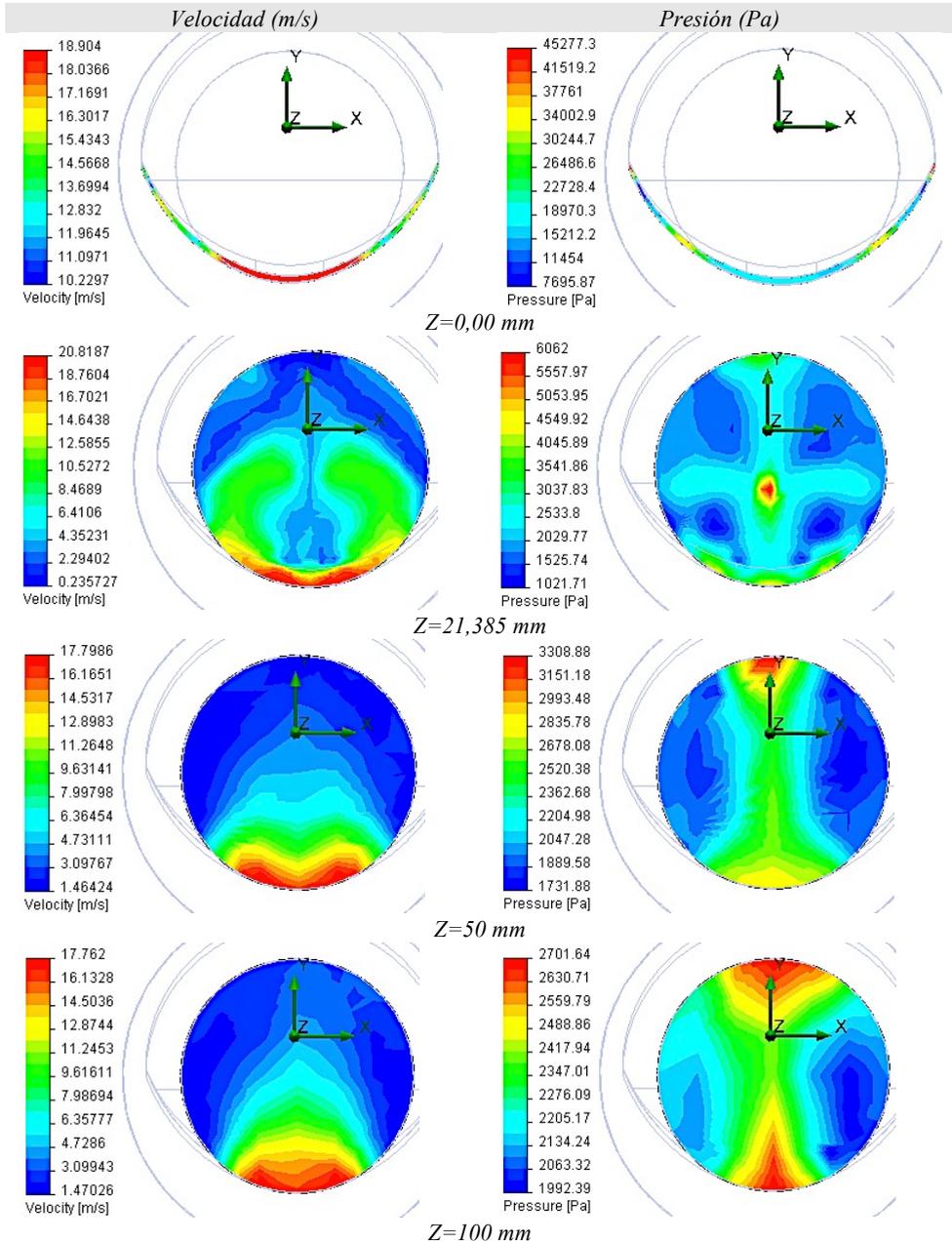


Fig. 3.8.- Mapa de isóneas secciones transversales VA $h=3\text{ mm}$, $P=20\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$ Velocidad y Presión del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

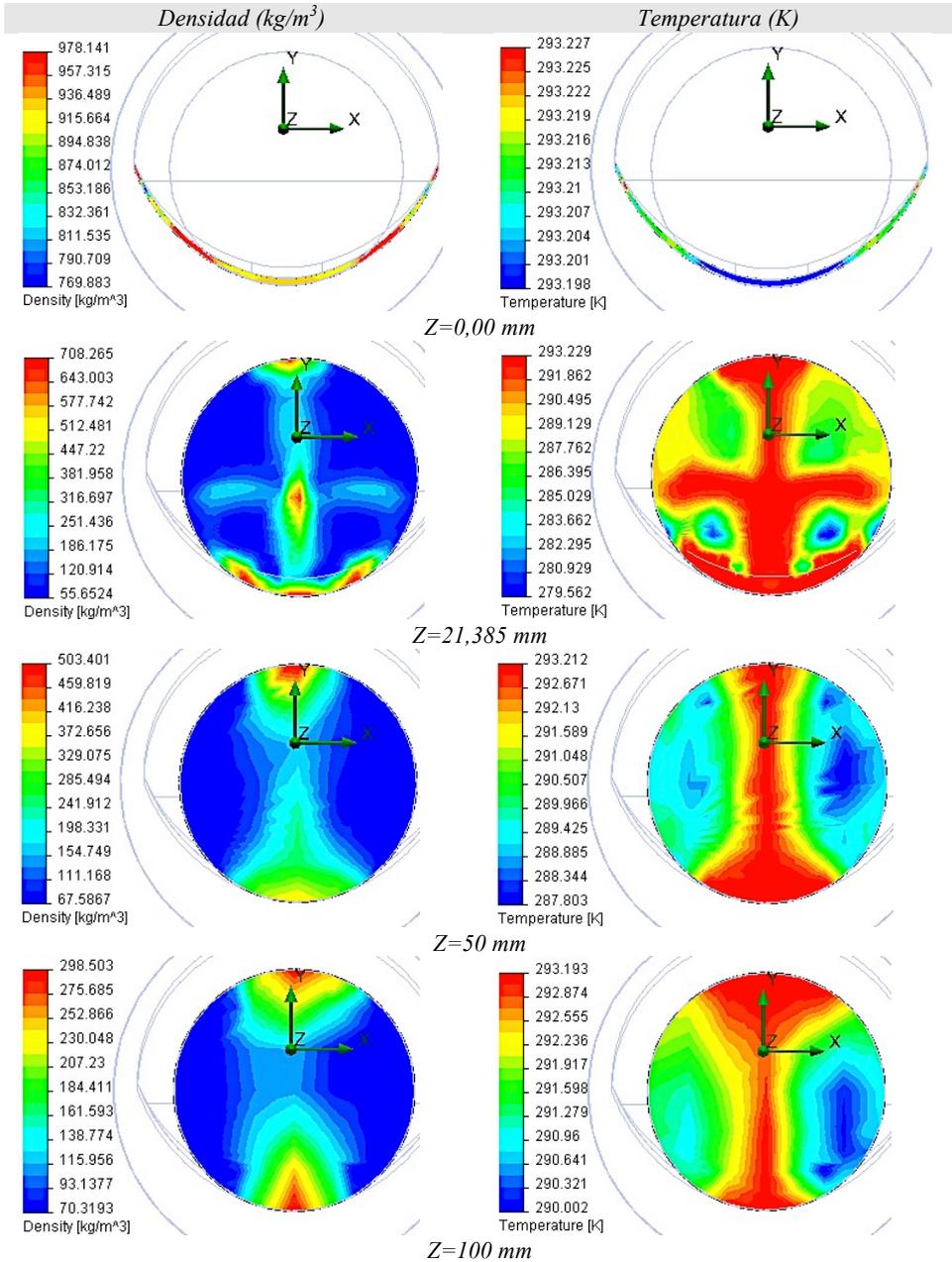


Fig. 3.9.- Mapa de isóneas secciones transversales VA $h=3\text{mm}$, $P=20\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Densidad y Temperatura del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

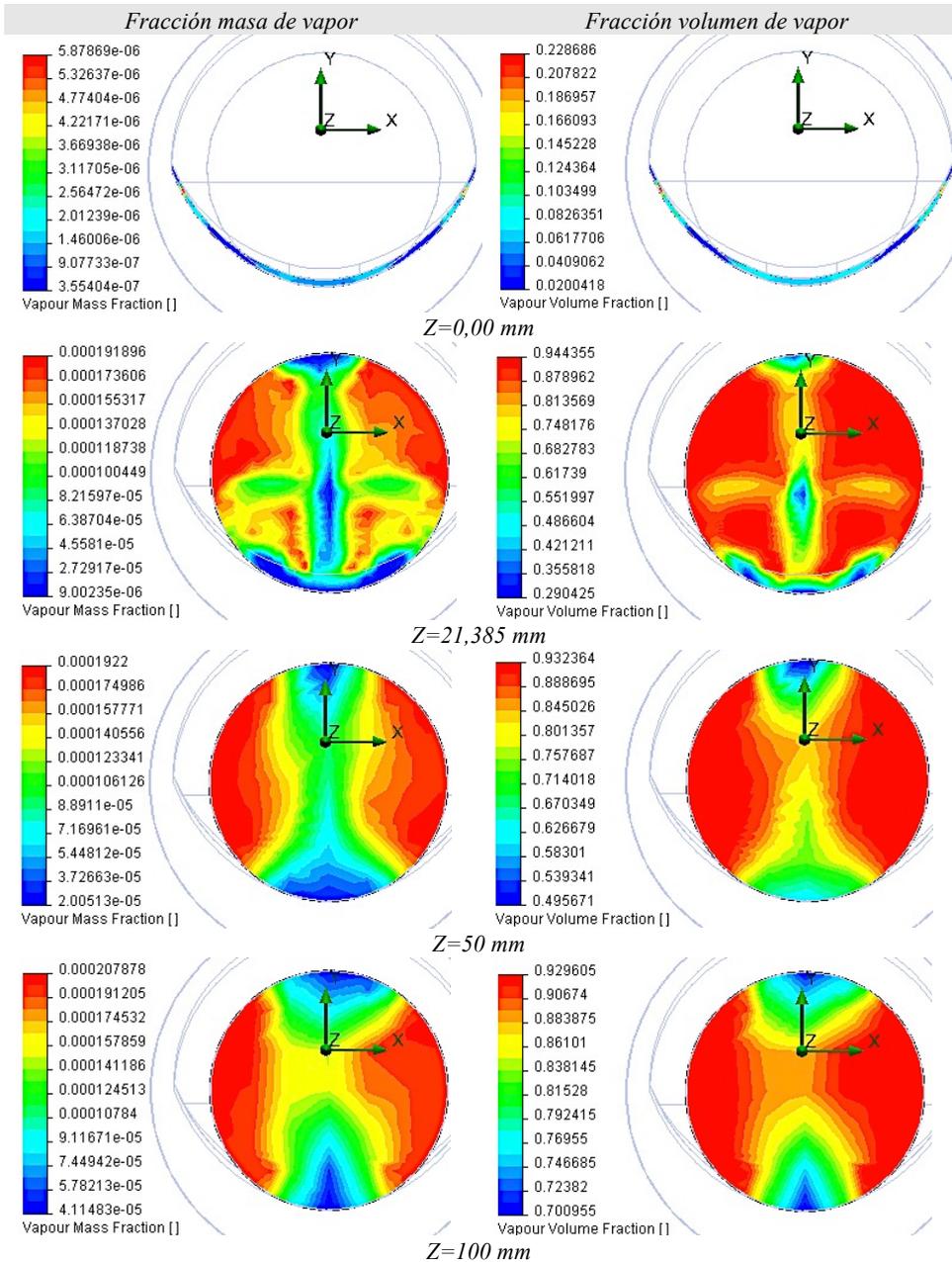


Fig. 3.10.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=3\text{mm}$, $P=20\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Fracción Masa y Volumen de vapor del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

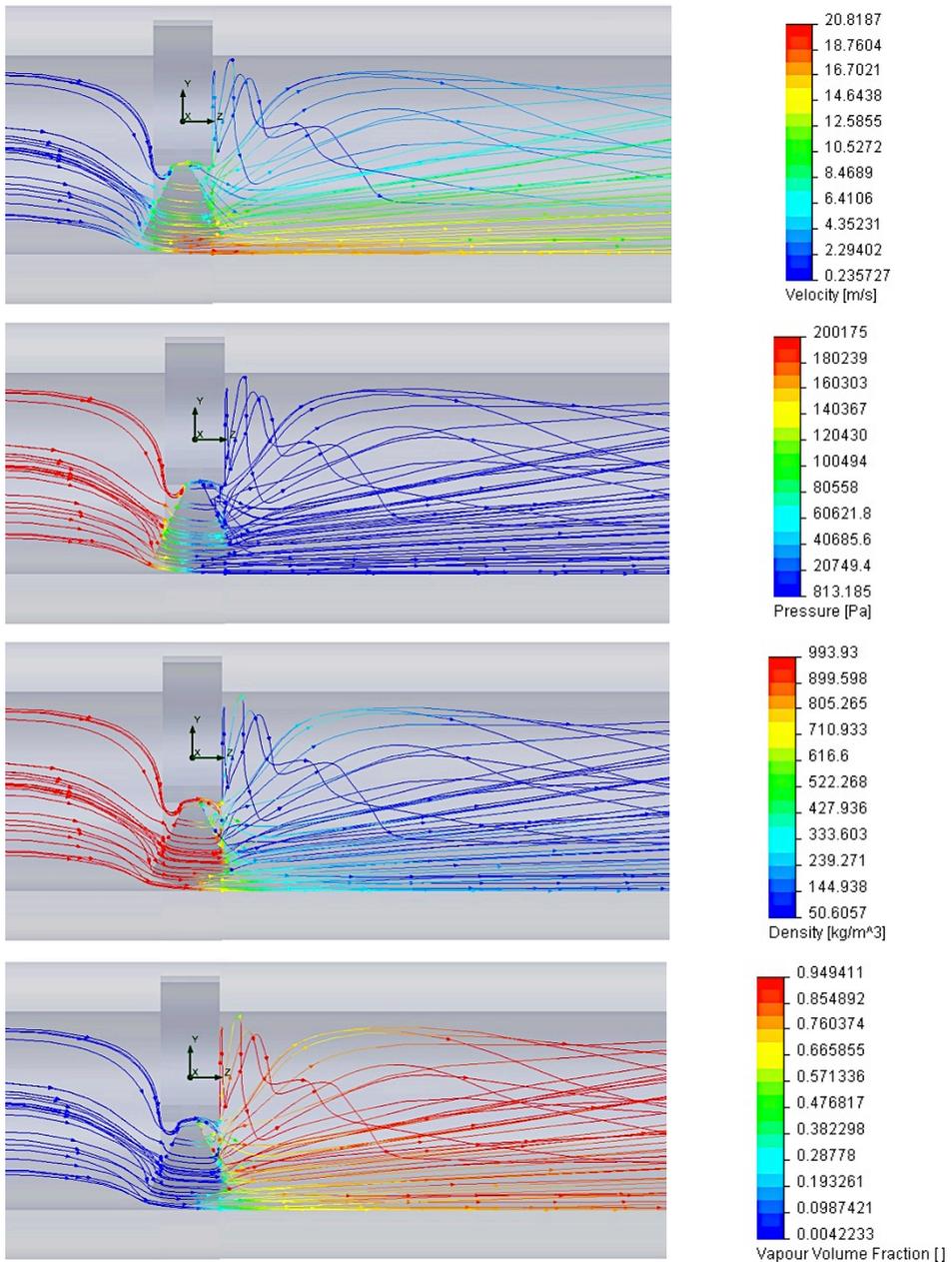


Fig. 3.11.- Líneas de corriente sección longitudinal central VA $h=3\text{mm}$, $P=20\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión, Densidad y Facción Volumen de vapor del agua.

3.2.2.- VA. Abertura $h=3\text{ mm}$, $P=40\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

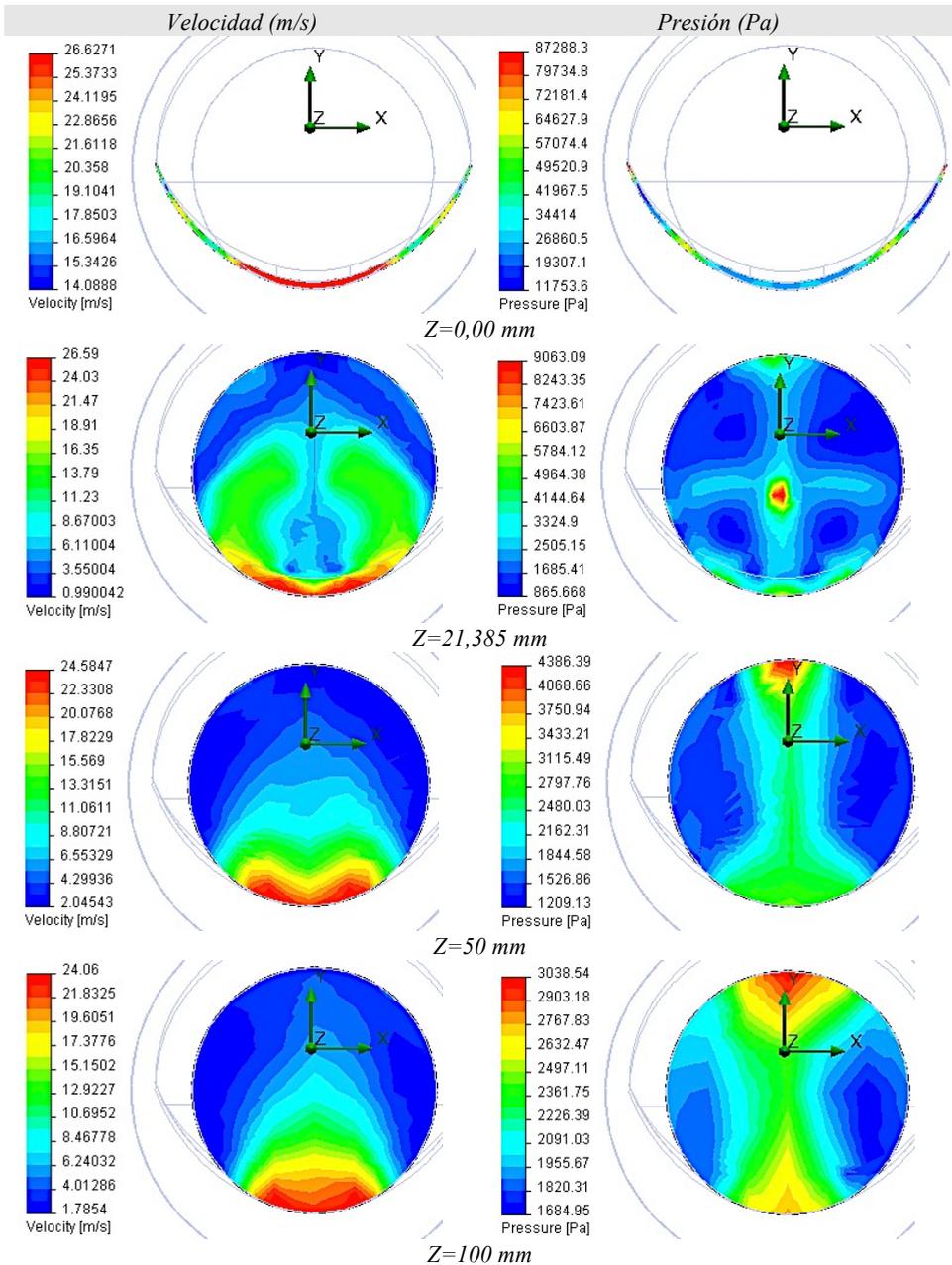


Fig. 3.12.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=3\text{ mm}$, $P=40\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$. Velocidad y Presión del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

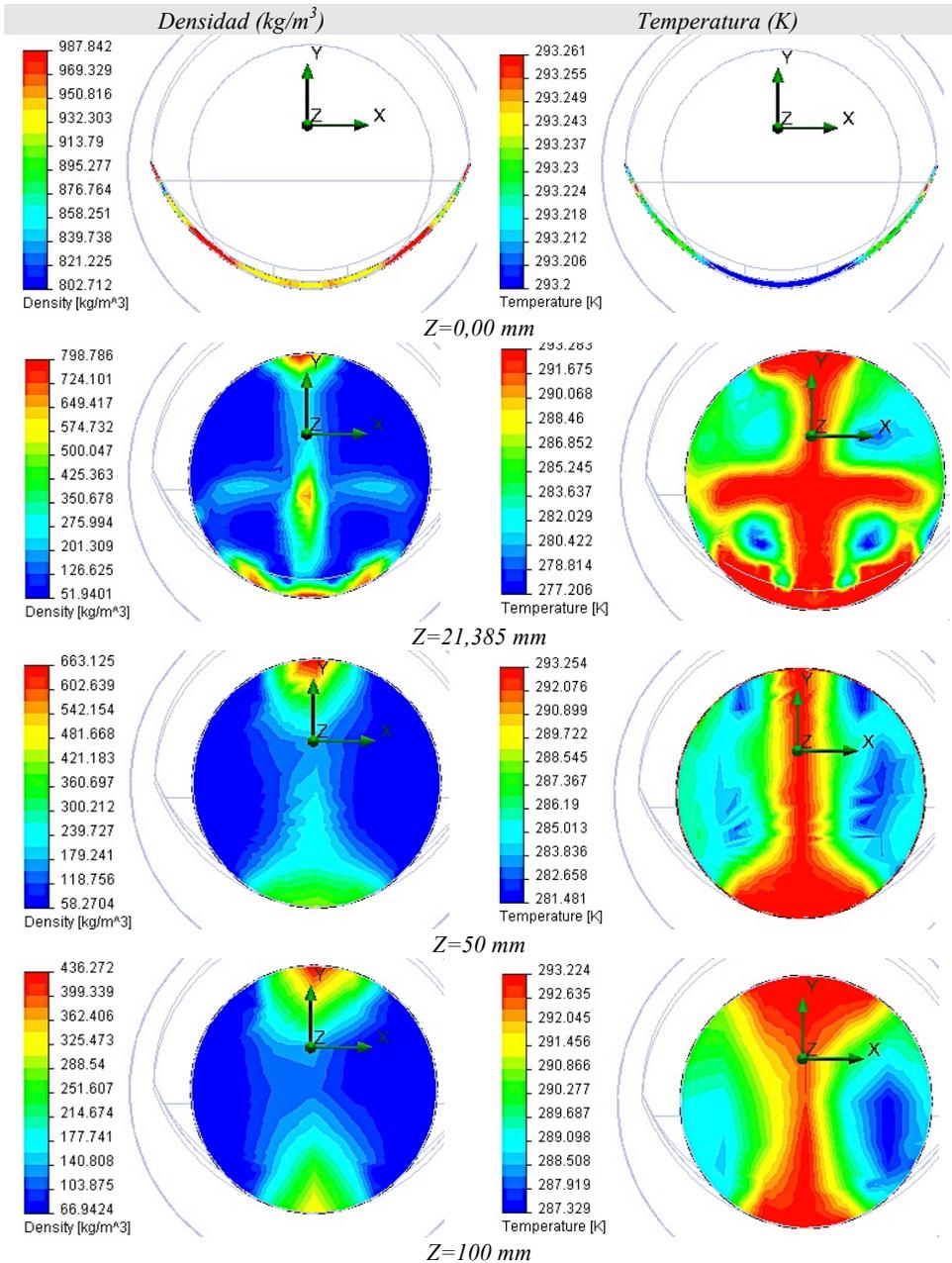


Fig. 3.13.- Líneas de corriente sección longitudinal central VA $h=3\text{mm}$, $P=40\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Densidad y Temperatura del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

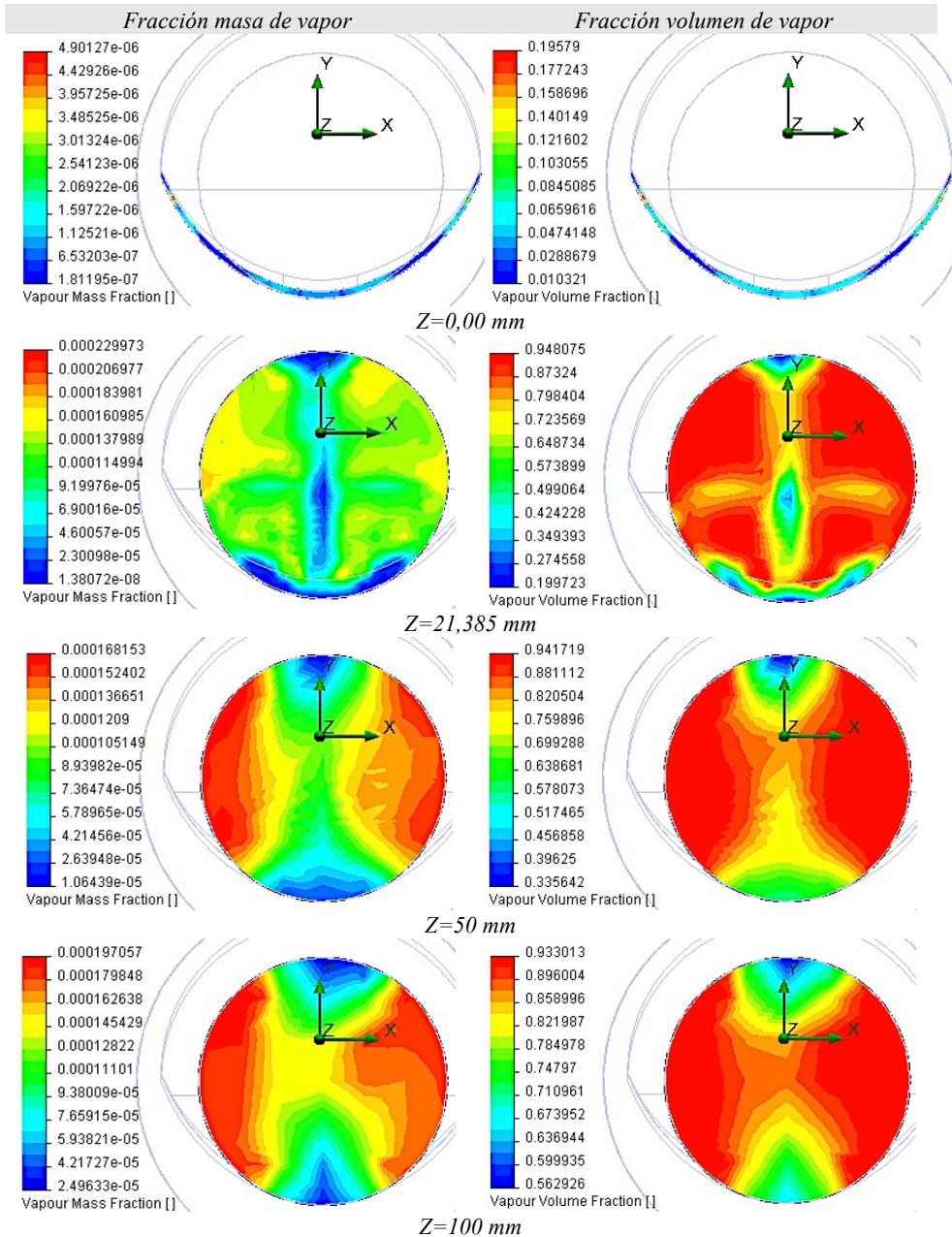


Fig. 3.14.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=3\text{mm}$, $P=40\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Fracción Masa y Volumen de vapor del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

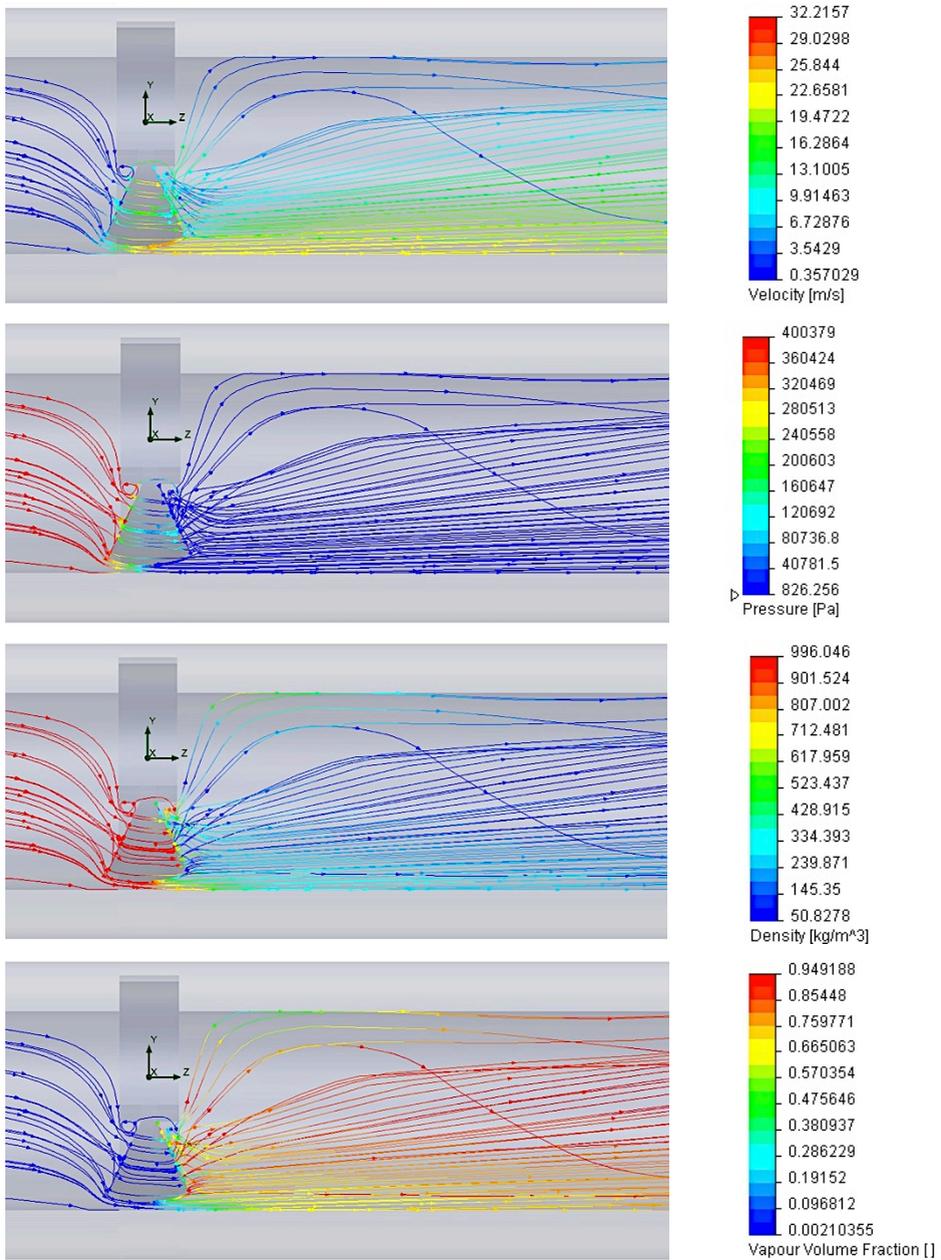


Fig. 3.15.- Líneas de corriente sección longitudinal central VA $h=3\text{mm}$, $P=40\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión, Densidad y Facción Volumen de vapor del agua.

3.2.3.- VA. Abertura $h=3\text{ mm}$, $P=60\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

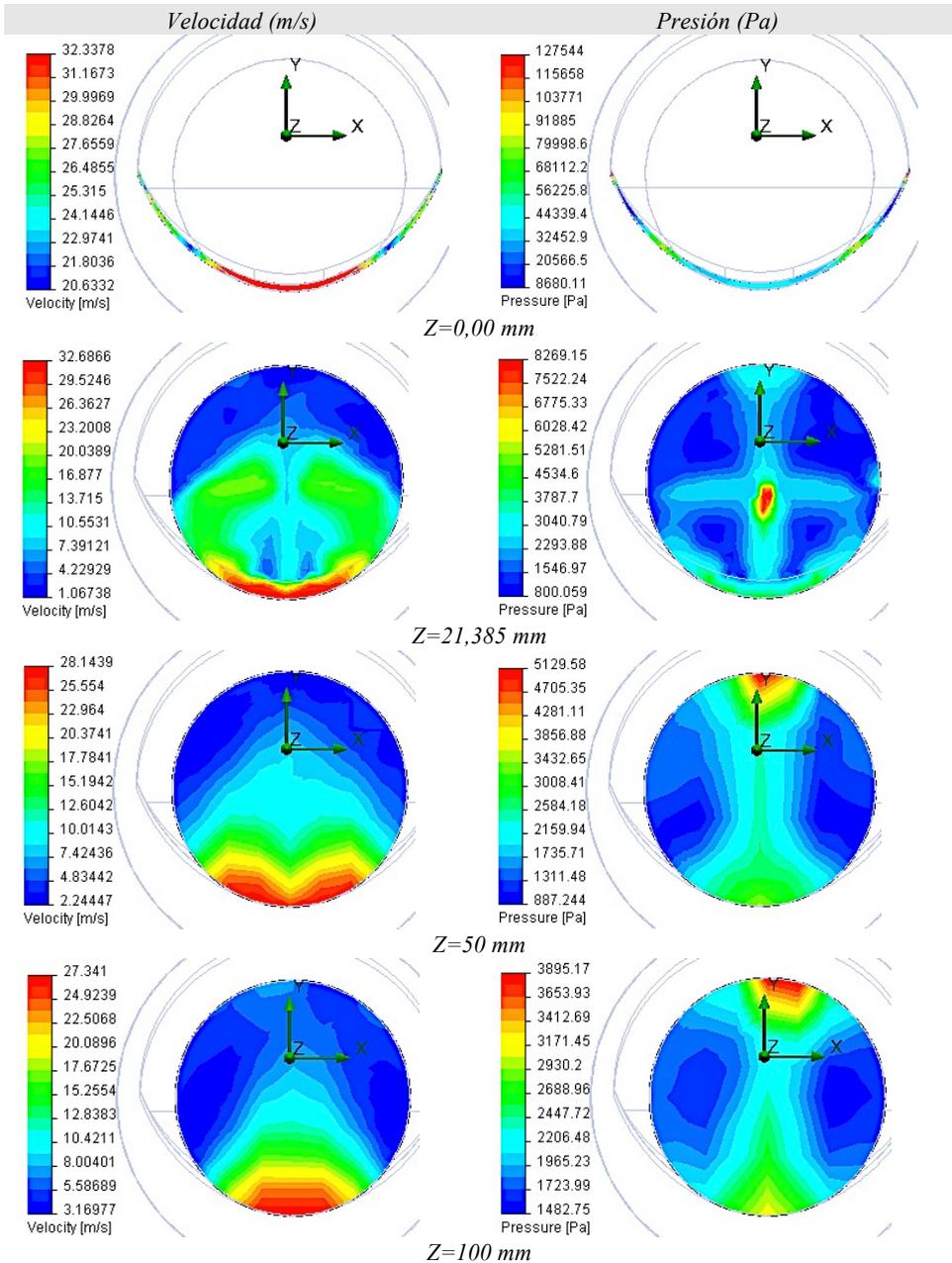


Fig. 3.16.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=3\text{ mm}$, $P=60\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$ Velocidad y Presión del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

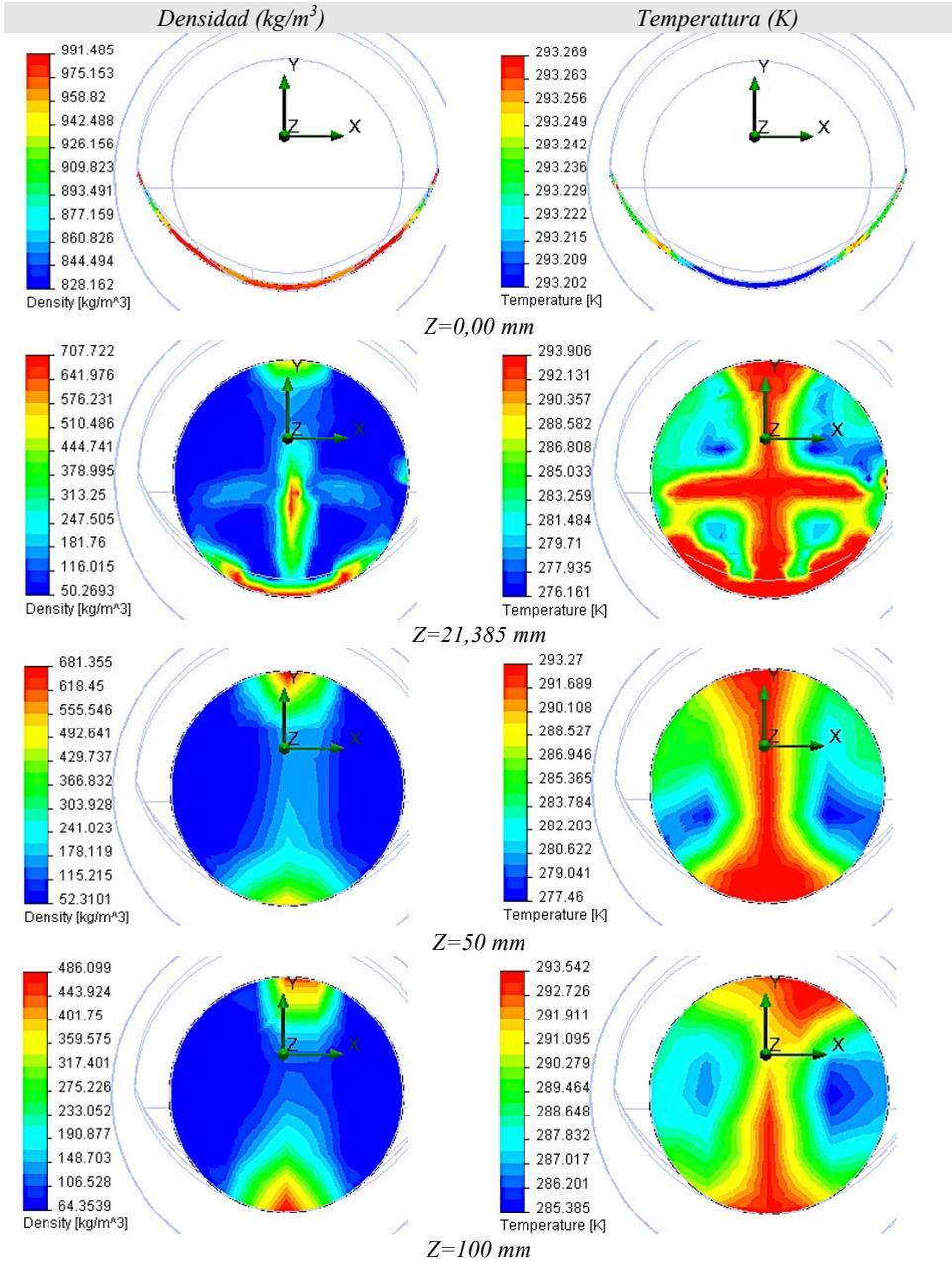


Fig. 3.17.- Mapa de isolíneas secciones transversales VA $h=3\text{mm}$, $P=60\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$ Densidad y Temperatura del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

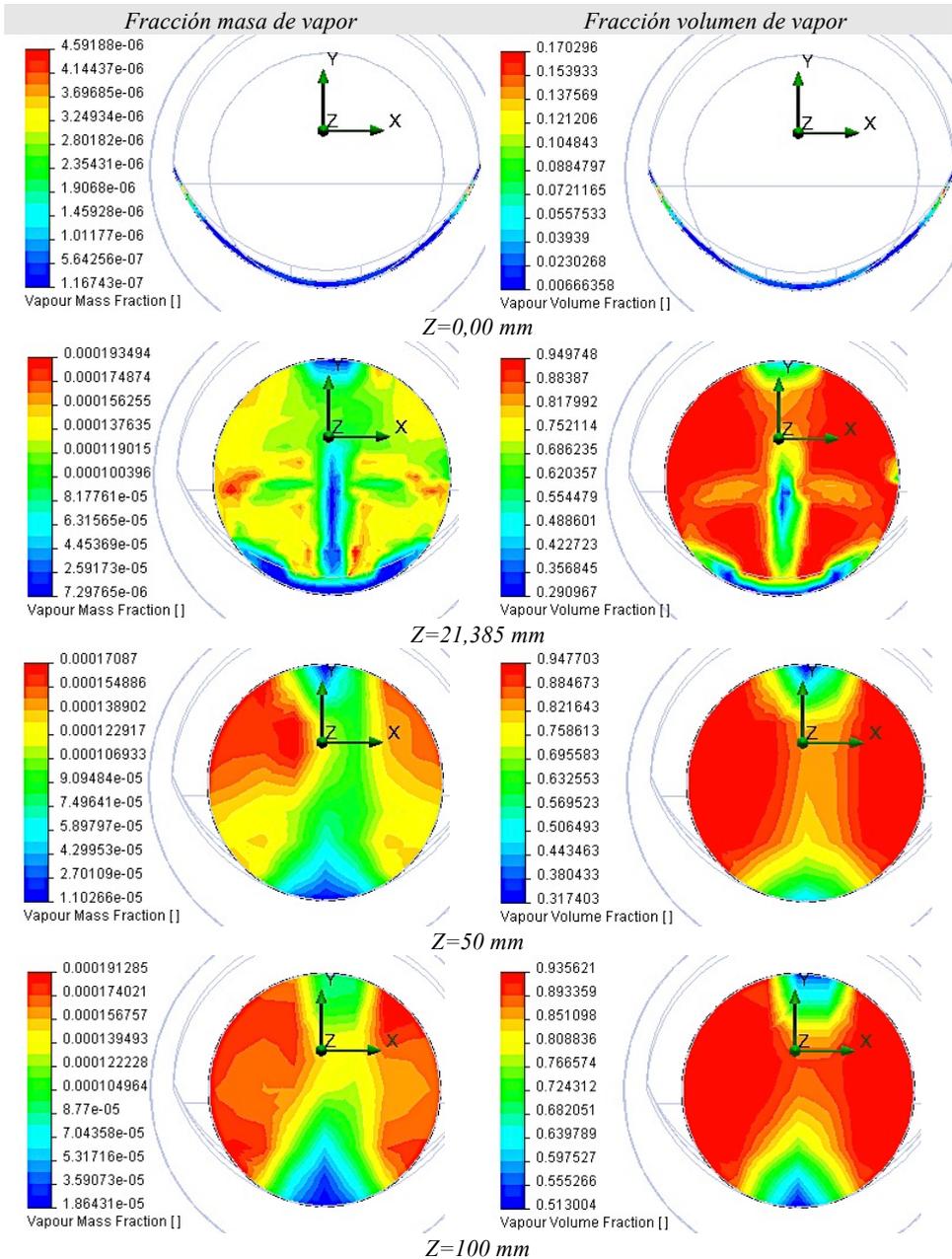


Fig. 3.18.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=3\text{mm}$, $P=60\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Fracción Masa y Volumen de vapor del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

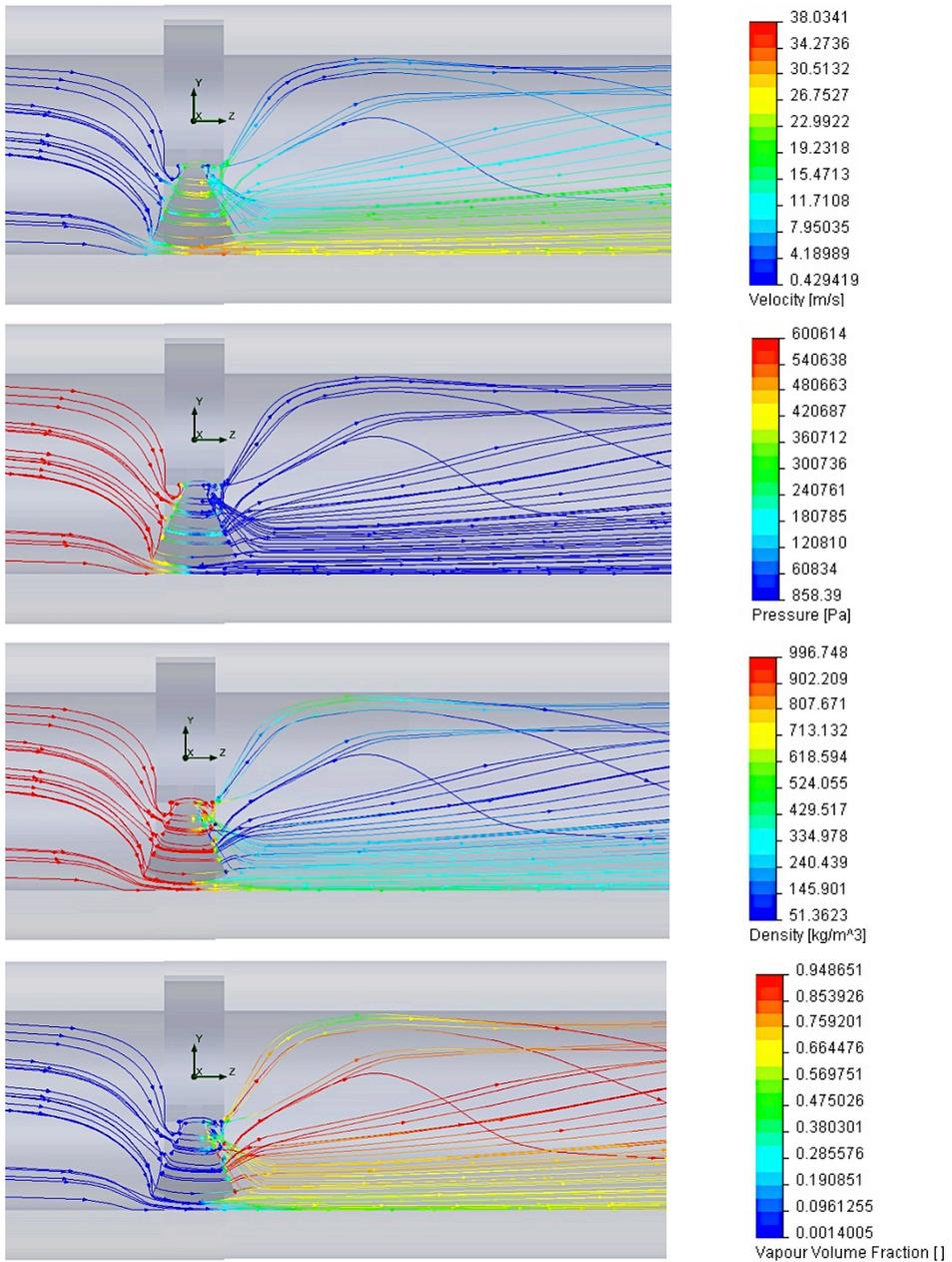


Fig. 3.19.- Líneas de corriente sección longitudinal central VA $h=3\text{mm}$, $P=60\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión, Densidad y Facción Volumen de vapor del agua.

3.2.4.- VA. Abertura $h=3\text{ mm}$, $P=120\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

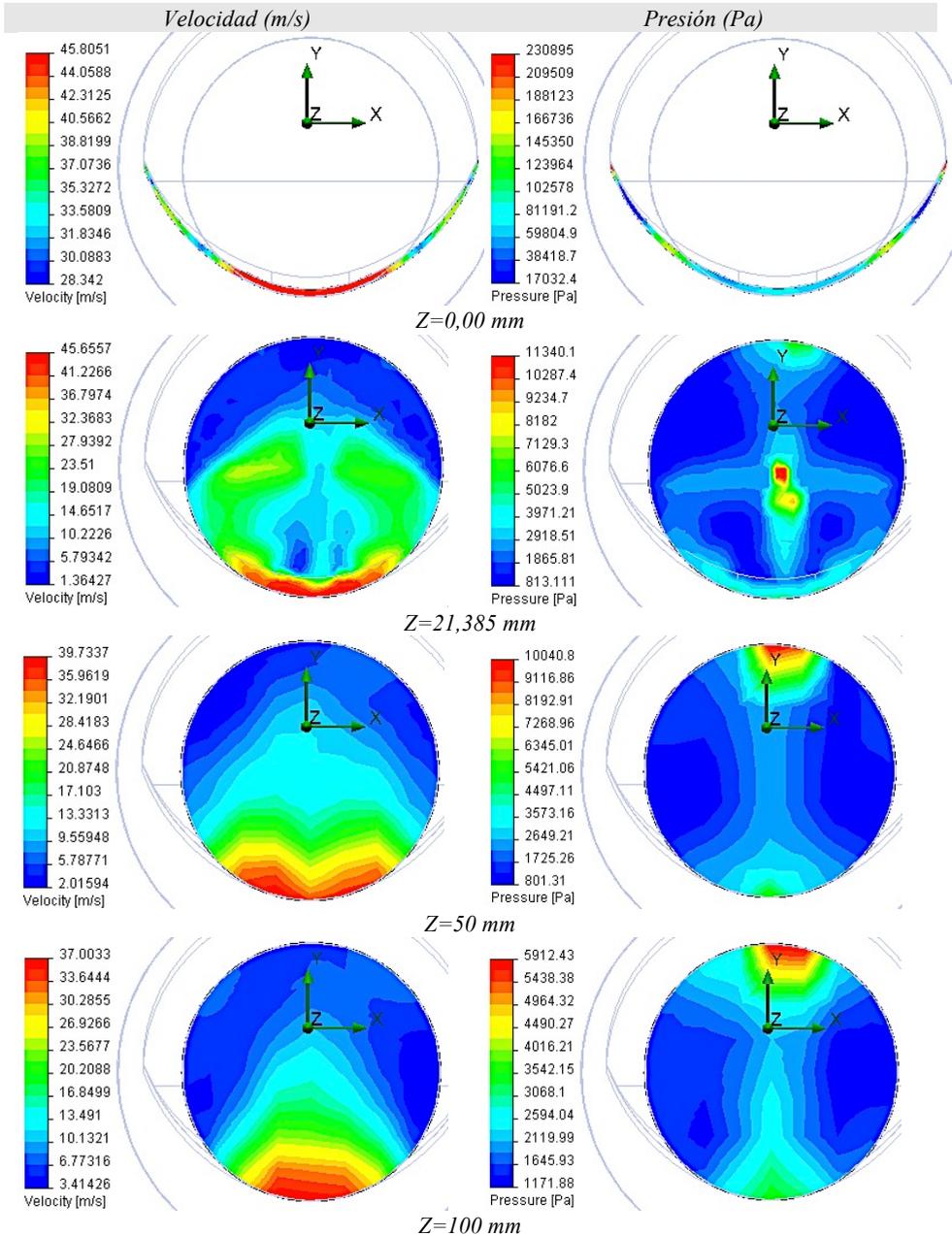


Fig. 3.20.- Mapa de isolíneas secciones transversales VA $h=3\text{ mm}$, $P=120\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$. Velocidad y Presión del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

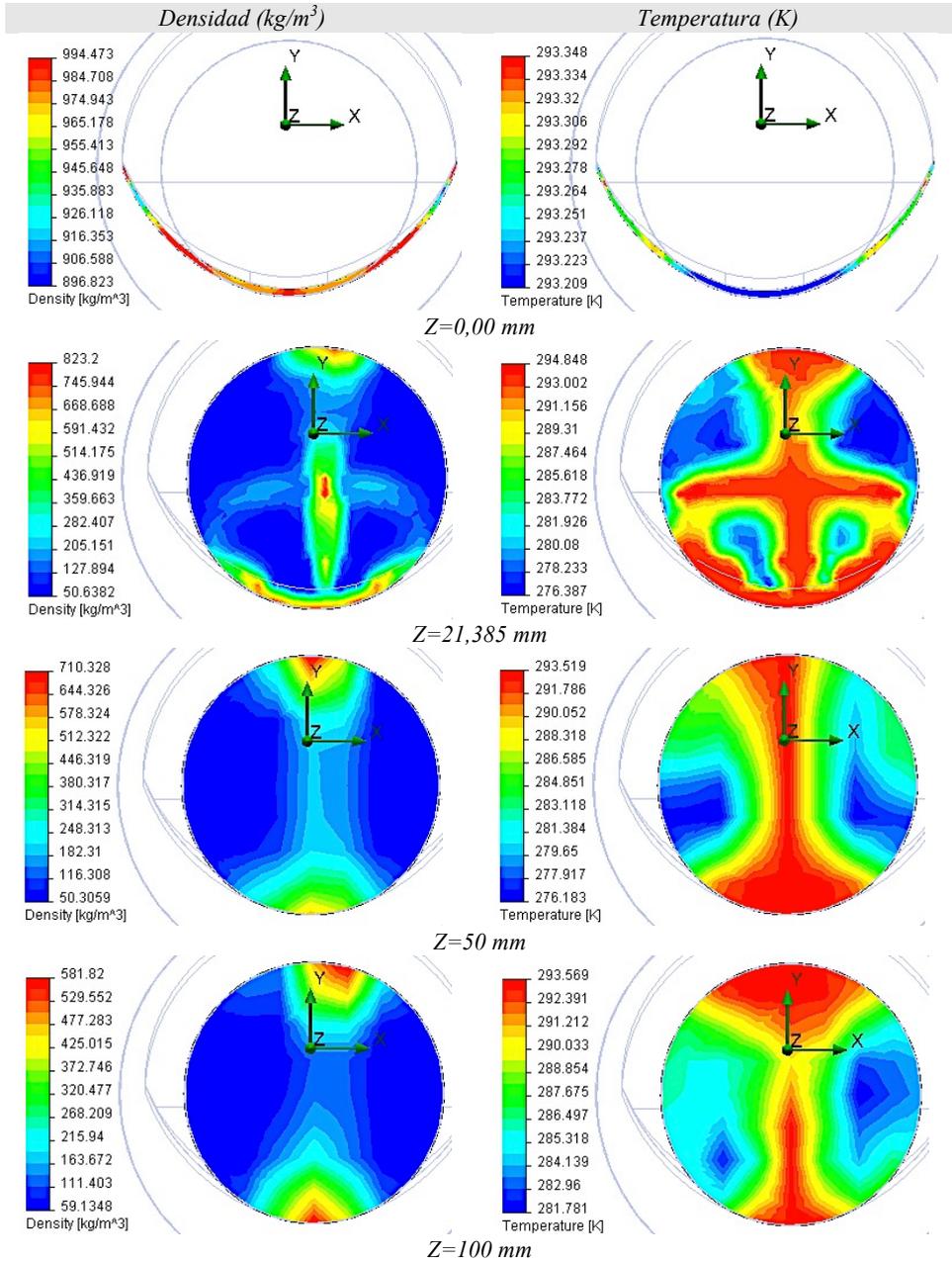


Fig. 3.21.- Mapa de isolas secciones transversales VA $h=3\text{mm}$, $P=120\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Densidad y Temperatura del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

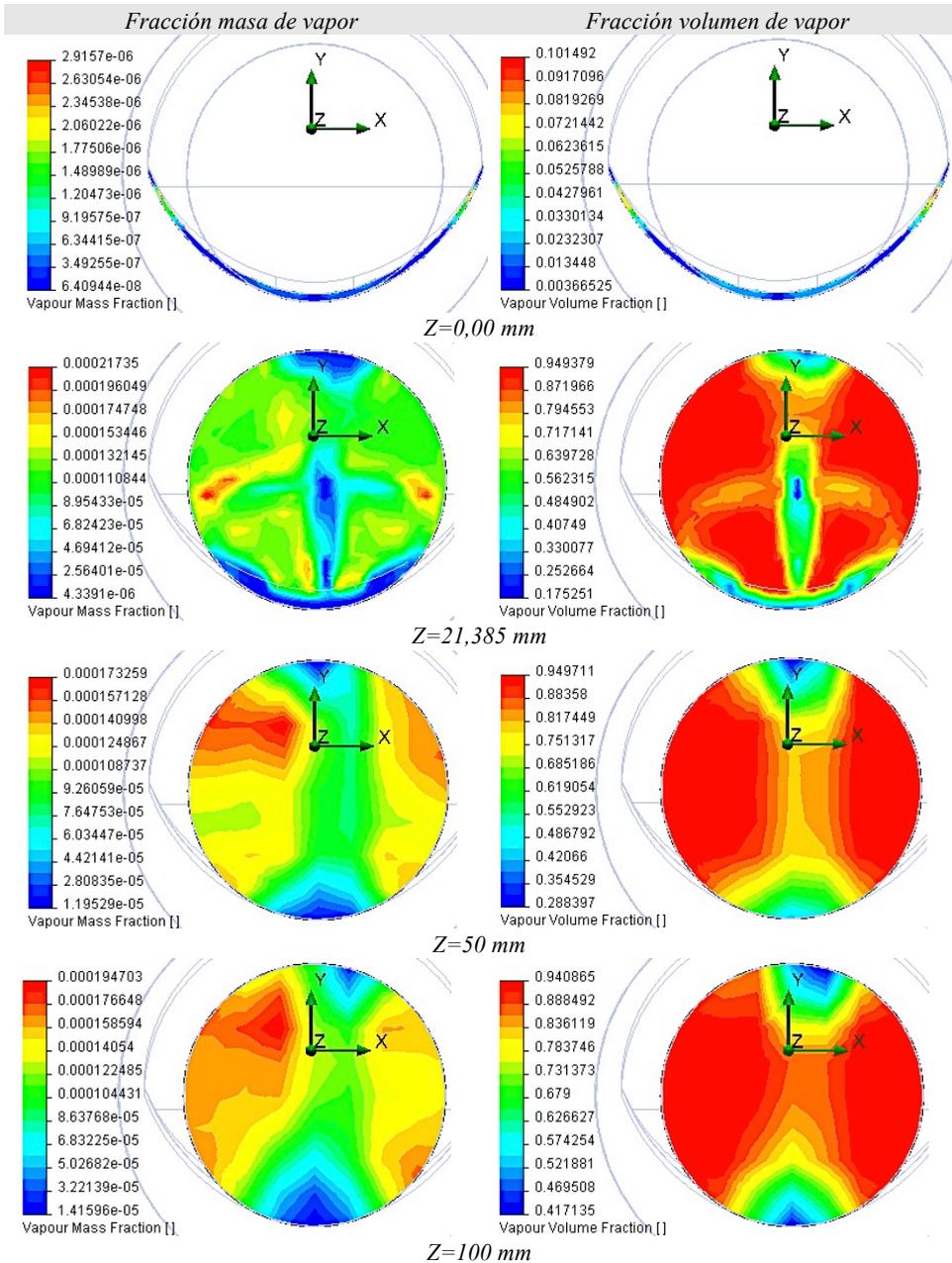


Fig. 3.22.- Mapa de isóneas secciones transversales VA $h=3\text{mm}$, $P=120\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Fracción Masa y Volumen de vapor del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100mm.

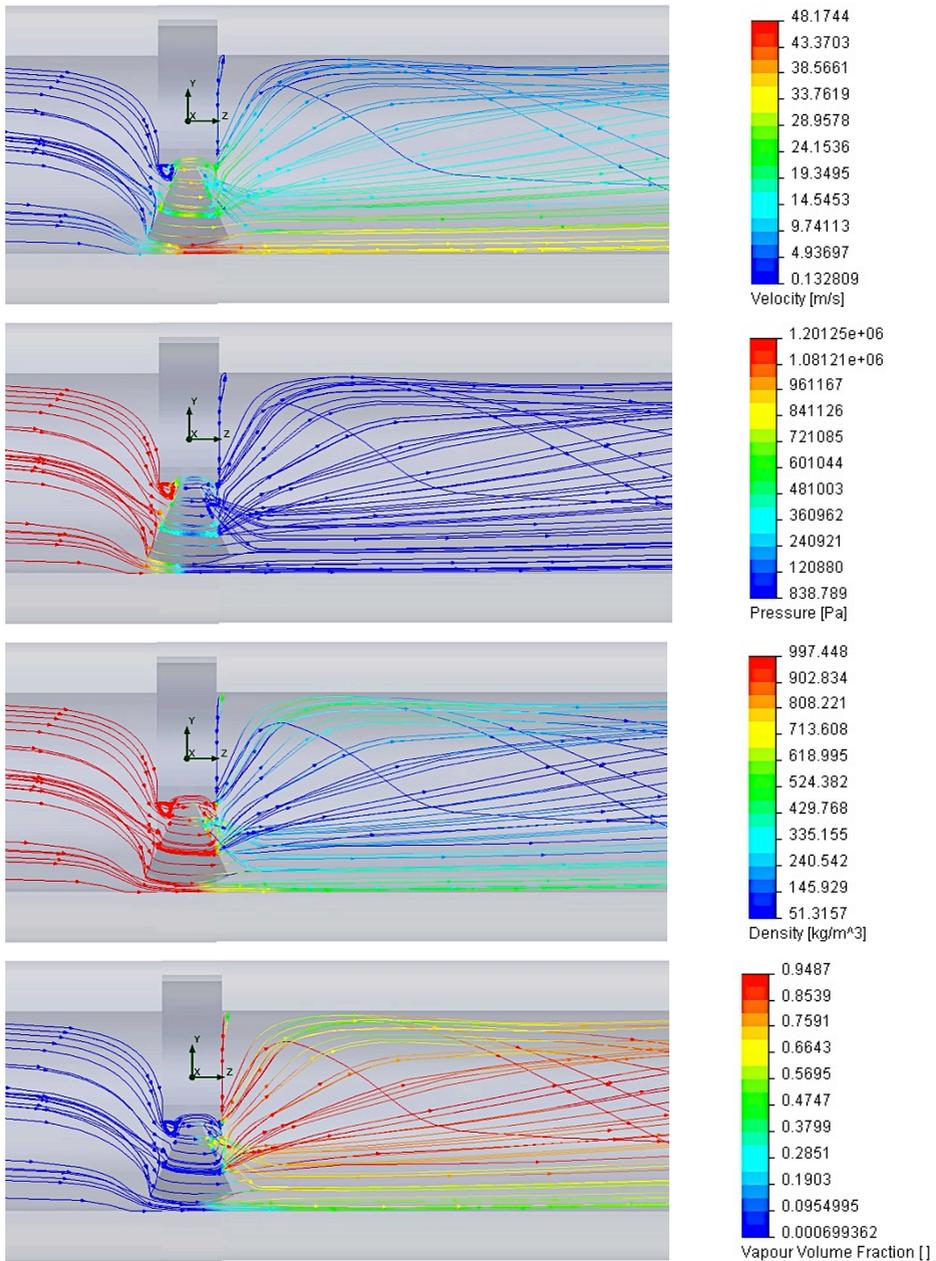


Fig. 3.23.- Líneas de corriente sección longitudinal central VA $h=3\text{mm}$, $P=120\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión, Densidad y Facción Volumen de vapor del agua.

3.2.5.- VA. Resumen para $h=3\text{ mm}$, $P=20, 40, 60$ y 120 mca , $Q=20\text{ l/s}$.

El resumen de los resultados obtenidos de presión, densidad y temperatura respecto a la anchura de la compuerta para cada una de las series y caudal de 20 l/s para $h=3\text{ mm}$ y $z=21,385\text{ mm}$ se muestra en las *figuras 3.24; 3.25 y 3.26*.

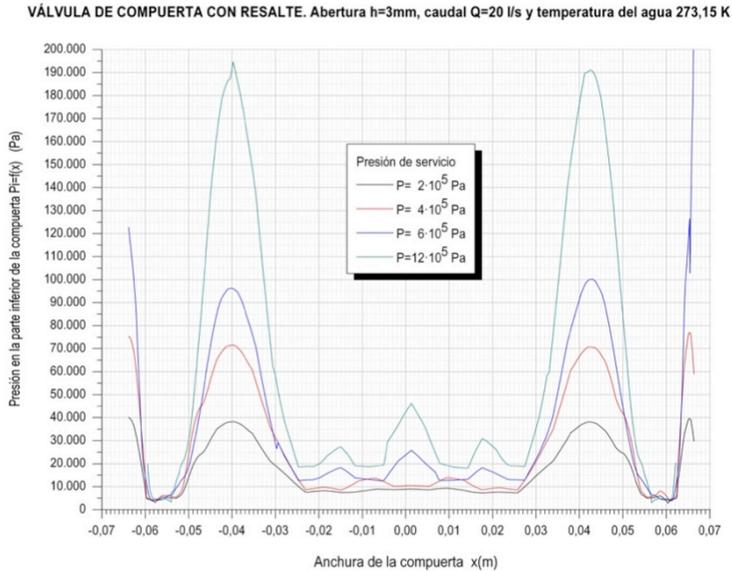


Fig. 3.24.-Correlación Presión vs. Anchura compuerta. Altura $h=3\text{ mm}$, $z=21,385\text{ mm}$.

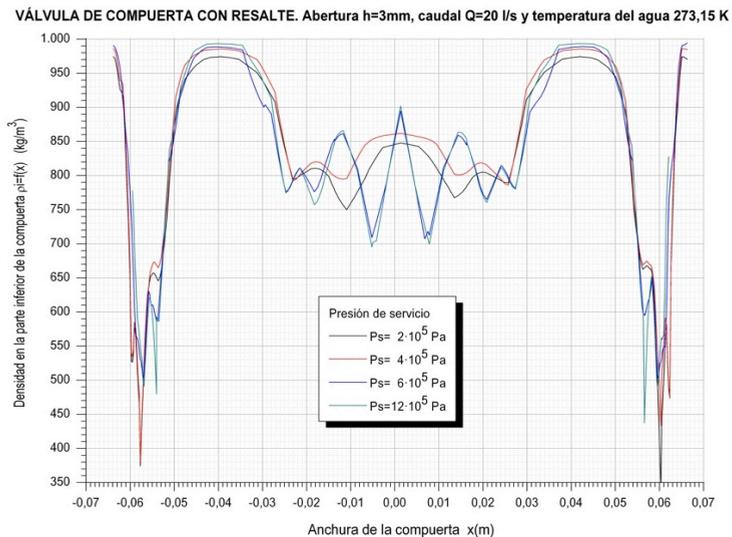


Fig. 3.25.-Correlación Densidad vs. Anchura compuerta. Altura $h=3\text{ mm}$, $z=21,385\text{ mm}$.

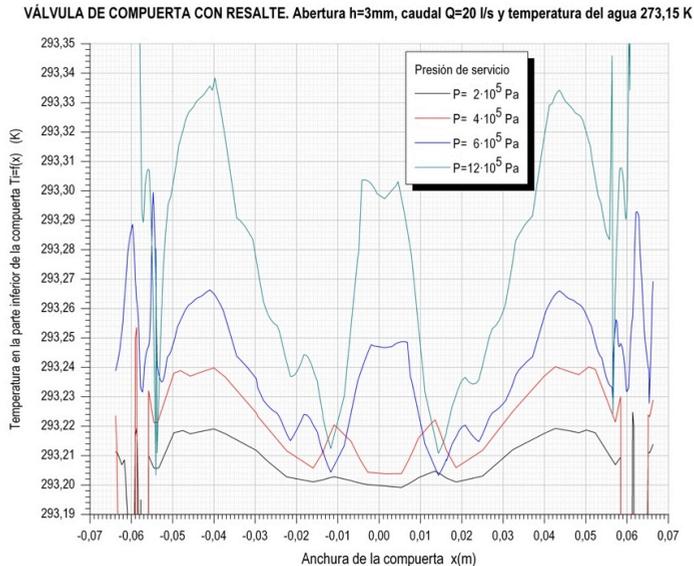


Fig. 3.26.-Correlación T vs. Anchura compuerta. Altura $h=3\text{mm}$, $z=21,385\text{mm}$.

La valoración del resumen de los resultados obtenidos en las *figuras 3.24; 3.25 y 3.26*, es la siguiente:

1. Las curvas de Presión, Densidad y Temperatura vs. Anchura de la compuerta, para cada una de las series de presión $P=20, 40, 60$ y 120 mca para un caudal de $Q=20\text{ l/s}$, son semejantes en su trazado aunque variables en su cuantificación (*figuras 3.24; 3.25 y 3.26*).
2. Los valores máximos de presión, densidad y temperatura se encuentran localizados a una cota $x=\pm 40\text{ mm}$. Y los valores mínimos se localizan a una cota aproximada de $x=\pm 10\text{ mm}$ (*figura 3.24*).
3. A partir de los resultados del apartado anterior (1) la velocidad máxima del fluido no se encuentra en la parte central de la tobera de la compuerta ($x=0$) sino desplazada donde la presión es mínima ($x=\pm 10\text{ mm}$). Y lo mismo ocurre para la velocidad mínima del fluido localizada donde la presión es máxima ($x=\pm 40\text{ mm}$).
4. Las velocidades máximas se concentran en el arco inferior del cuerpo de la válvula a la salida de la tobera (*figuras 3.8; 3.12; 3.16 y 3.20 para $z=21,385\text{mm}$*).
5. La variación de los valores máximos y mínimos de la densidad y de la temperatura para cada serie estudiada es relativamente muy pequeña, lo que confirma que la viscosidad cinemática del agua inicial se mantiene prácticamente constante.

3.2.6.- VA. Abertura $h=6\text{ mm}$, $P=20\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

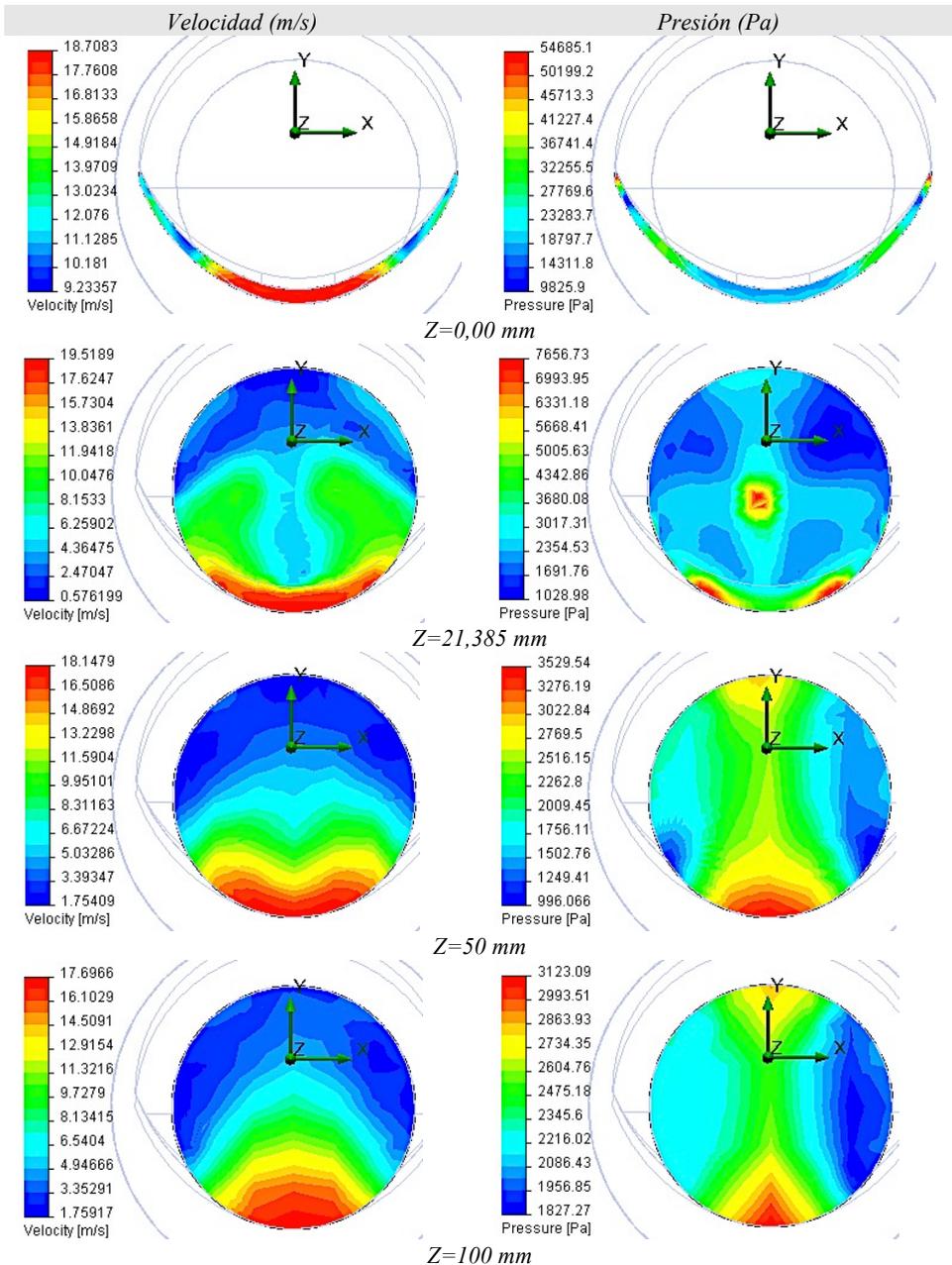


Fig. 3.27.- Mapa de isolíneas secciones transversales VA $h=6\text{ mm}$, $P=20\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$ Velocidad y Presión del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

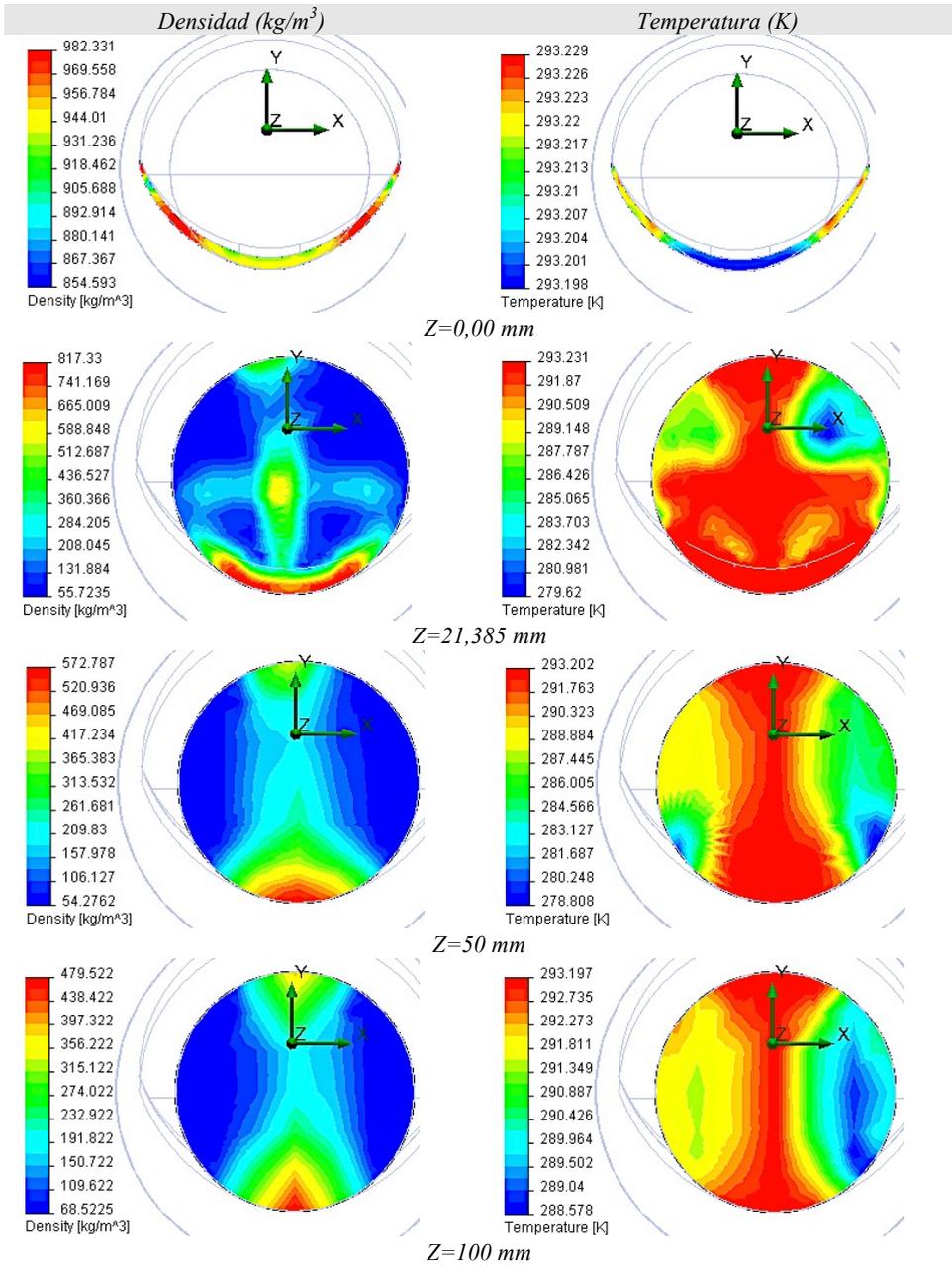


Fig. 3.28.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=6\text{mm}$, $P=20\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Densidad y Temperatura del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

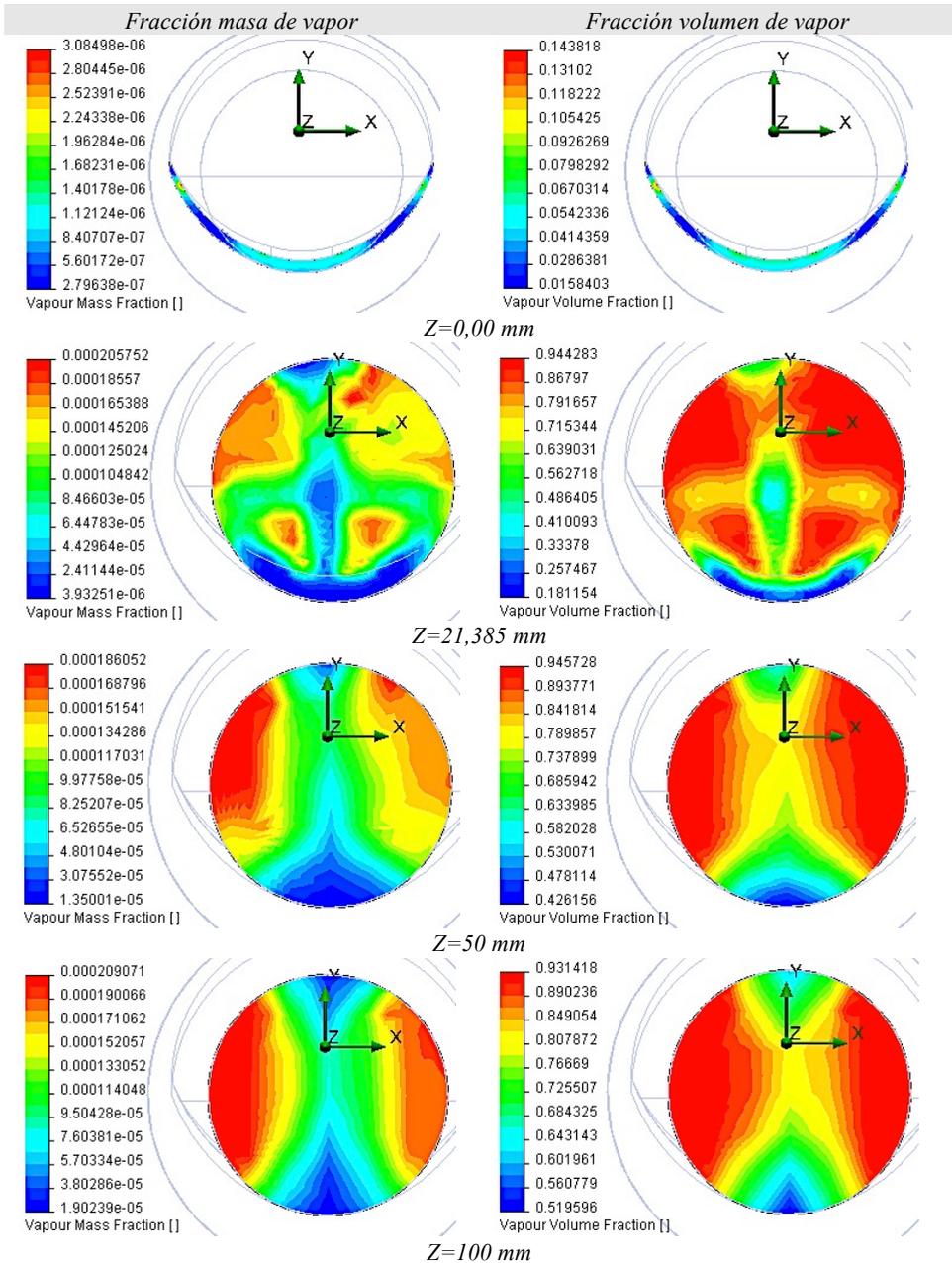


Fig. 3.29.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=6$ mm, $P=20$ mca, $Q=20$ l/s. Fracción Masa y Volumen de vapor del agua, para $Z=0; 21,385; 50$ y 100 mm.

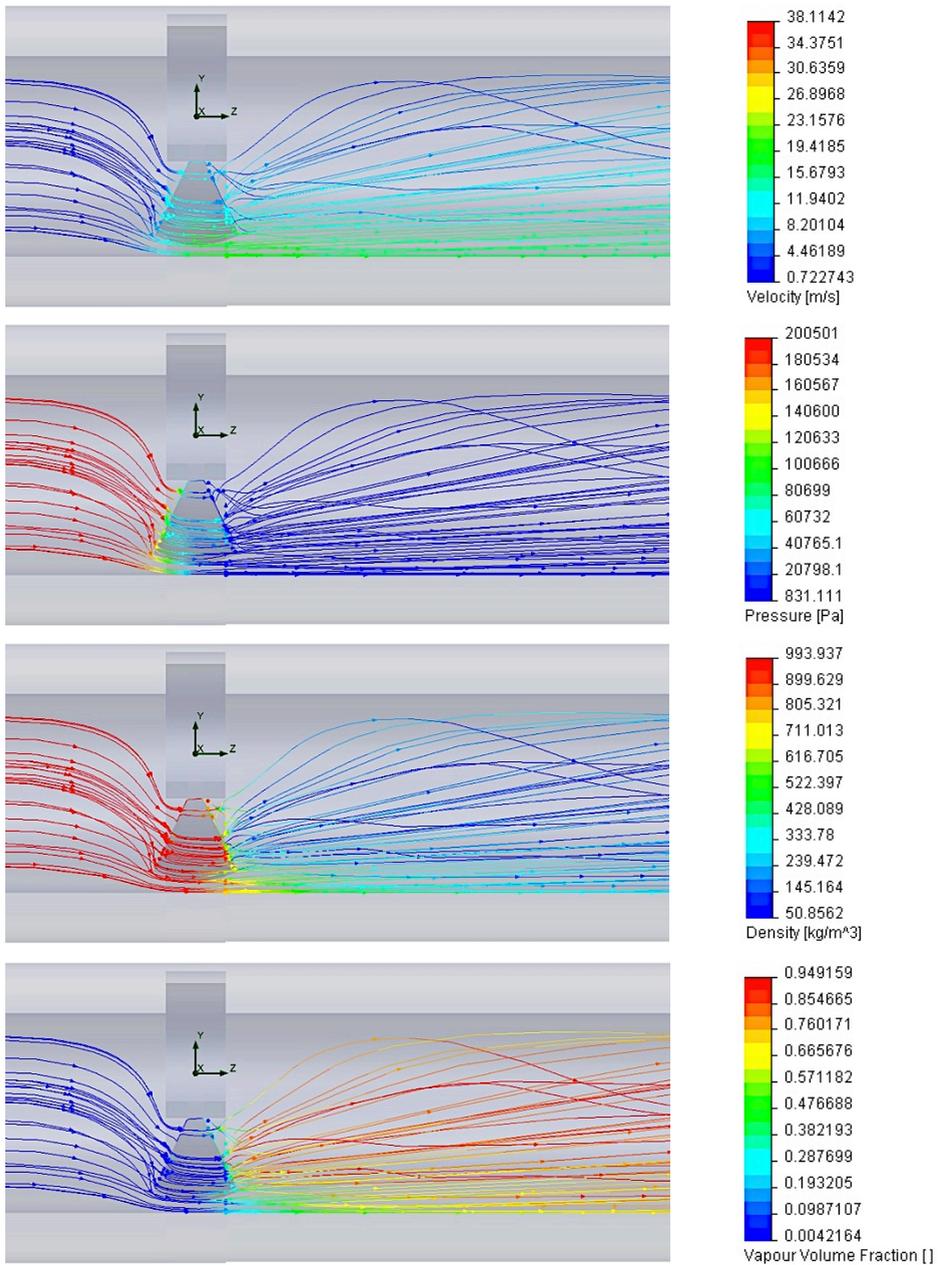


Fig. 3.30.- Líneas de corriente sección longitudinal central VA $h=6\text{mm}$, $P=20\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión, Densidad y Facción Volumen de vapor del agua.

3.2.7.- VA. Abertura $h=6\text{ mm}$, $P=40\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

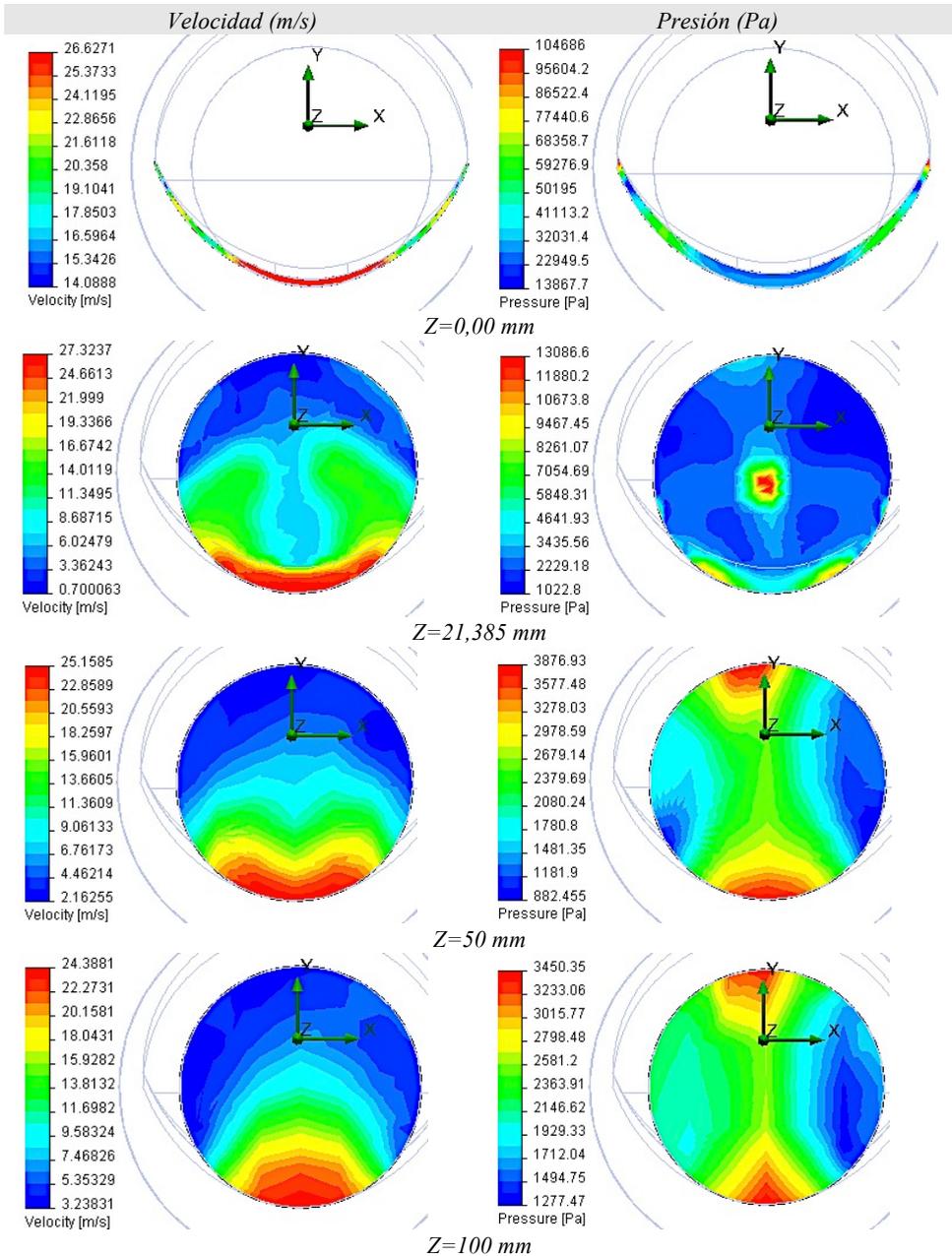


Fig. 3.31.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=6\text{ mm}$, $P=40\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$ Velocidad y Presión del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

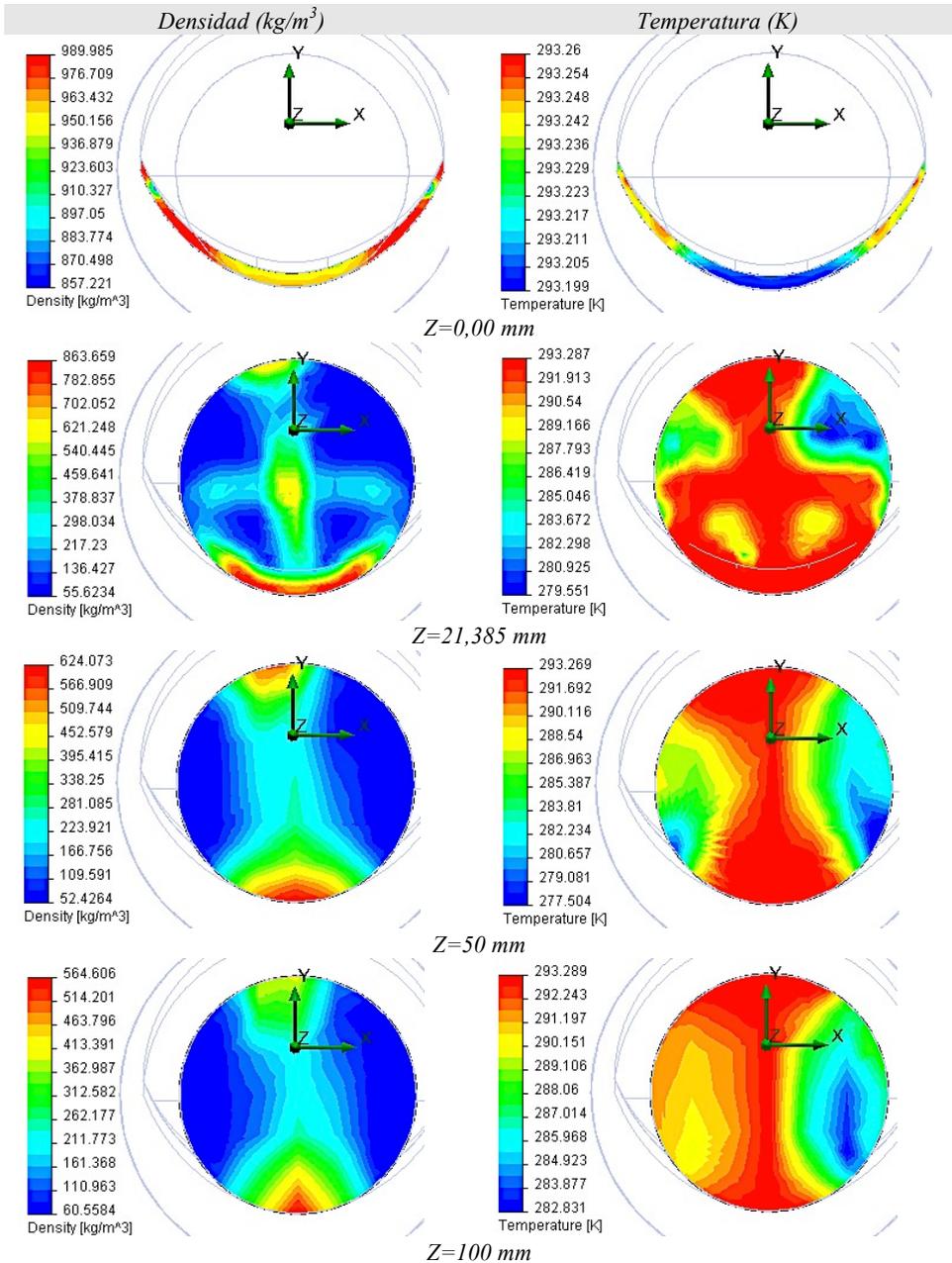


Fig. 3.32.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=6\text{mm}$, $P=40\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Densidad y Temperatura del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

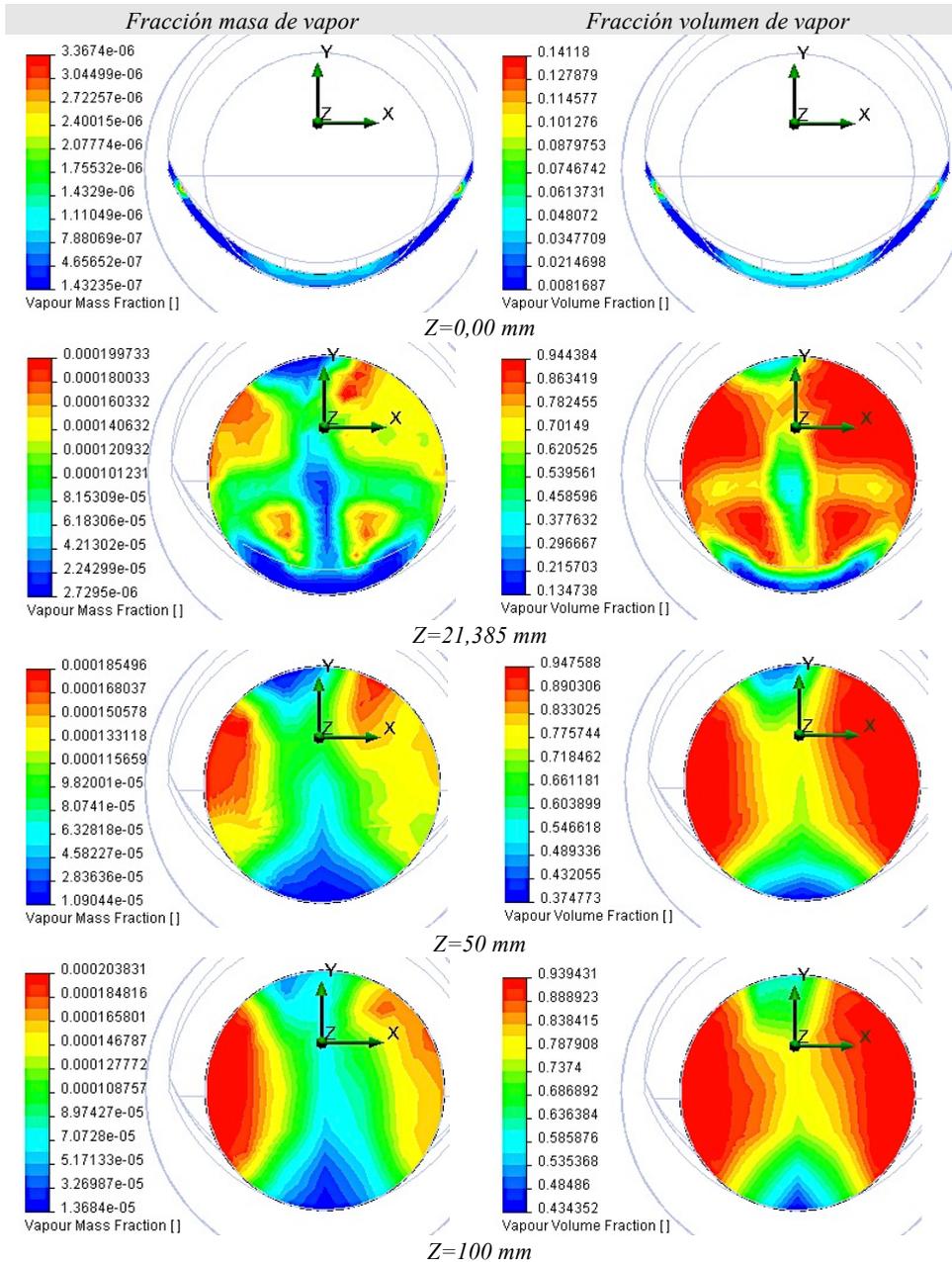


Fig. 3.33.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=6\text{mm}$, $P=40\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Fracción Masa y Volumen de vapor del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

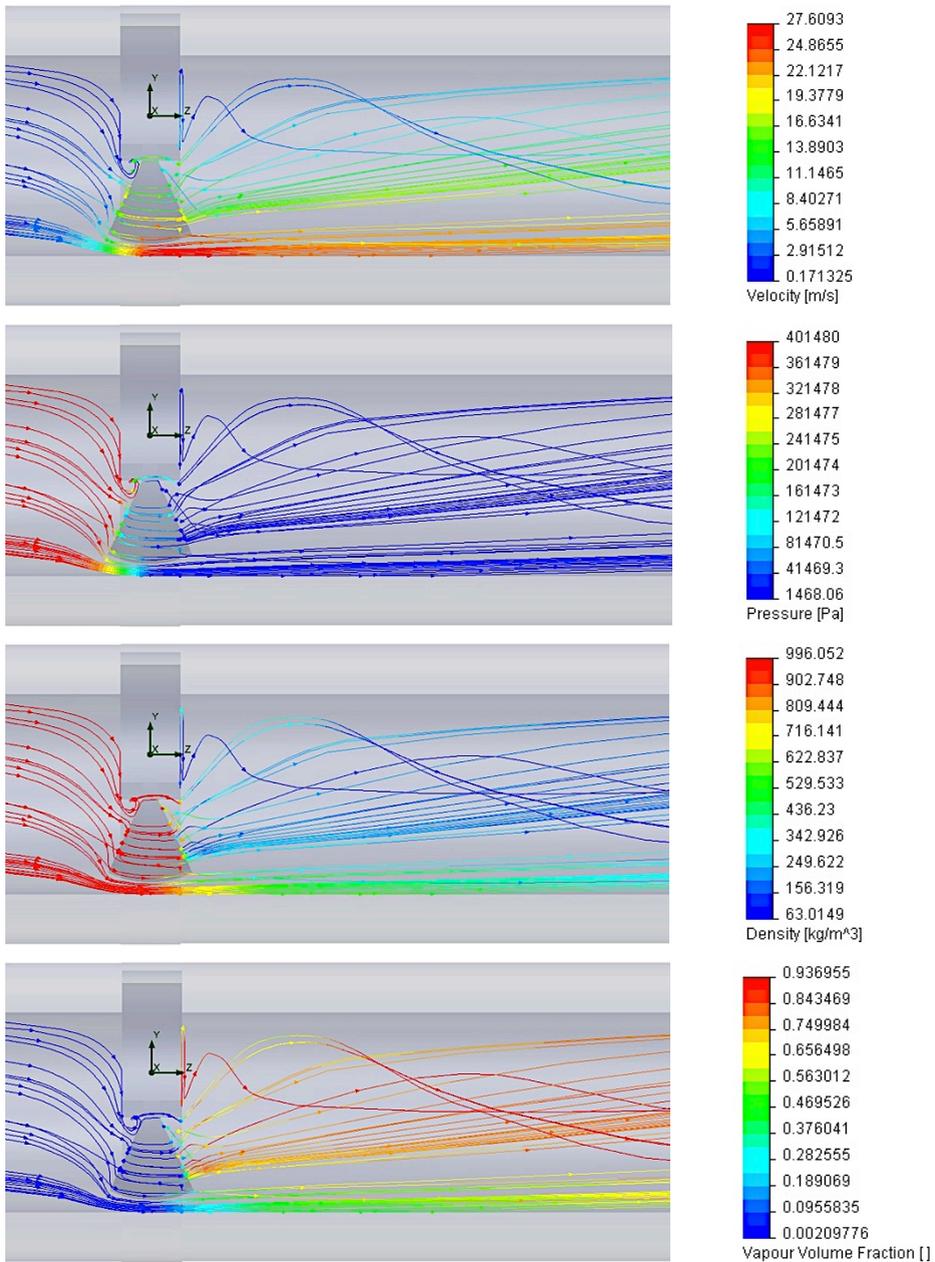


Fig. 3.34.- Líneas de corriente sección longitudinal central VA $h=6\text{mm}$, $P=40\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión, Densidad y Facción Volumen de vapor del agua.

3.2.8.- VA. Abertura $h=6\text{ mm}$, $P=60\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

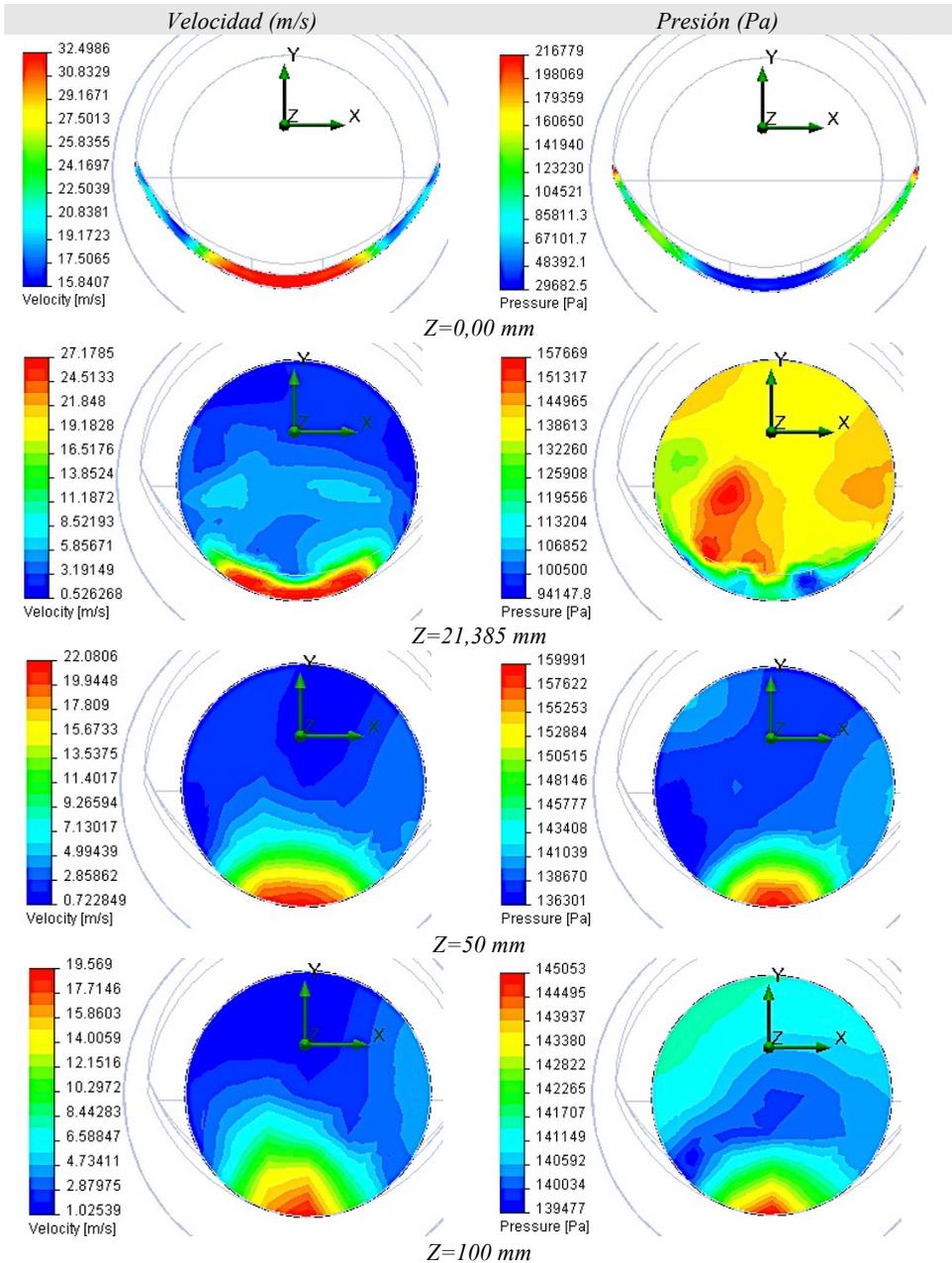


Fig. 3.35.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=6\text{ mm}$, $P=60\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$. Velocidad y Presión del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

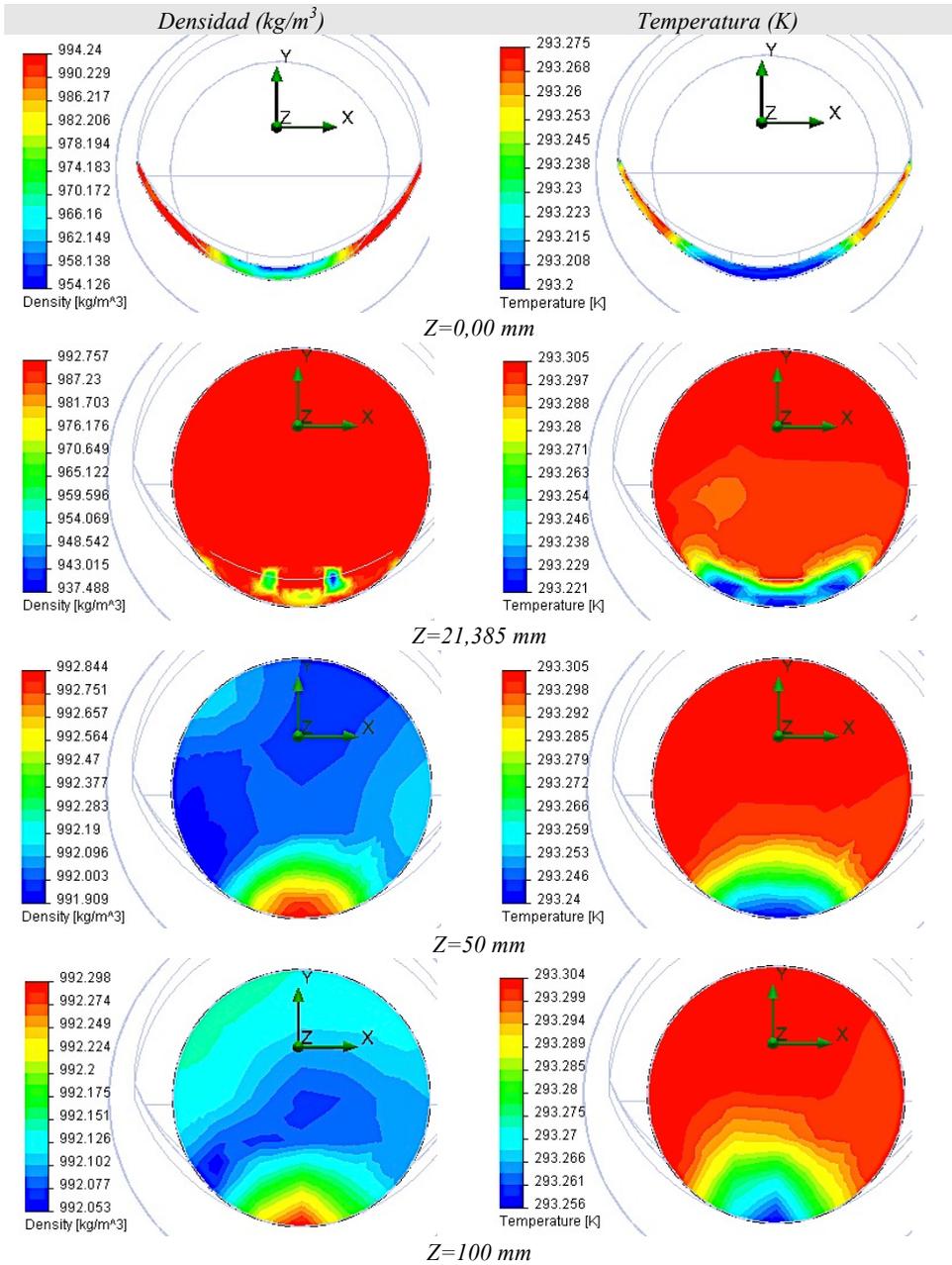


Fig. 3.36.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=6\text{mm}$, $P=60\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Densidad y Temperatura del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

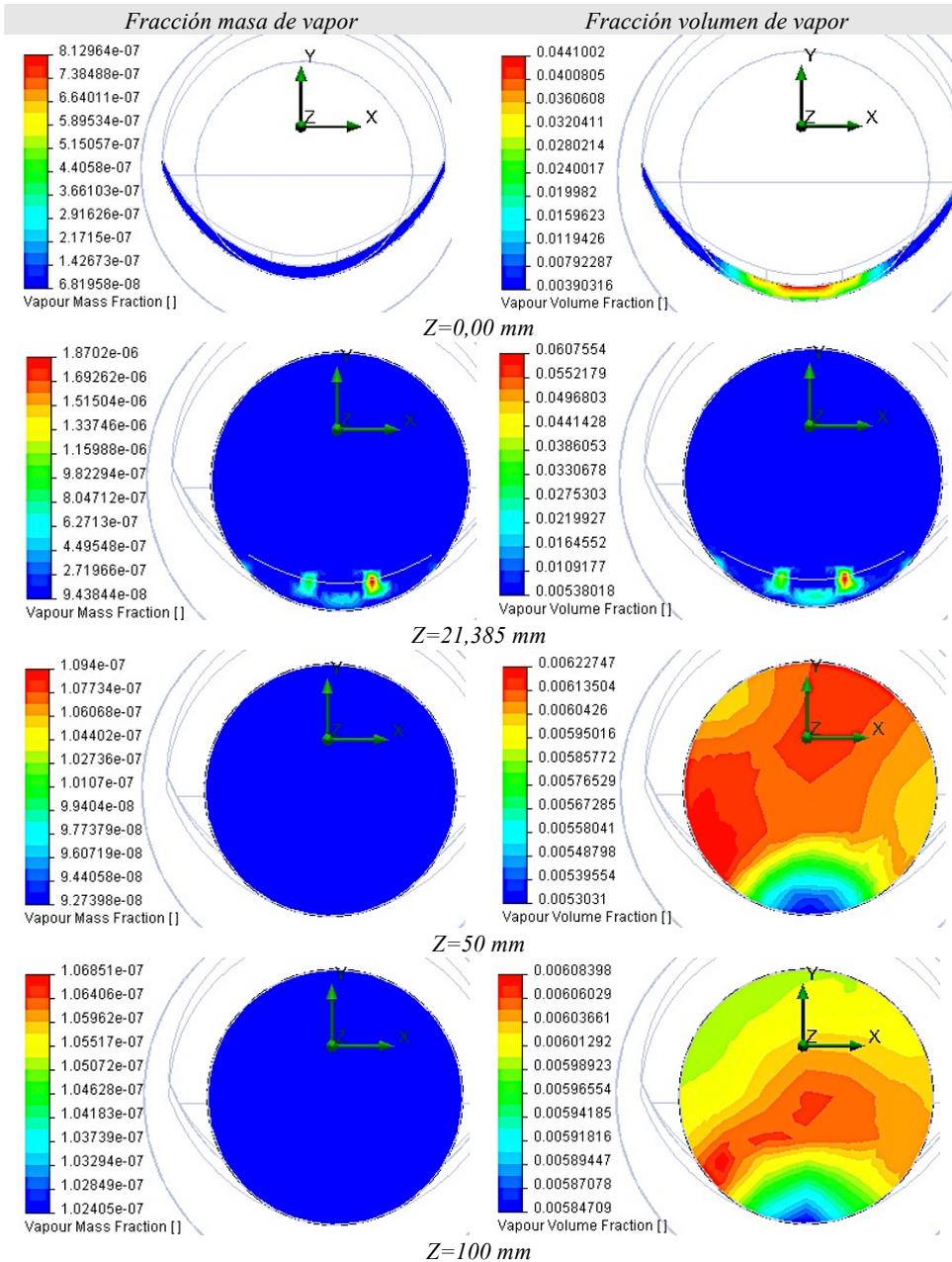


Fig. 3.37.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=6$ mm, $P=60$ mca, $Q=20$ l/s Fracción Masa y Volumen de vapor del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

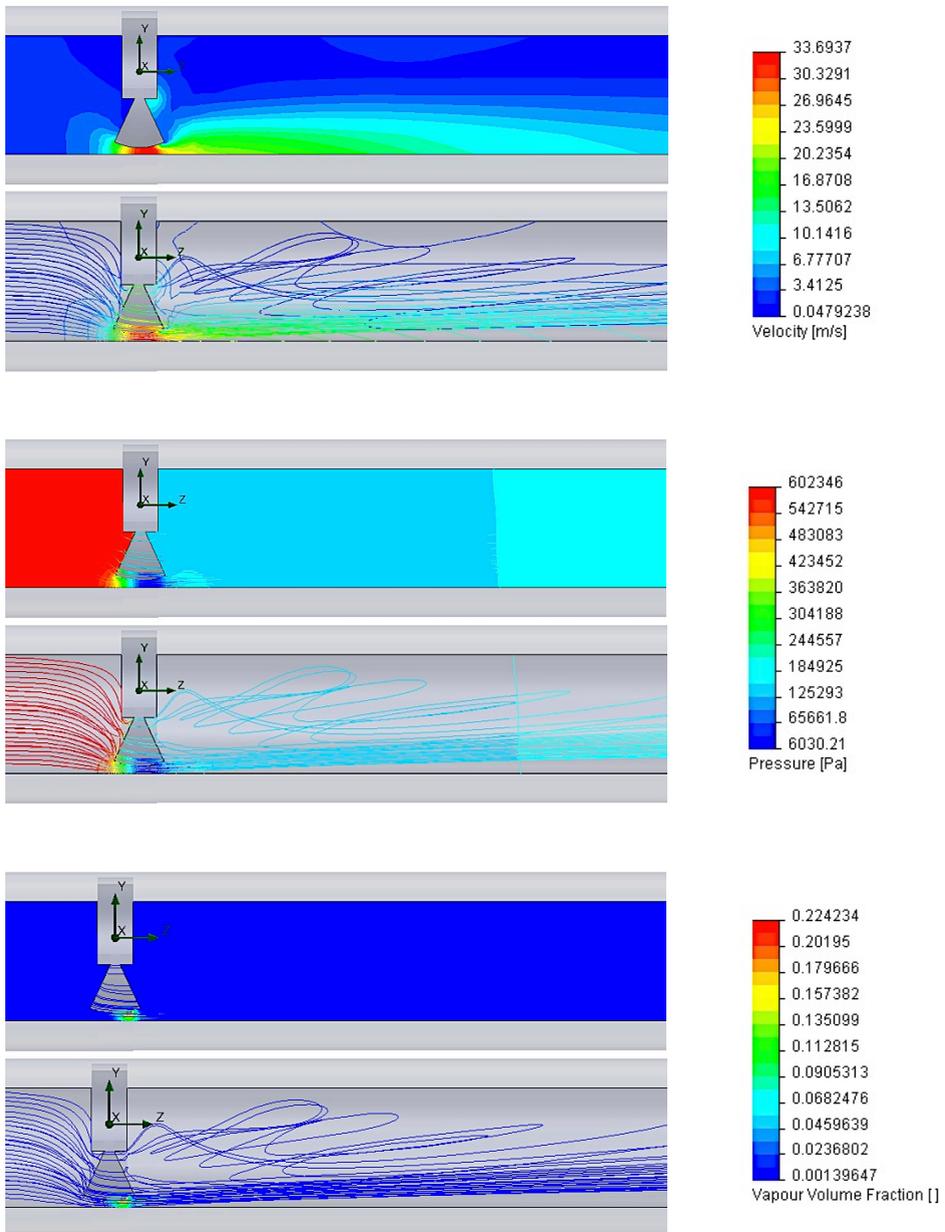


Fig. 3.38.- Líneas de corriente y mapa de isolíneas sección longitudinal central VA $h=6mm$, $P=60mca$, $Q=20l/s$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

3.2.9.- VA. Abertura $h=6\text{ mm}$, $P=120\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

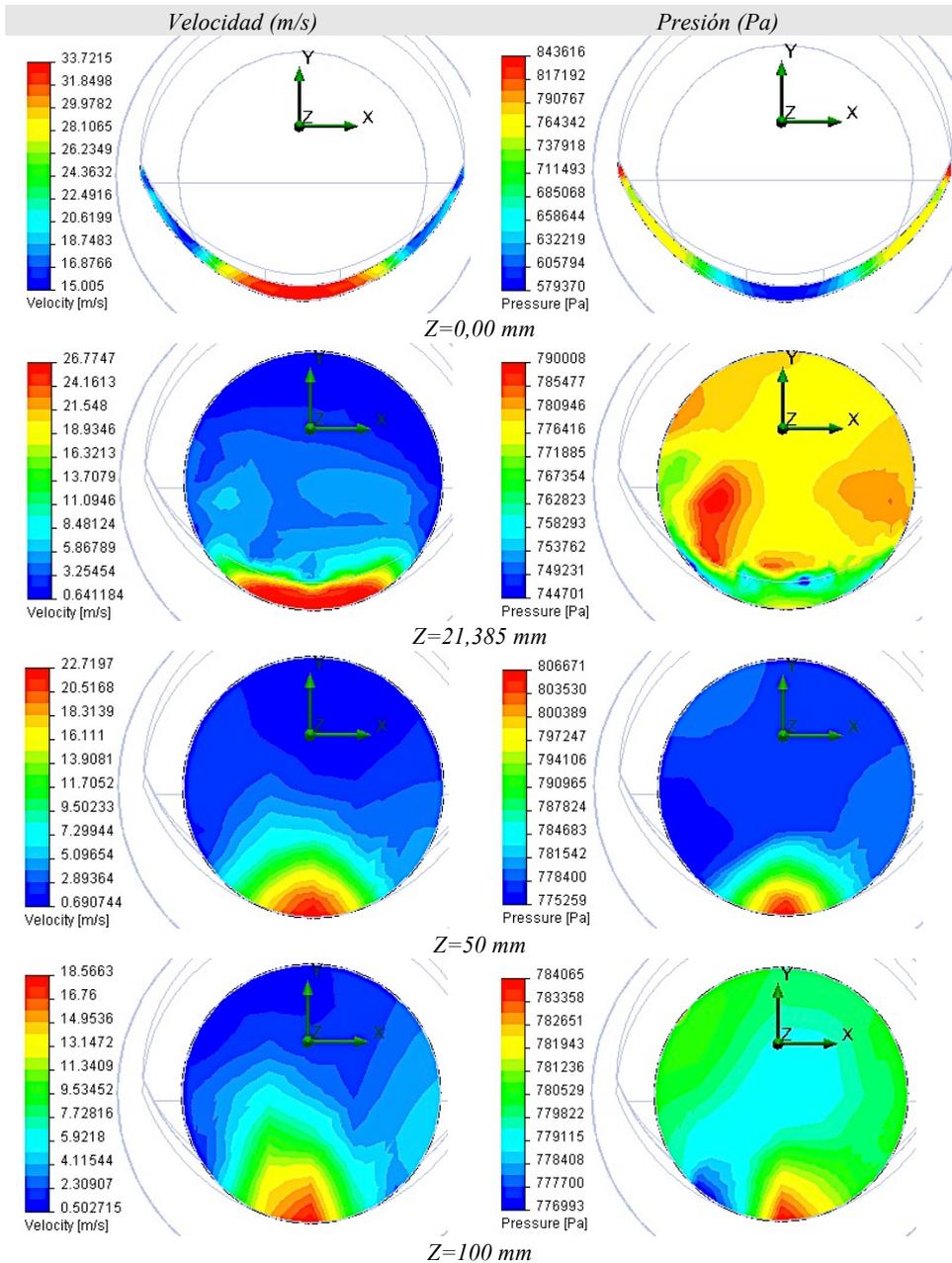


Fig. 3.39.- Mapa de isóneas secciones transversales VA $h=6\text{ mm}$, $P=120\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$. Velocidad y Presión del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

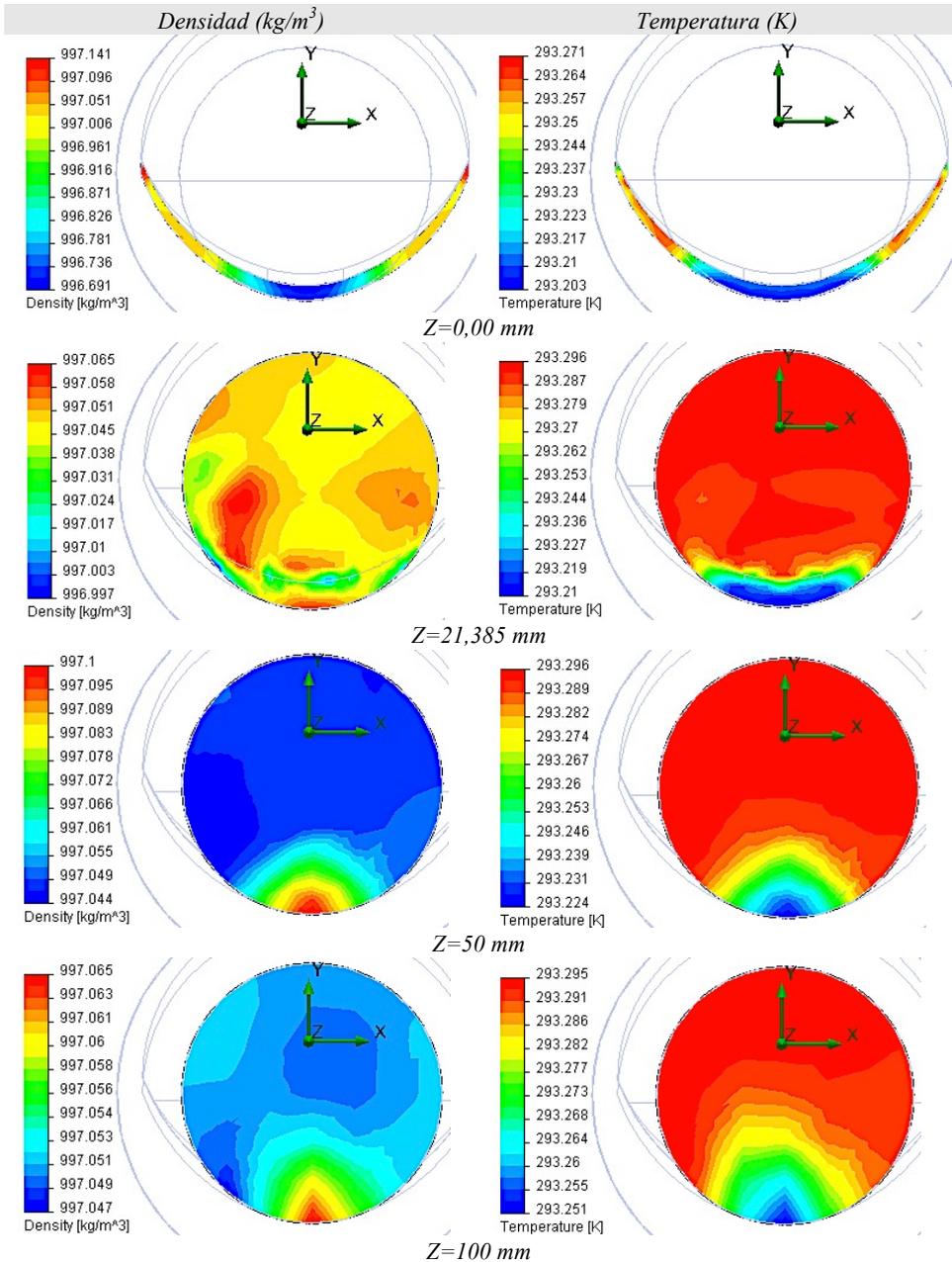


Fig. 3.40.- Mapa de isóneas secciones transversales VA $h=6\text{mm}$, $P=120\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Densidad y Temperatura del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

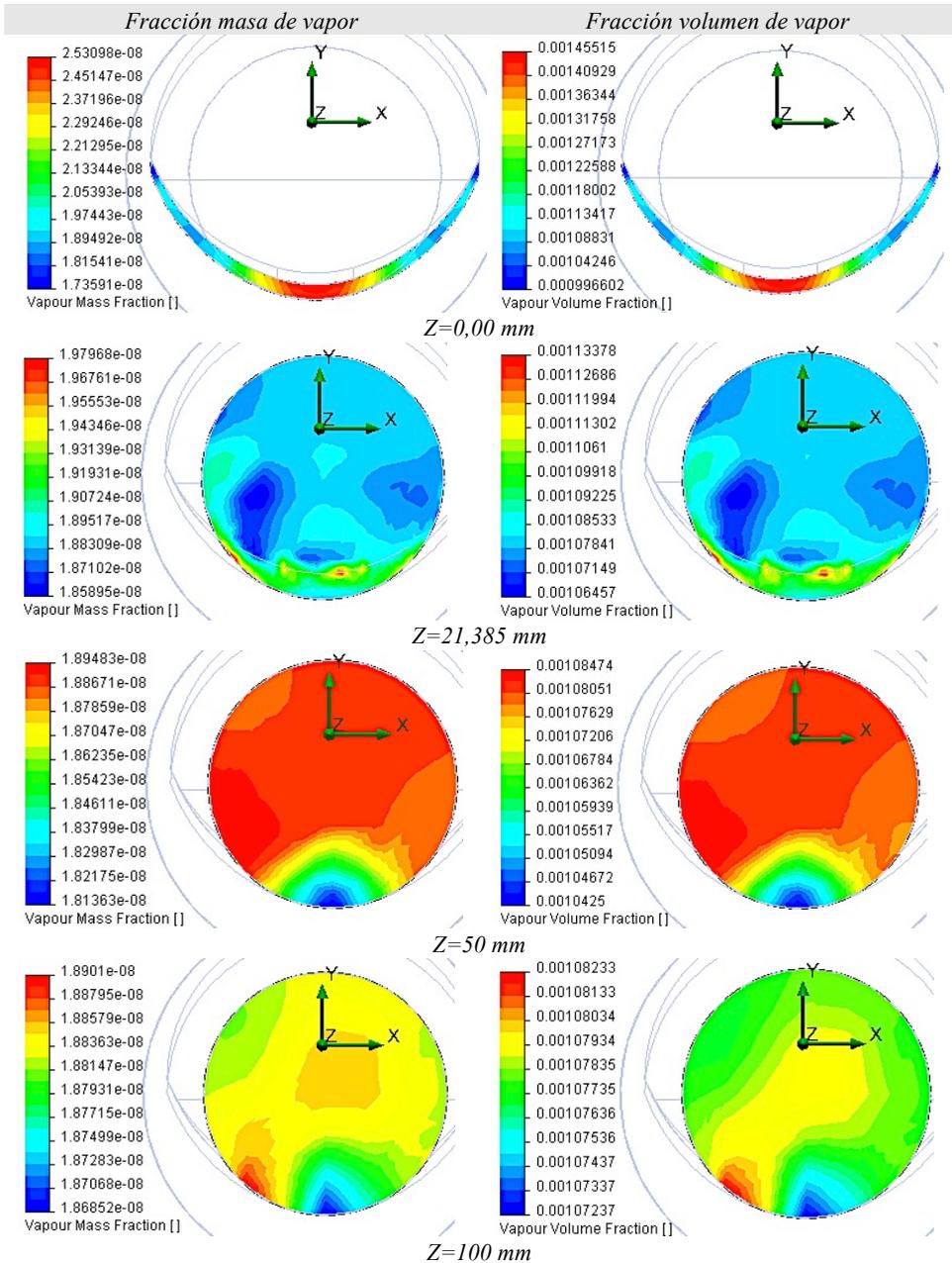


Fig. 3.41.- Mapa de isóneas secciones transversales VA $h=6$ mm, $P=120$ mca, $Q=20$ l/s. Fracción Masa y Volumen de vapor del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100mm.

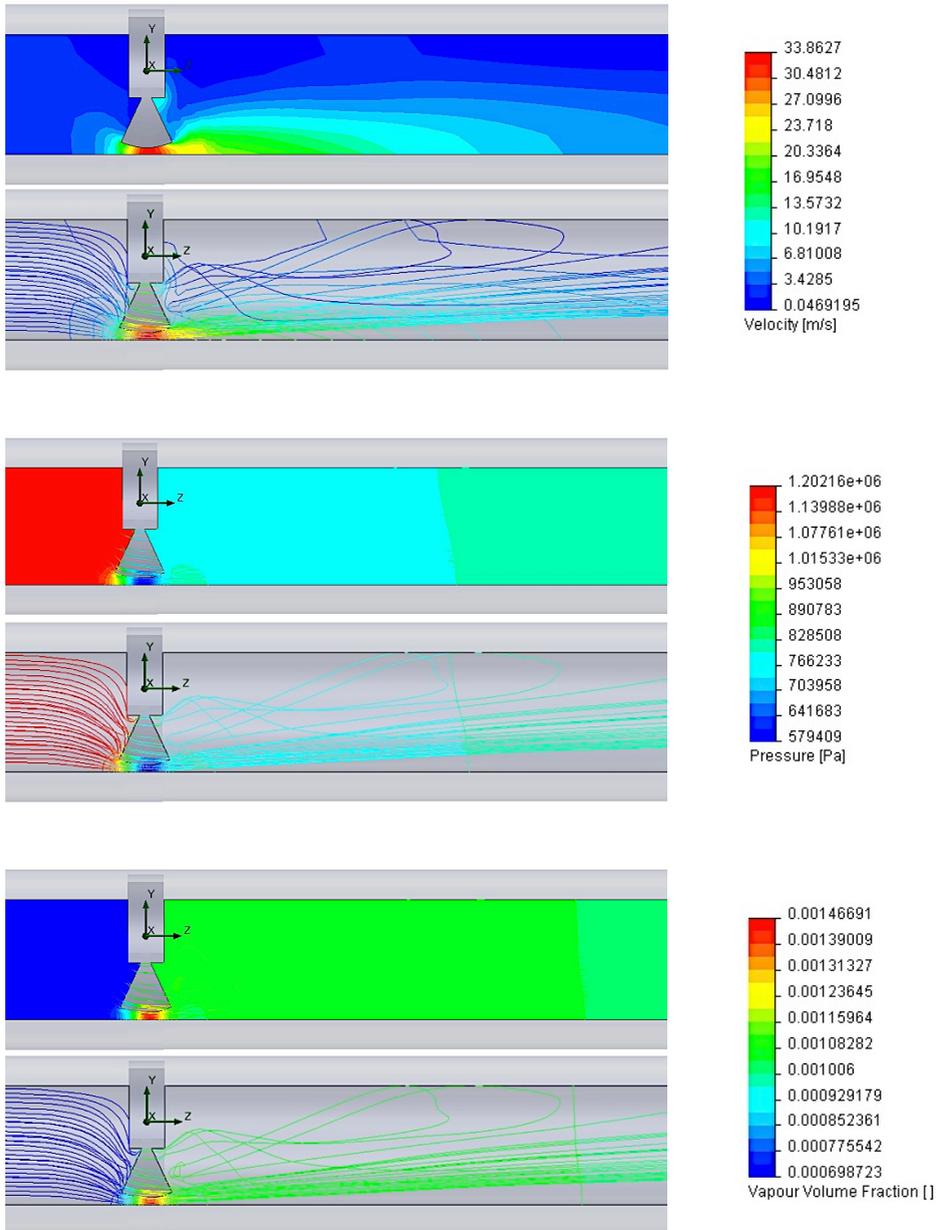


Fig. 3.42.- Líneas de corriente y mapa de isóneas sección longitudinal central VA $h=6\text{mm}$, $P=120\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

3.2.10.- VA. Resumen para $h=6\text{ mm}$, $P=20, 40, 60$ y 120 mca , $Q=20\text{ l/s}$.

El resumen de los resultados obtenidos de presión, densidad y temperatura respecto a la anchura de la compuerta para cada una de las series y caudal de 20 l/s para $h=6\text{ mm}$ y $z=21,385\text{ mm}$ se muestra en las figuras 3.43; 3.44 y 3.45.

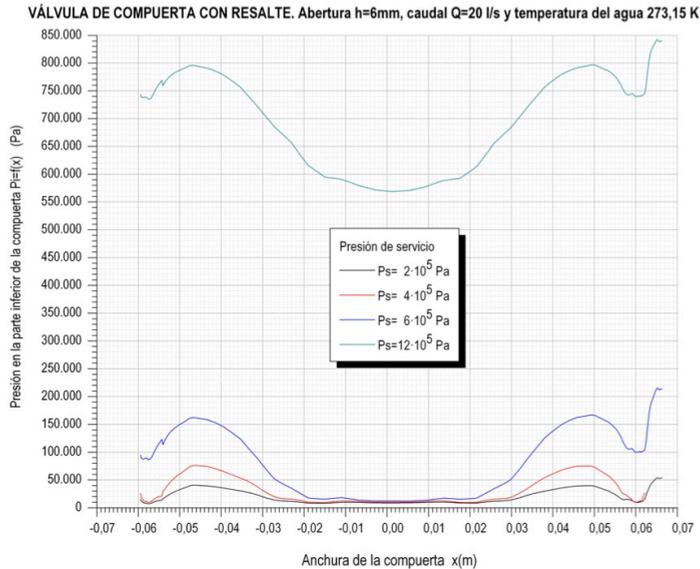


Fig. 3.43.-Correlación Presión vs. Anchura compuerta. Altura $h=6\text{ mm}$, $z=21,385\text{ mm}$.

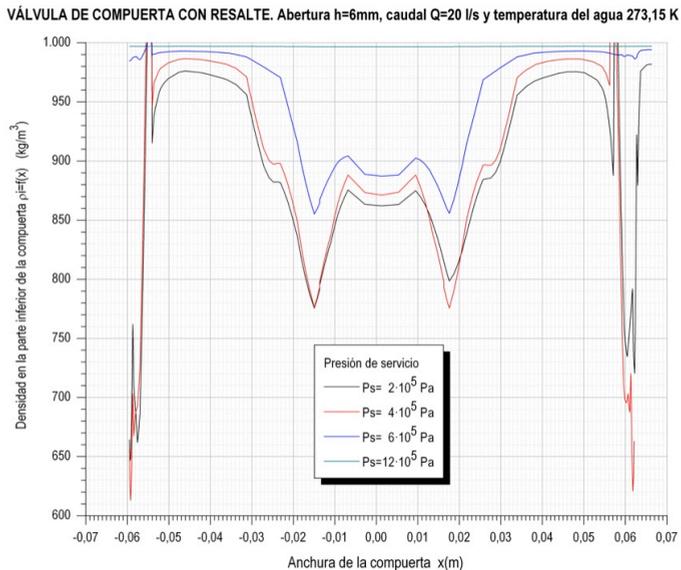


Fig. 3.44.-Correlación Densidad vs. Anchura compuerta. Altura $h=3\text{ mm}$, $z=21,385\text{ mm}$.

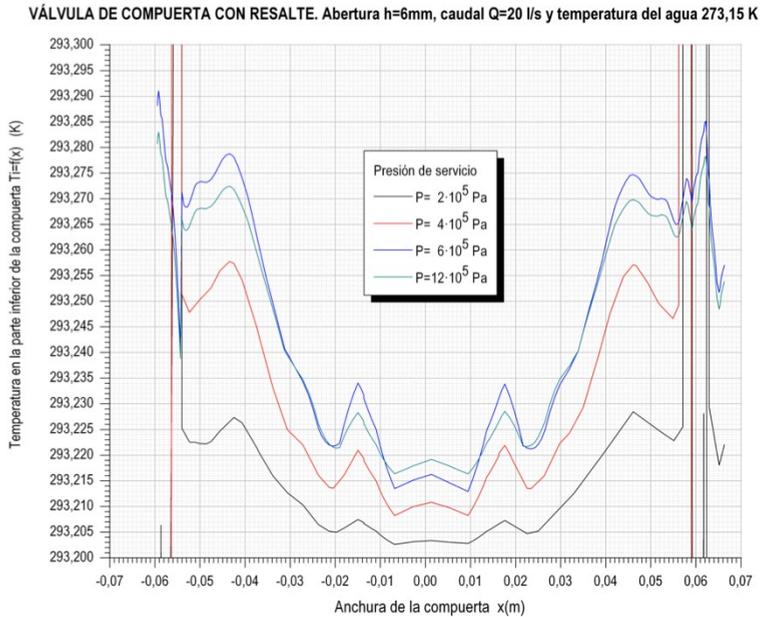


Fig. 3.45.-Correlación T vs. Anchura compuerta. Altura $h=6\text{mm}$, $z=21,385\text{mm}$.

La valoración del resumen de los resultados obtenidos en las *figuras 3.43; 3.44* y *3.45*, para cada una de las series a estudio para $z=21,385\text{ mm}$ es la siguiente:

1. Los resultados obtenidos para esta serie de cálculos son muy semejantes a los obtenidos en el *apartado anterior 3.2.5* $h=3\text{mm}$, aunque con variación de sus valores numéricos de presión, densidad y temperatura.
2. Para esta serie de resultados se observa que las curvas son más suaves en todo su trazado y la diferencia entre los valores máximos y mínimos para la presión, densidad y temperatura es menor que los obtenidos en el *apartado 3.2.5* $h=3\text{mm}$.
3. Las velocidades máximas concentradas en el cuerpo inferior de la válvula son inferiores en todas las series en comparación para una abertura de $h=3\text{mm}$, lo que significa que existen menos turbulencias y el riesgo de erosión en este caso es menor (*figuras 3.27; 3.31; 3.35 y 3.39 para $x=21,385\text{mm}$*).
4. El estudio desde el punto de vista hidráulico la pérdida de carga del accesorio para una abertura $h=6\text{mm}$ es menor que para $h=3\text{mm}$ para las mismas condiciones de caudal y presión.

3.2.11.- VA. Abertura $h=9\text{ mm}$, $P=20\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

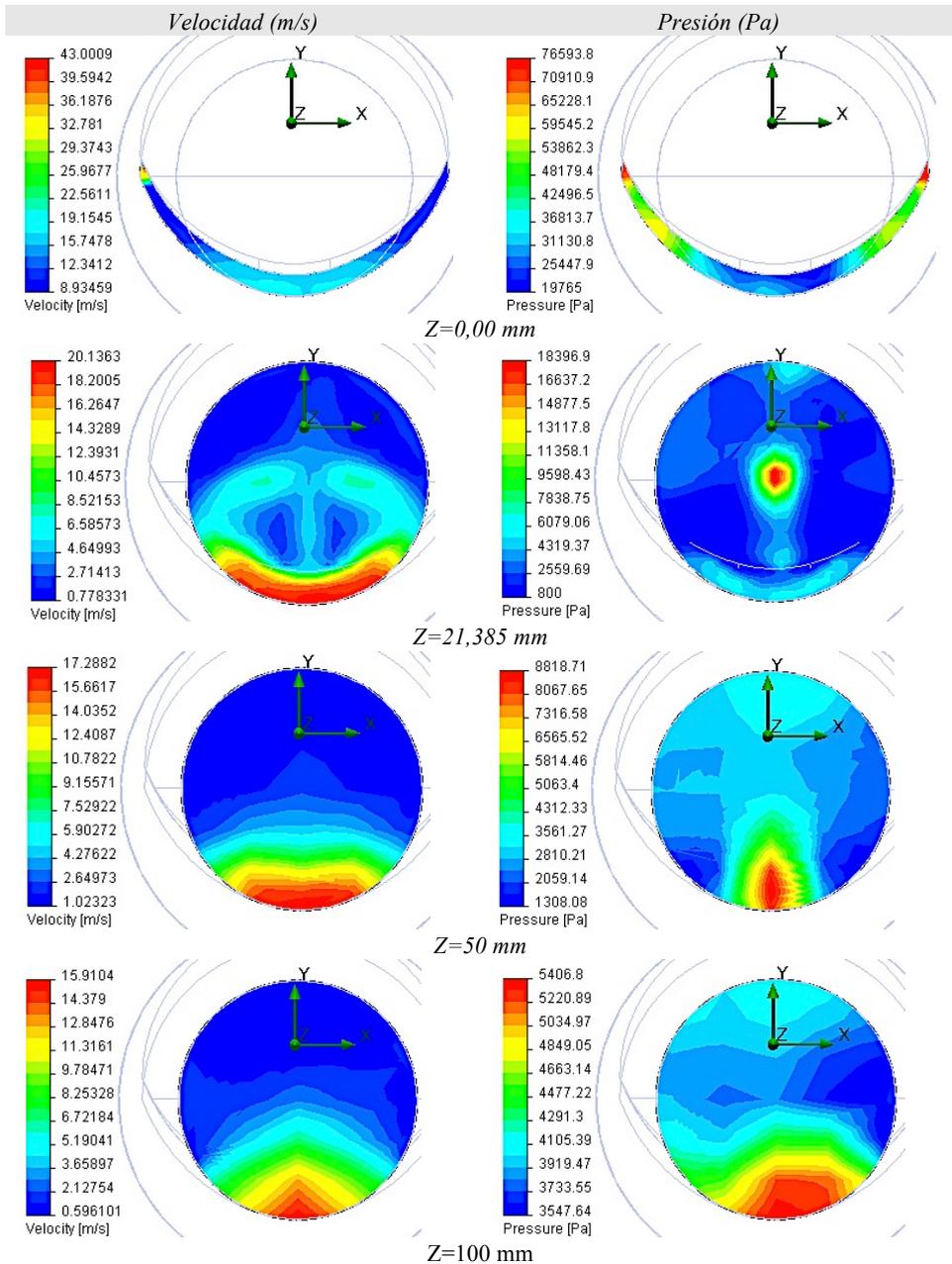


Fig. 3.46.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=9\text{ mm}$, $P=20\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$. Velocidad y Presión del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

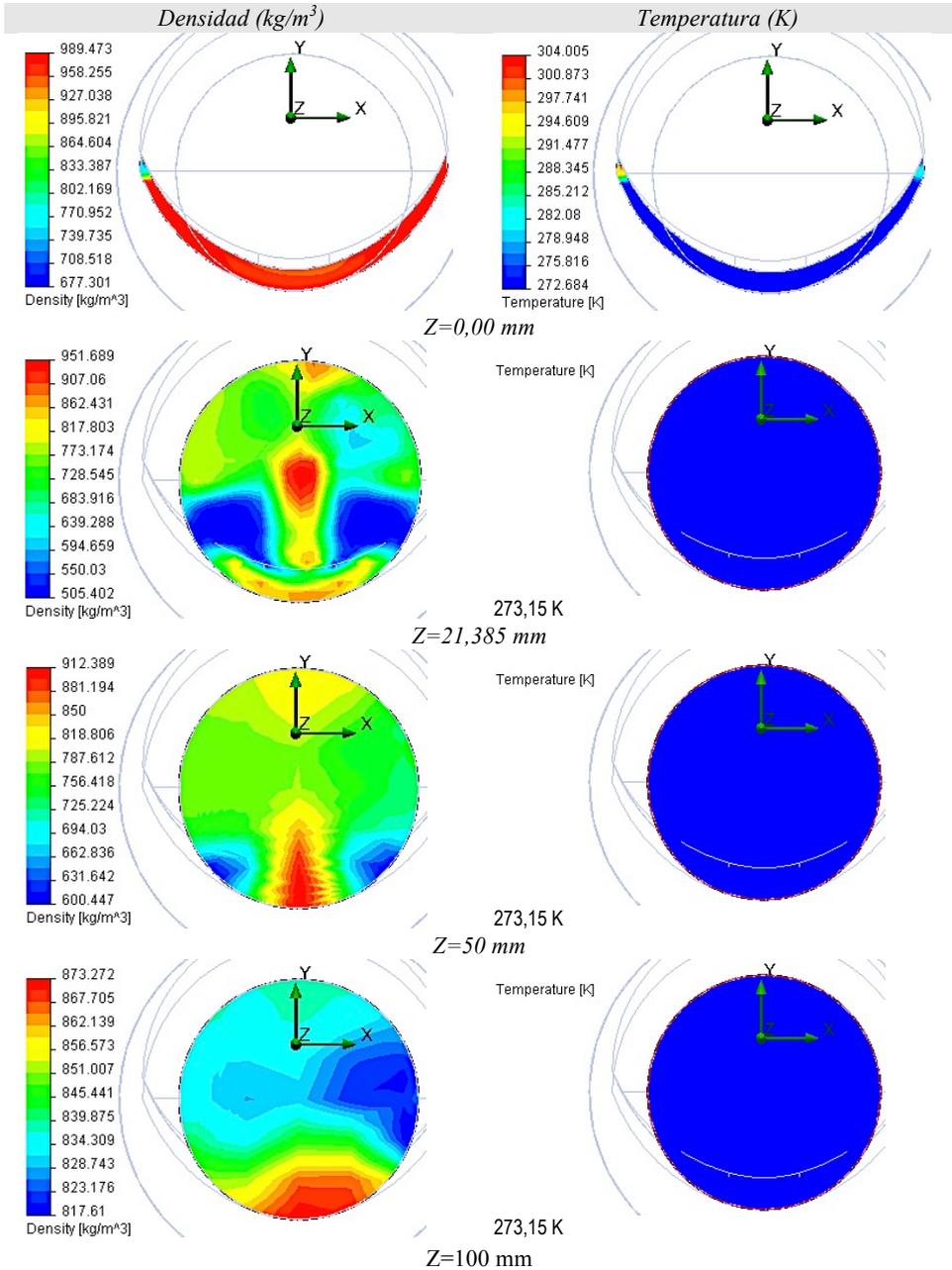


Fig. 3.47.- Mapa de isolíneas secciones transversales VA $h=9\text{mm}$, $P=20\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Densidad y Temperatura del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

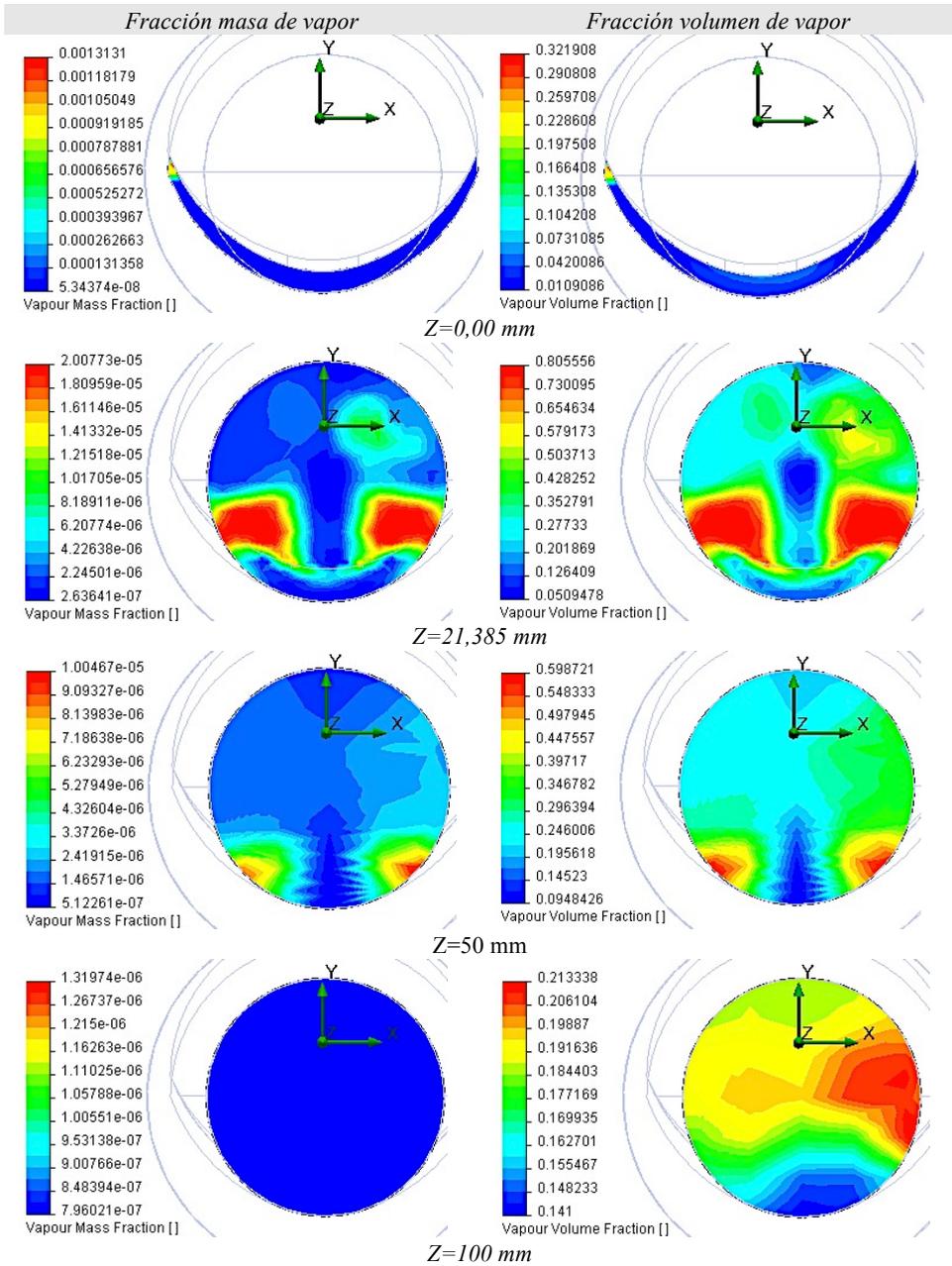


Fig. 3.48.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=9\text{mm}$, $P=20\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Fracción Masa y Volumen de vapor del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

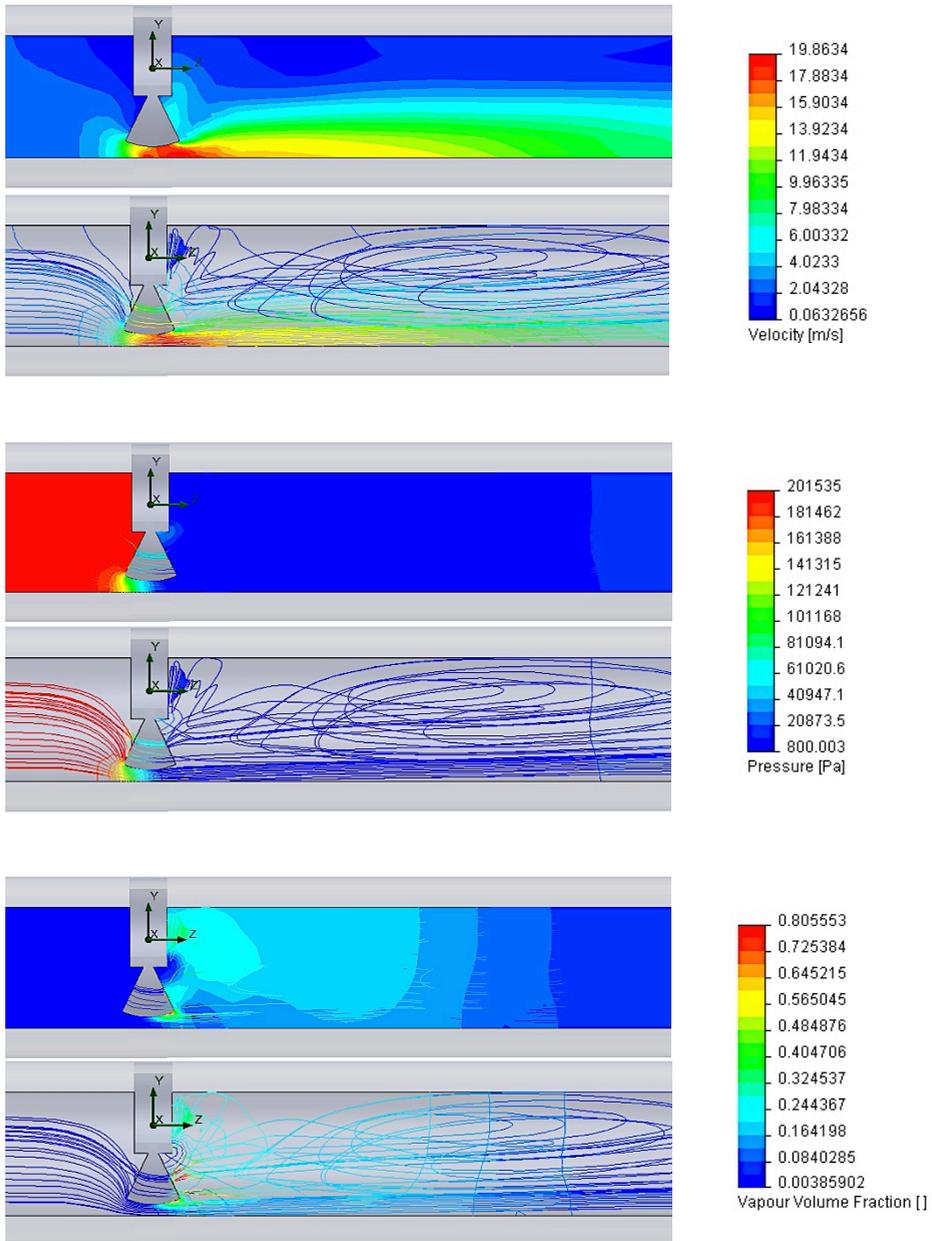


Fig. 3.49.- Líneas de corriente y mapa de isolíneas sección longitudinal central VA $h=9\text{mm}$, $P=20\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

3.2.12.- VA. Abertura $h=9\text{ mm}$, $P=40\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

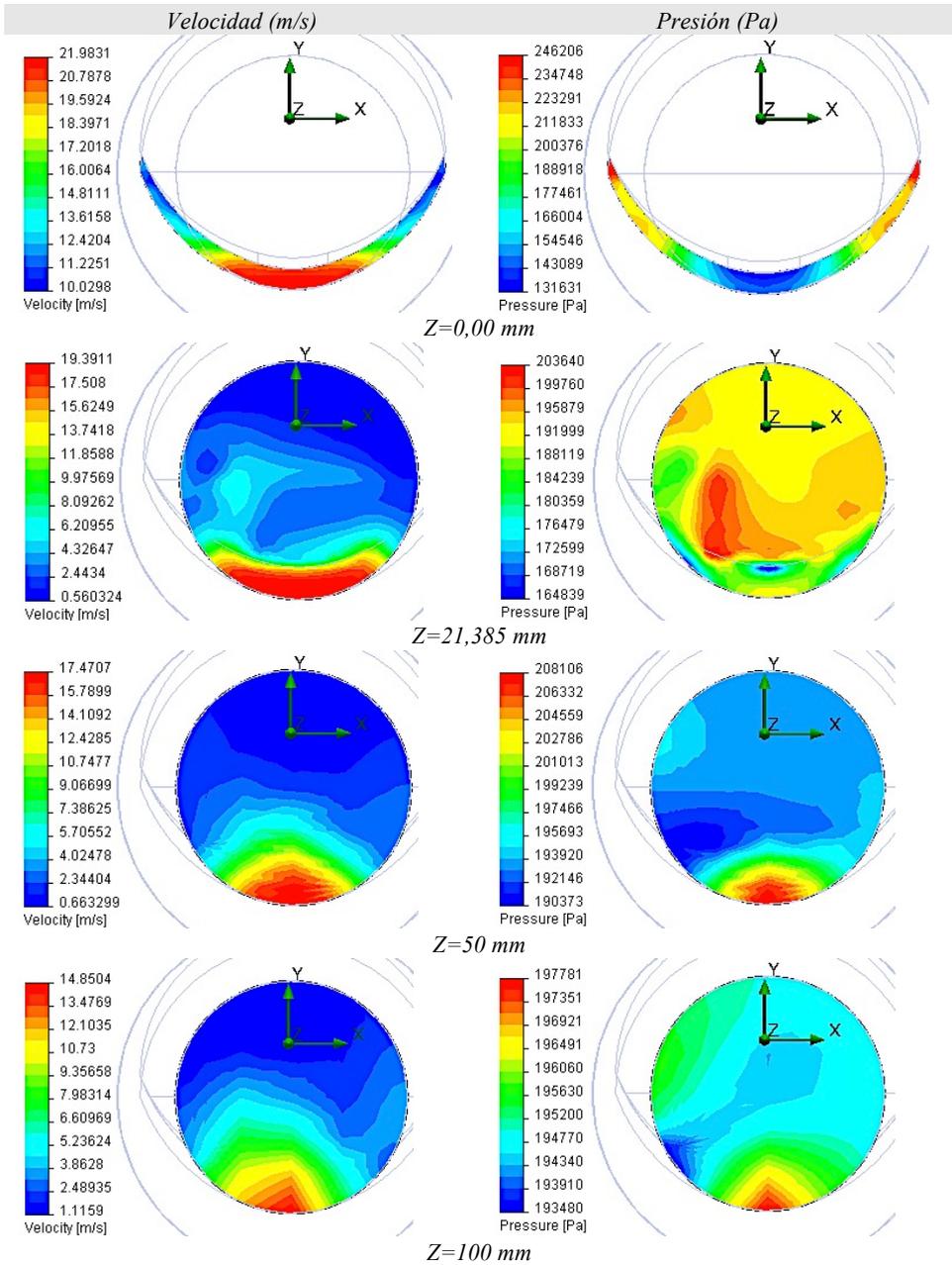


Fig. 3.50.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=9\text{mm}$, $P=40\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad y Presión del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

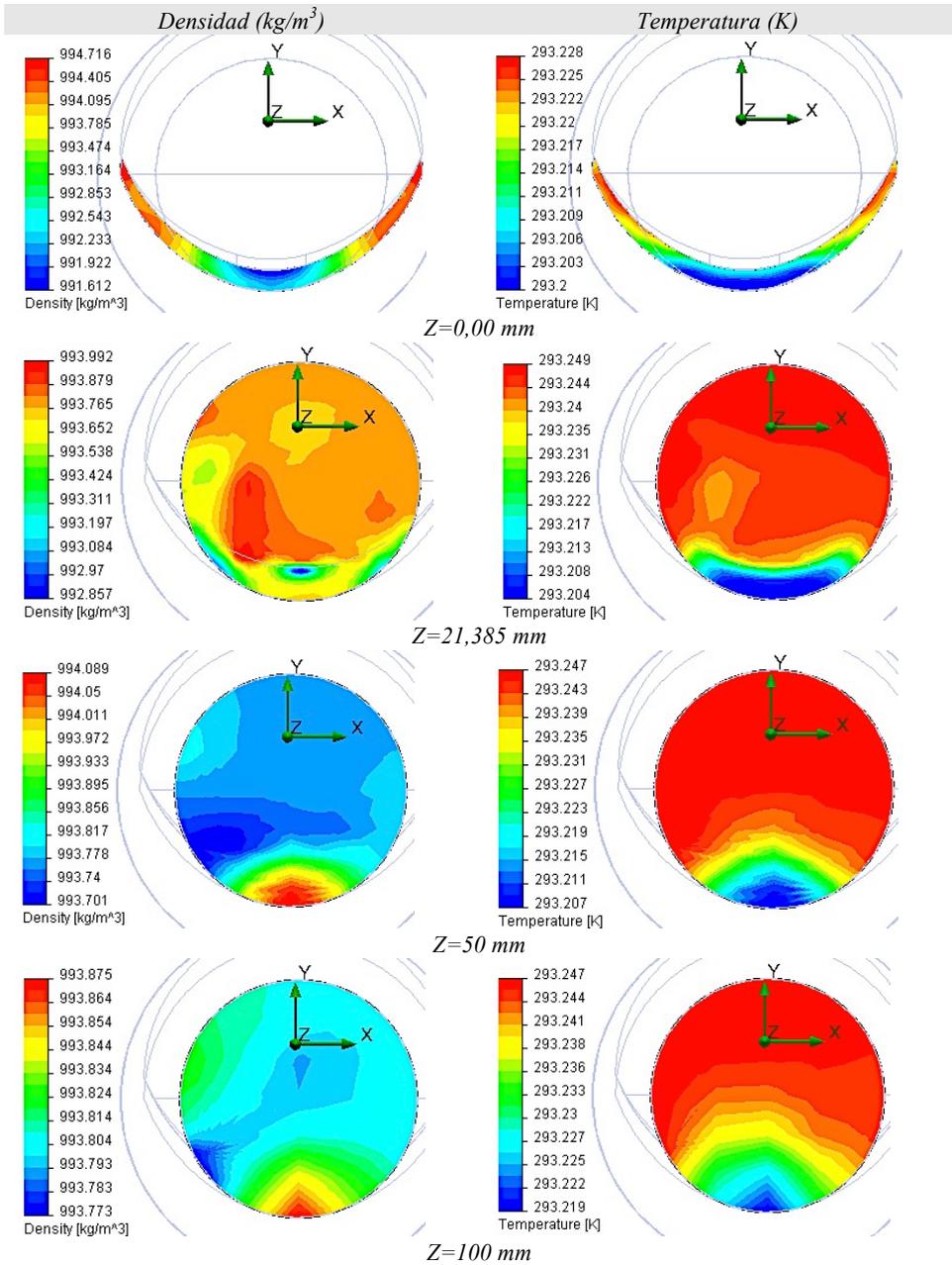


Fig. 3.51.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=9\text{mm}$, $P=40\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Densidad y Temperatura del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

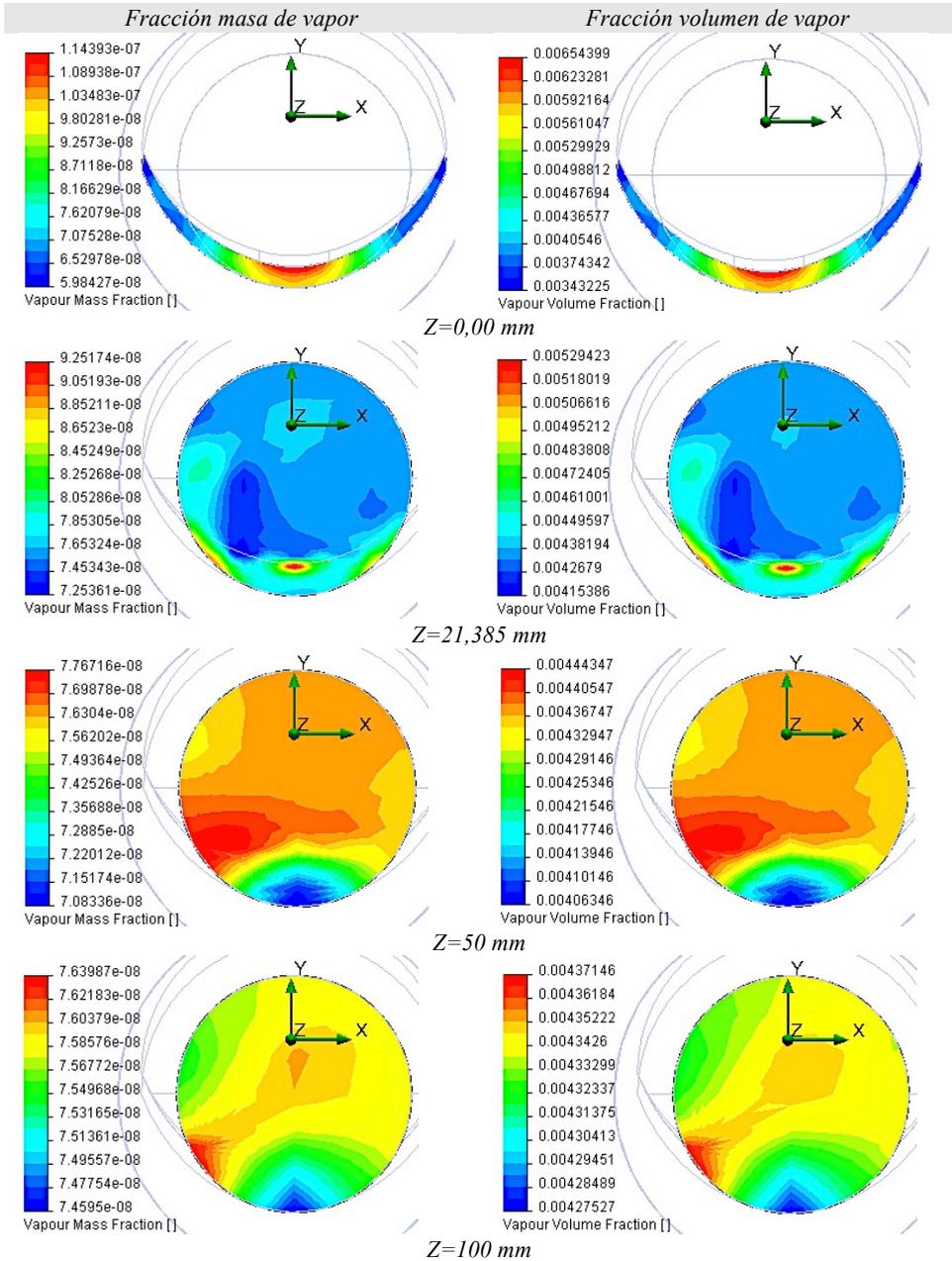


Fig. 3.52.- Mapa de isolíneas secciones transversales VA $h=9\text{mm}$, $P=40\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$ Fracción Masa y Volumen de vapor del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

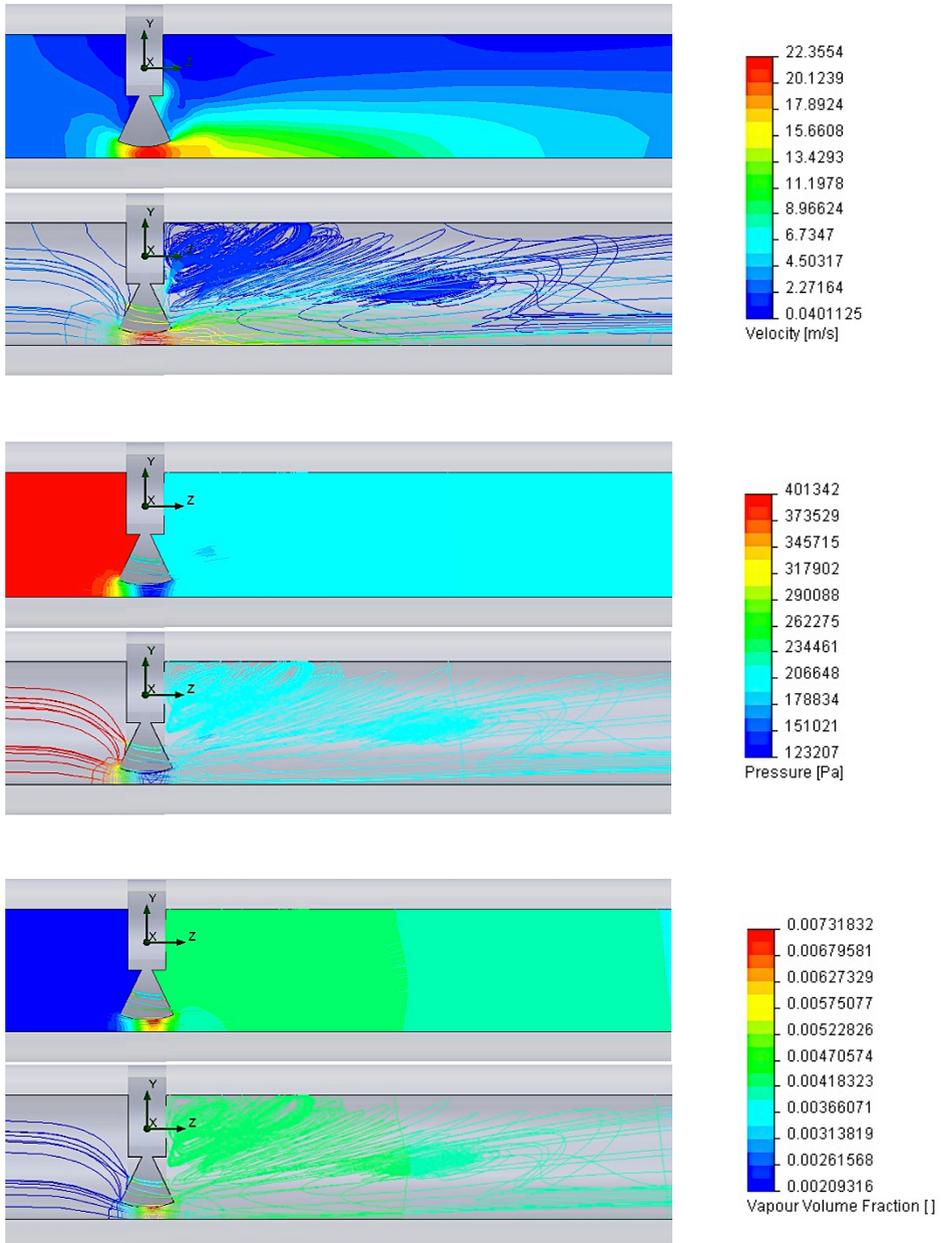


Fig. 3.53.- Líneas de corriente y mapa de isolíneas sección longitudinal central VA $h=9\text{mm}$, $P=40\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

3.2.13.- VA. Abertura $h=9\text{ mm}$, $P=60\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

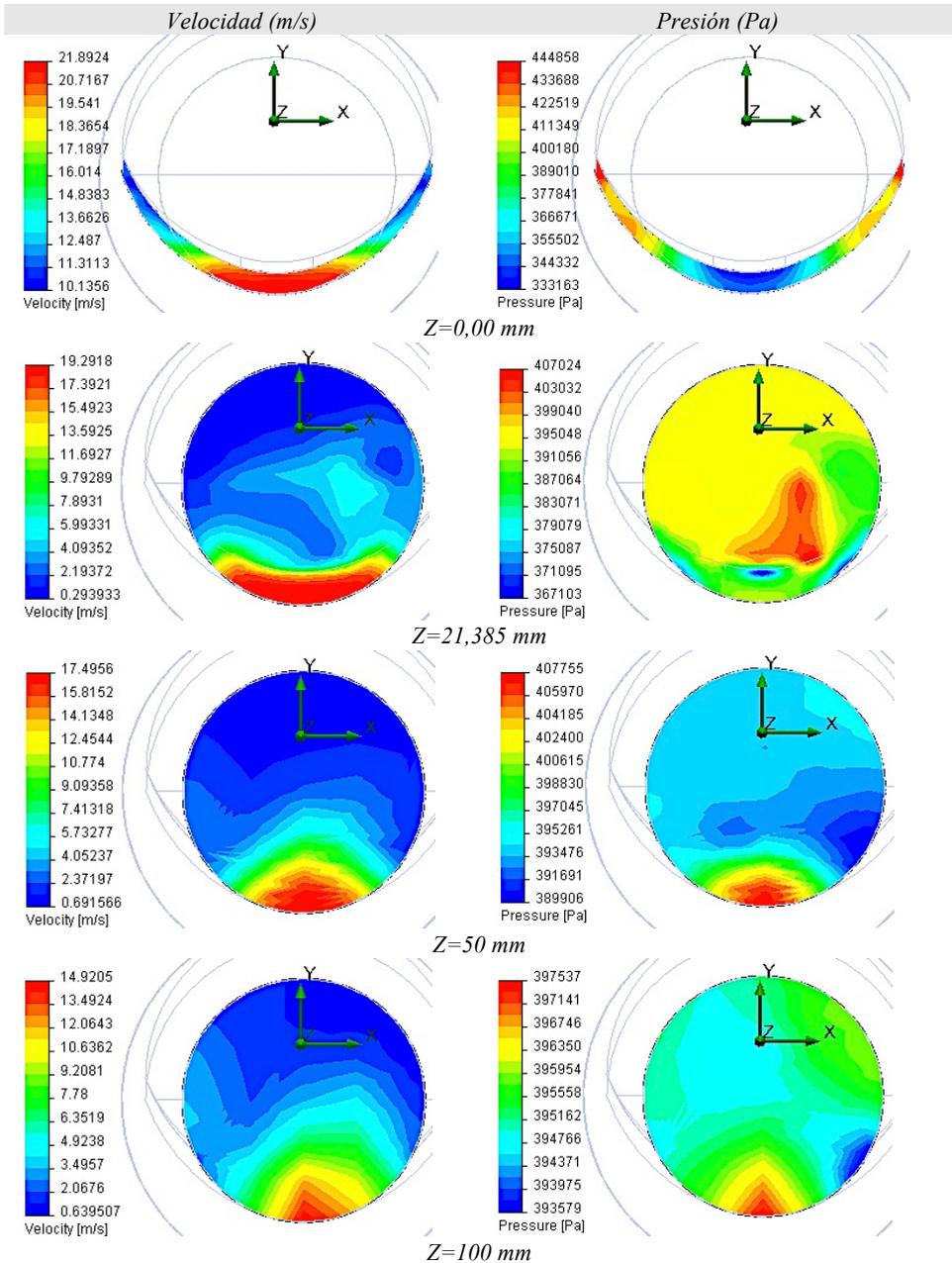


Fig. 3.54.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=9\text{mm}$, $P=60\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad y Presión del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

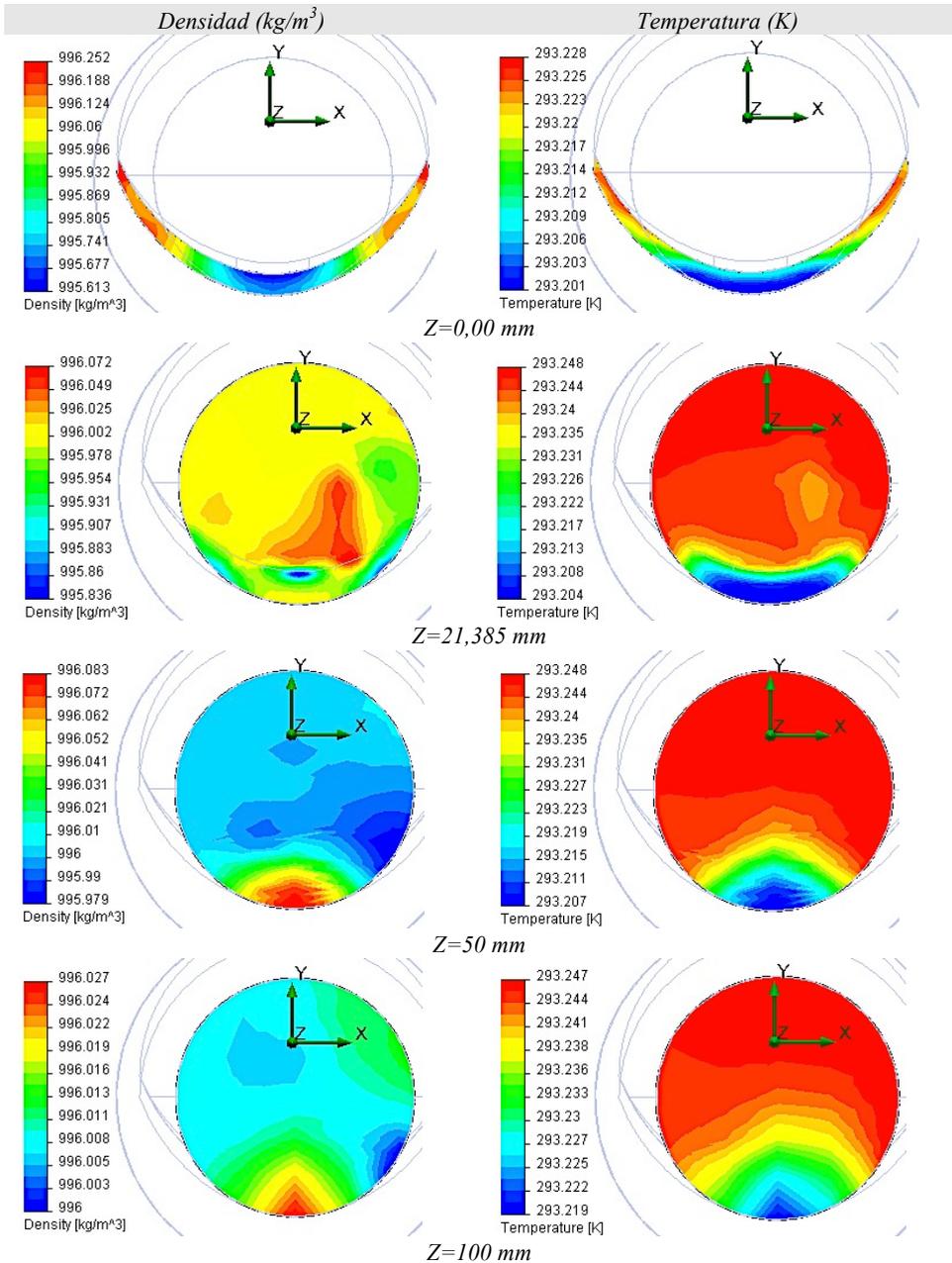


Fig. 3.55.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=9\text{mm}$, $P=60\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Densidad y Temperatura del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

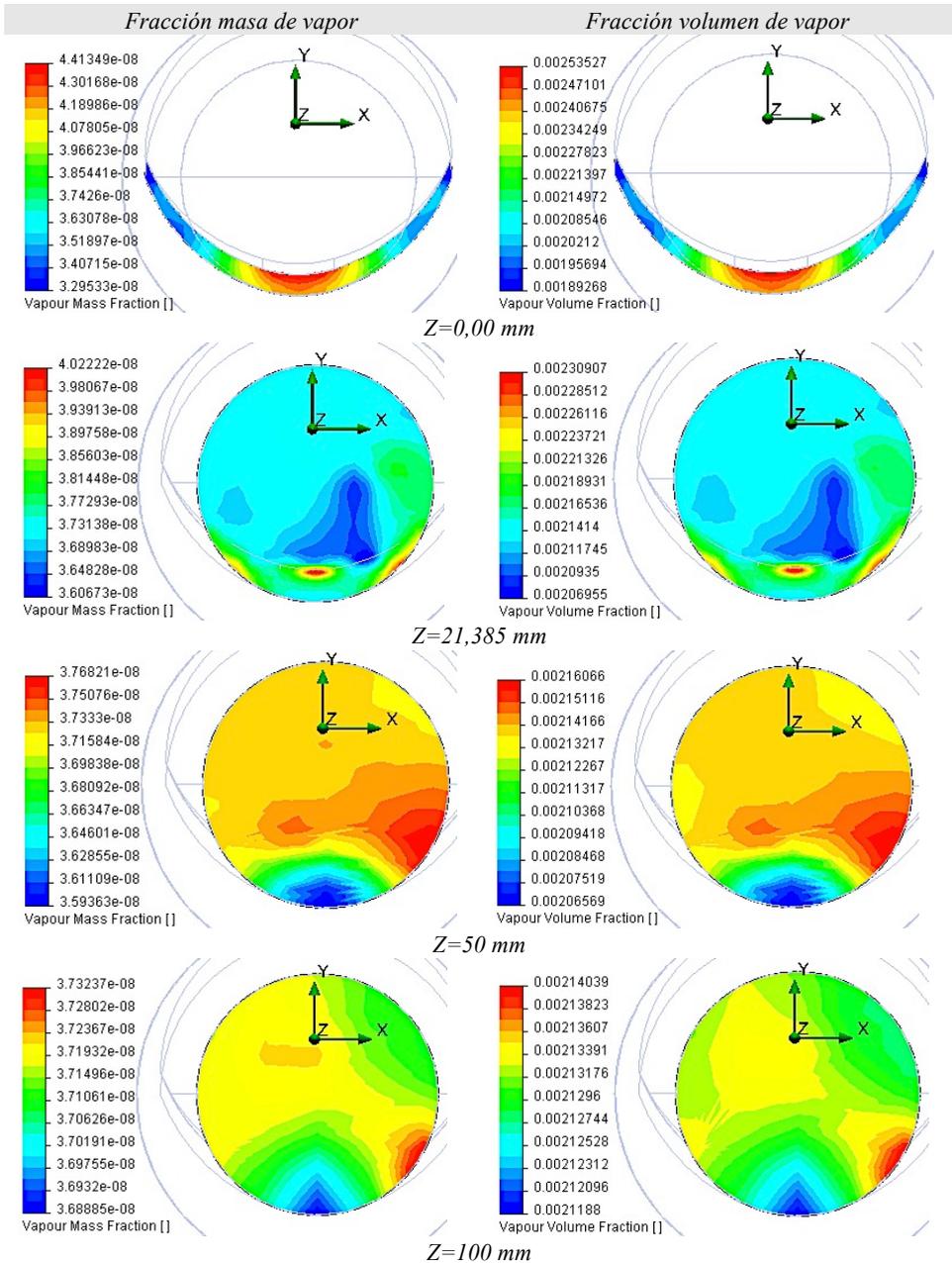


Fig. 3.56.- Mapa de isocías secciones transversales VA $h=9$ mm, $P=60$ mca, $Q=20$ l/s. Fracción Masa y Volumen de vapor del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

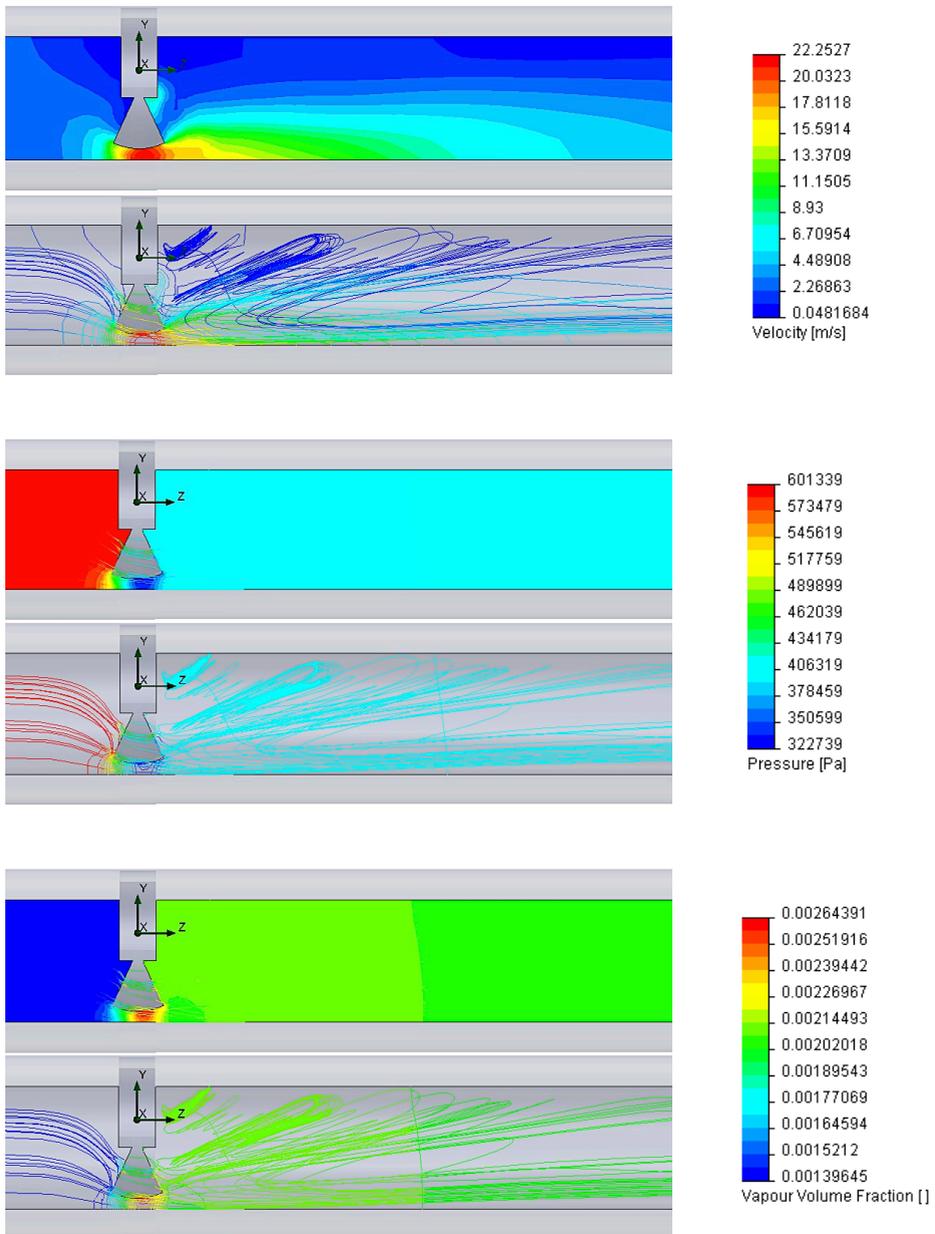


Fig. 3.57.- Líneas de corriente y mapa de isolíneas sección longitudinal central VA $h=9\text{mm}$, $P=60\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

3.2.14.- VA. Abertura $h=9\text{ mm}$, $P=120\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

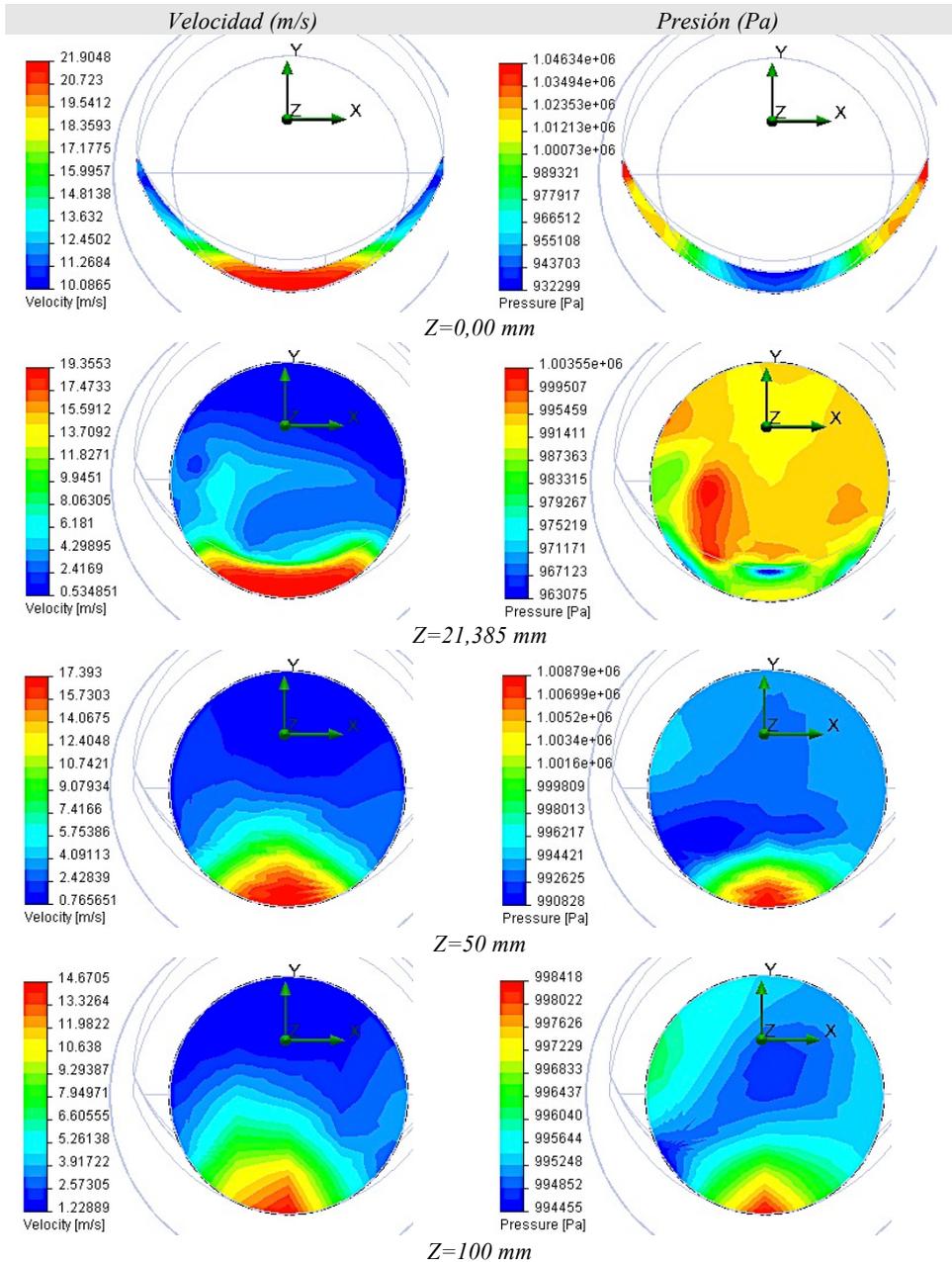


Fig. 3.58.- Mapa de isóneas secciones transversales VA $h=9\text{ mm}$, $P=120\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$. Velocidad y Presión del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

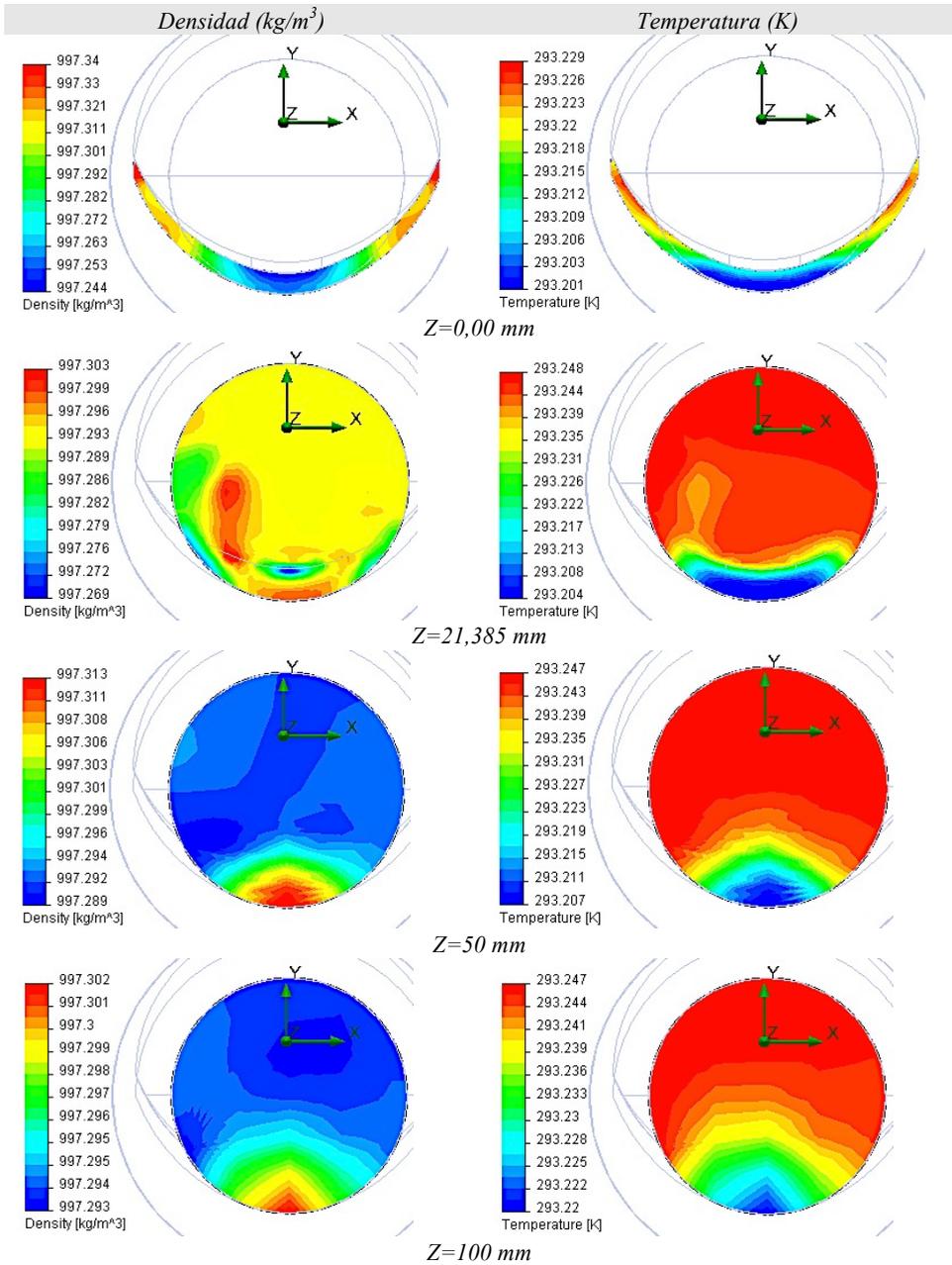


Fig. 3.59.- Mapa de isóneas secciones transversales VA $h=9\text{mm}$, $P=120\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Densidad y Temperatura del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100 mm.

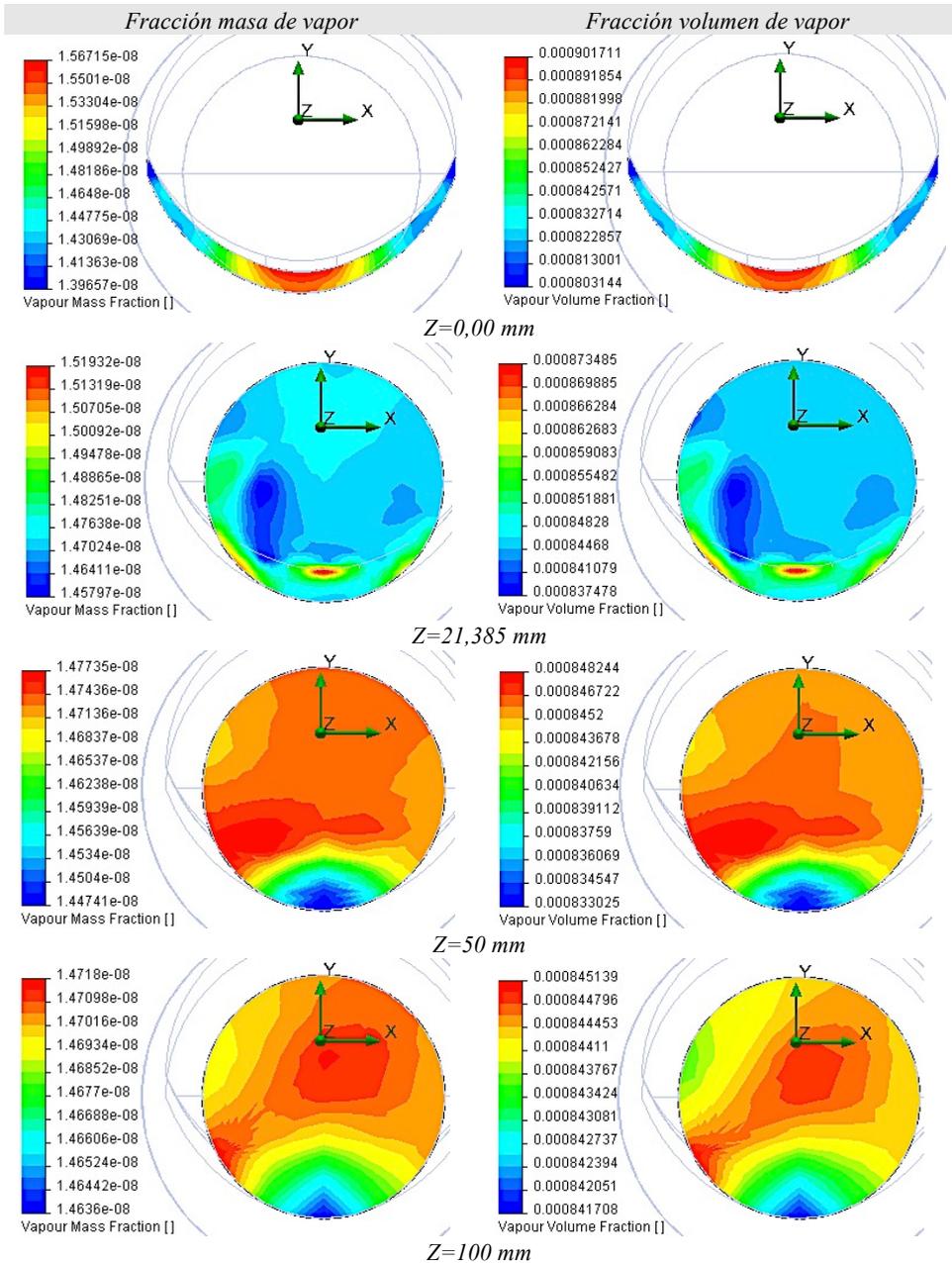


Fig. 3.60.- Mapa de isóneas secciones transversales VA $h=9\text{mm}$, $P=120\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Fracción Masa y Volumen de vapor del agua, para $Z=0$; 21,385; 50 y 100mm.

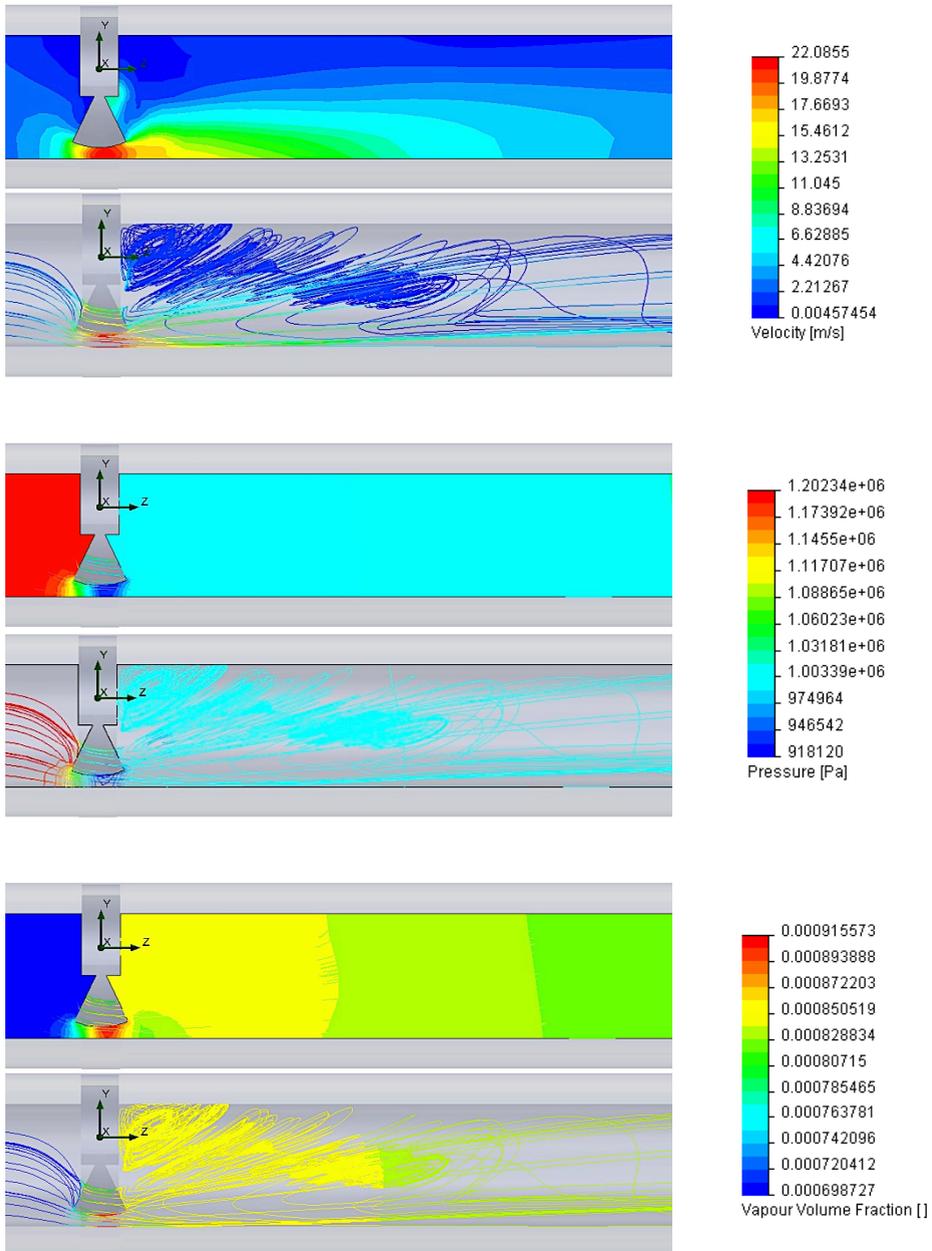


Fig. 3.61.- Líneas de corriente y mapa de isocurvas sección longitudinal central VA $h=9\text{mm}$, $P=120\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

3.2.15.- VA. Resumen para $h=9\text{ mm}$, $P=20, 40, 60$ y 120 mca , $Q=20\text{ l/s}$.

El resumen de los resultados obtenidos de presión, densidad y temperatura respecto a la anchura de la compuerta para cada una de las series y caudal de 20 l/s para $h=9\text{ mm}$ y $z=21,385\text{ mm}$ se muestra en las *figuras 3.62; 3.63 y 3.64*.

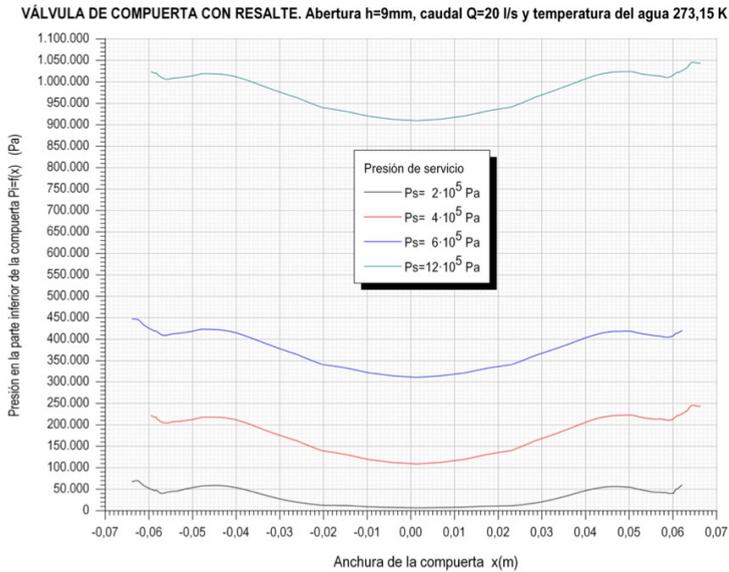


Fig. 3.62.-Correlación Presión vs. Anchura compuerta. Altura $h=9\text{ mm}$, $z=21,385\text{ mm}$.

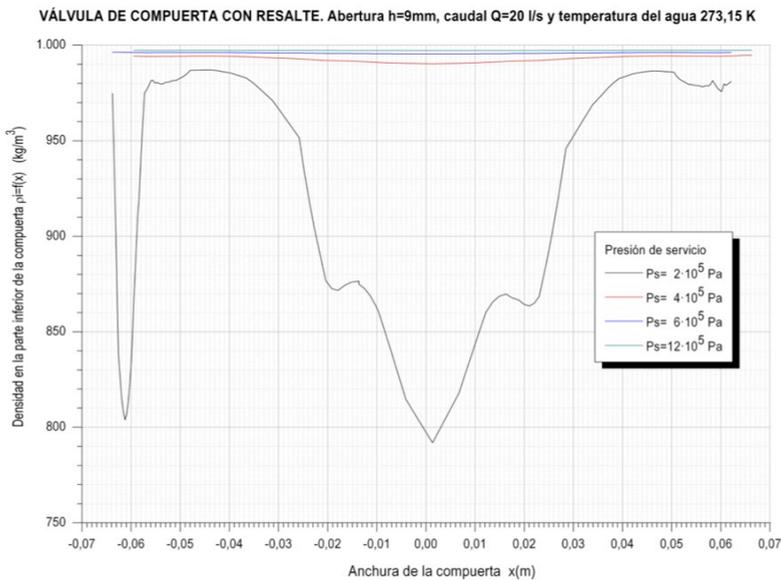


Fig. 3.63.-Correlación Densidad vs. Anchura compuerta. Altura $h=9\text{ mm}$, $z=21,385\text{ mm}$.

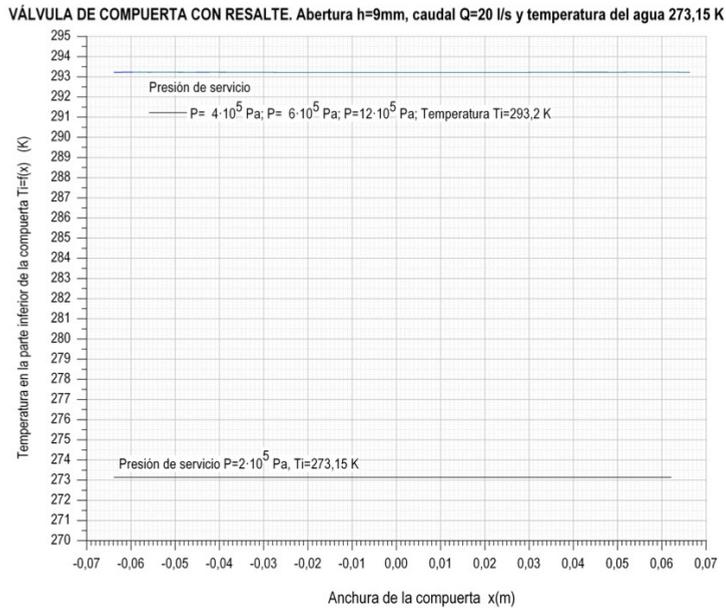


Fig. 3.64.-Correlación T vs. Anchura compuerta. Altura $h=9\text{m}$, $z=21,385\text{mm}$.

La valoración del resumen de los resultados obtenidos en las figuras 3.62; 3.63 y 3.64, para cada una de las series a estudio para $z=21,385\text{ mm}$ es la siguiente:

1. Los resultados obtenidos para esta serie de cálculos son muy semejantes a los obtenidos en los apartados 3.2.5 para $h=3\text{mm}$ y 3.2.10 para $h=6\text{mm}$ para la correlación entre la Presión vs. Anchura de la válvula (figura 3.62), existiendo variaciones para la densidad y temperatura donde las curvas se asemejan más a líneas rectas salvo para una sola excepción correspondiente a la densidad para $P=20\text{mca}$ (figura 3.63).
2. Las velocidades máximas concentradas en el cuerpo inferior de la válvula son inferiores en todas las series en comparación para una abertura de $h=3\text{mm}$ y $h=6\text{mm}$, lo que significa que existen menos turbulencias y el riesgo de la erosión en este caso es menor. Un dato muy relevante es que la velocidad máxima para todas las series es practicante la misma (figuras 3.46; 3.50; 3,54 y 3,58).
3. El estudio desde el punto de vista hidráulico la pérdida de carga del accesorio para una abertura $h=9\text{mm}$ es menor que para $h=6\text{mm}$ para las mismas condiciones de caudal y presión.

3.3.- Resultados válvula nuevo diseño o sin resalte hidráulico (VN).

3.3.1.- VN. Abertura $h=3\text{ mm}$, $P=20\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

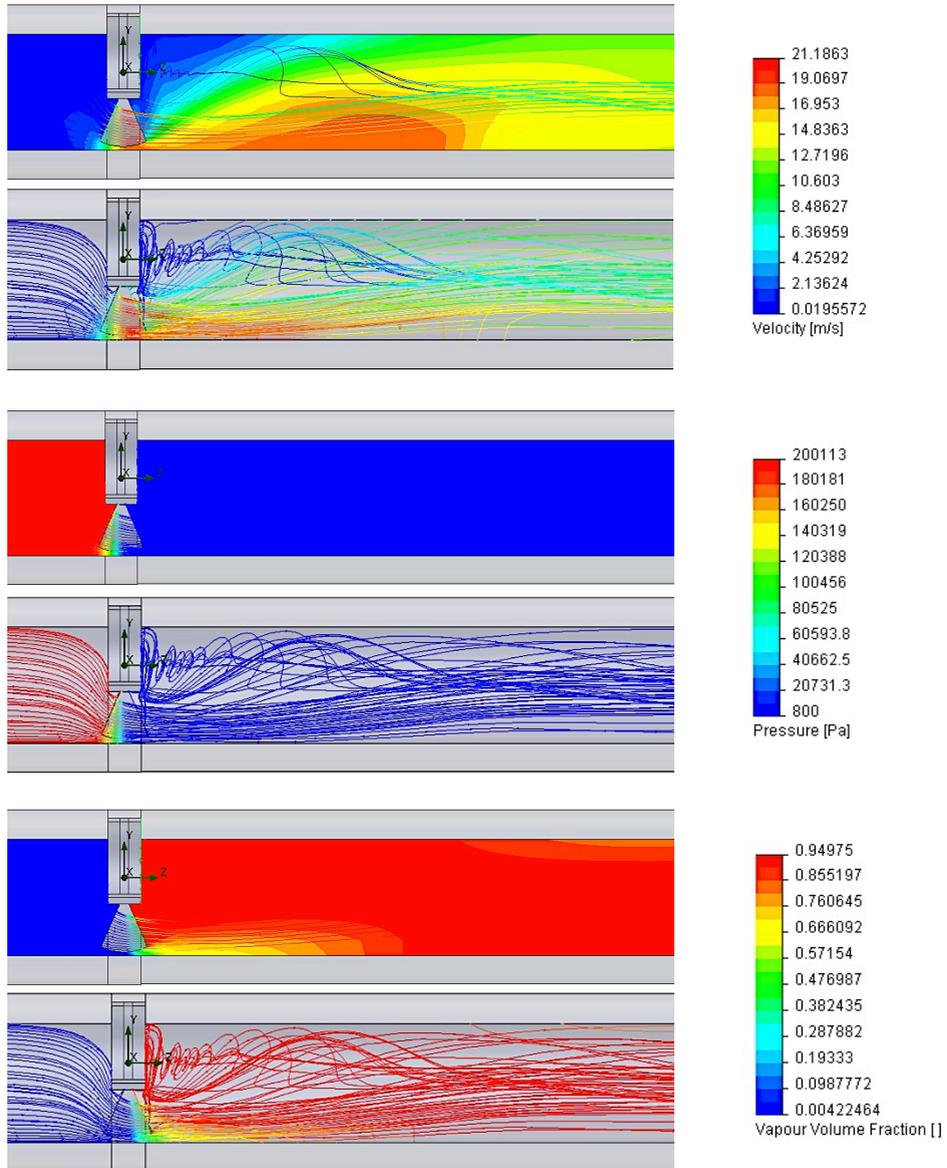


Fig. 3.65.- Líneas de corriente y mapa de isóneas sección longitudinal central VN $h=3\text{ mm}$, $P=20\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

3.3.2.- VN. Abertura $h=3\text{ mm}$, $P=40\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

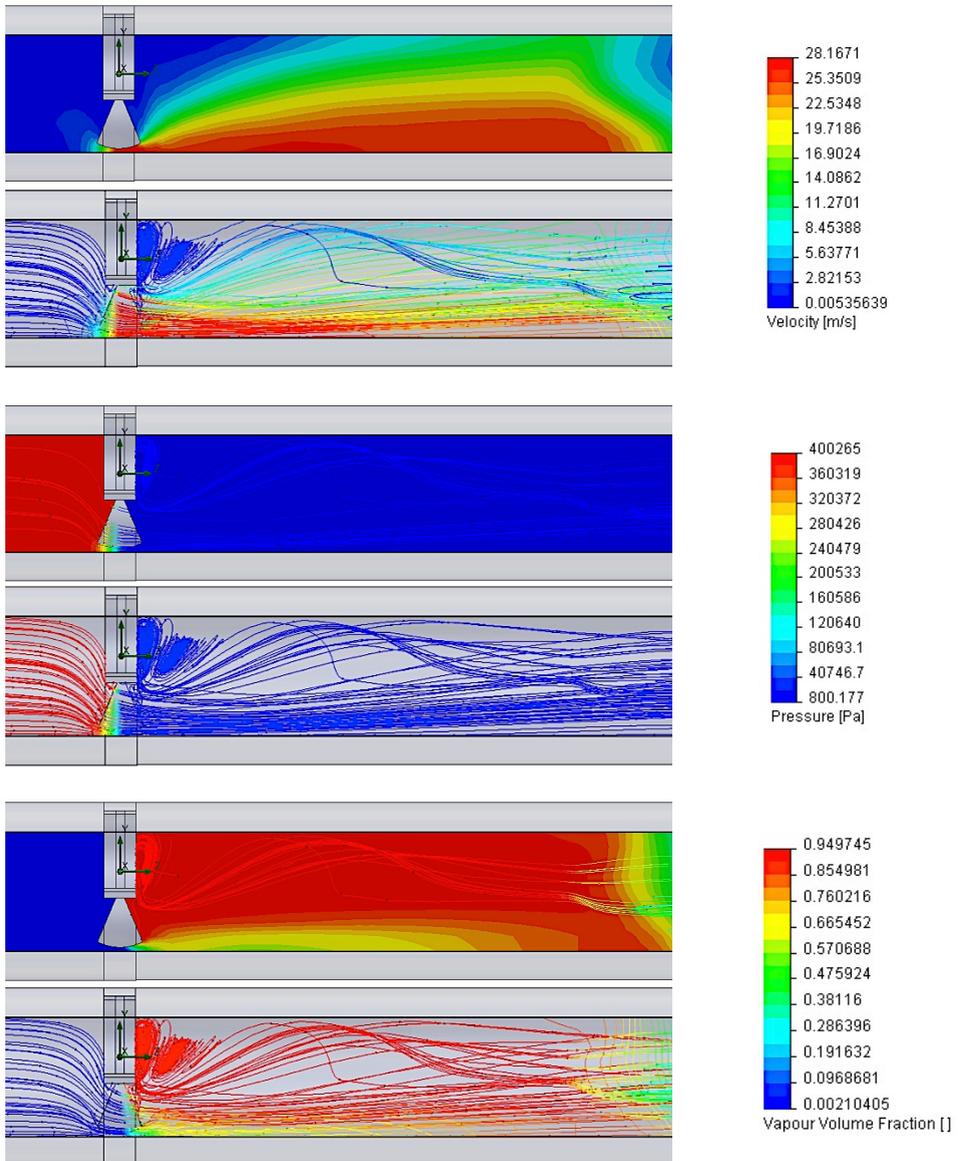


Fig. 3.66.- Líneas de corriente y mapa de isolíneas sección longitudinal central VN $h=3\text{ mm}$, $P=40\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

3.3.3.- VN. Abertura $h=3\text{ mm}$, $P=60\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

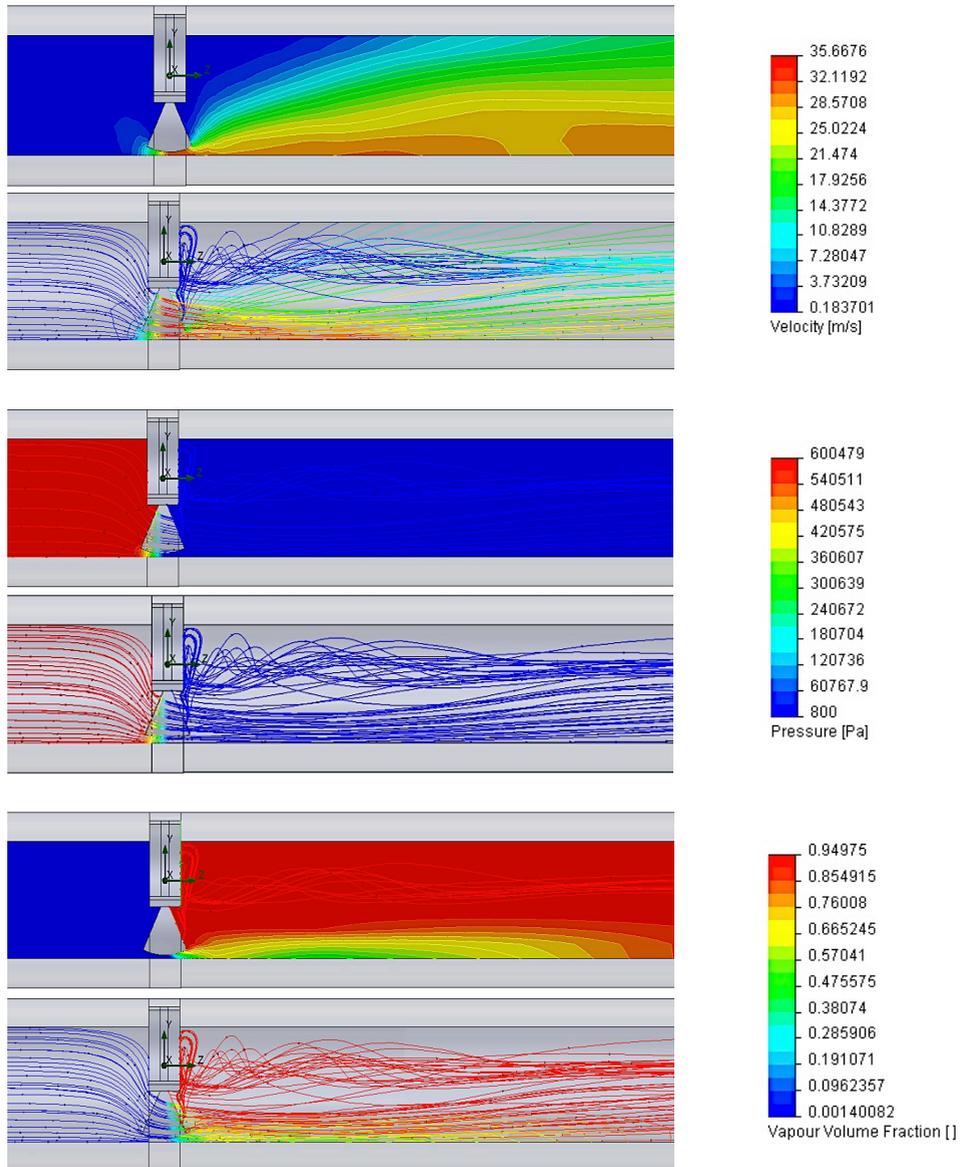


Fig. 3.67.- Líneas de corriente y mapa de isóneas sección longitudinal central VN $h=3\text{ mm}$, $P=60\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

3.3.4.- VN. Abertura $h=3\text{ mm}$, $P=80\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

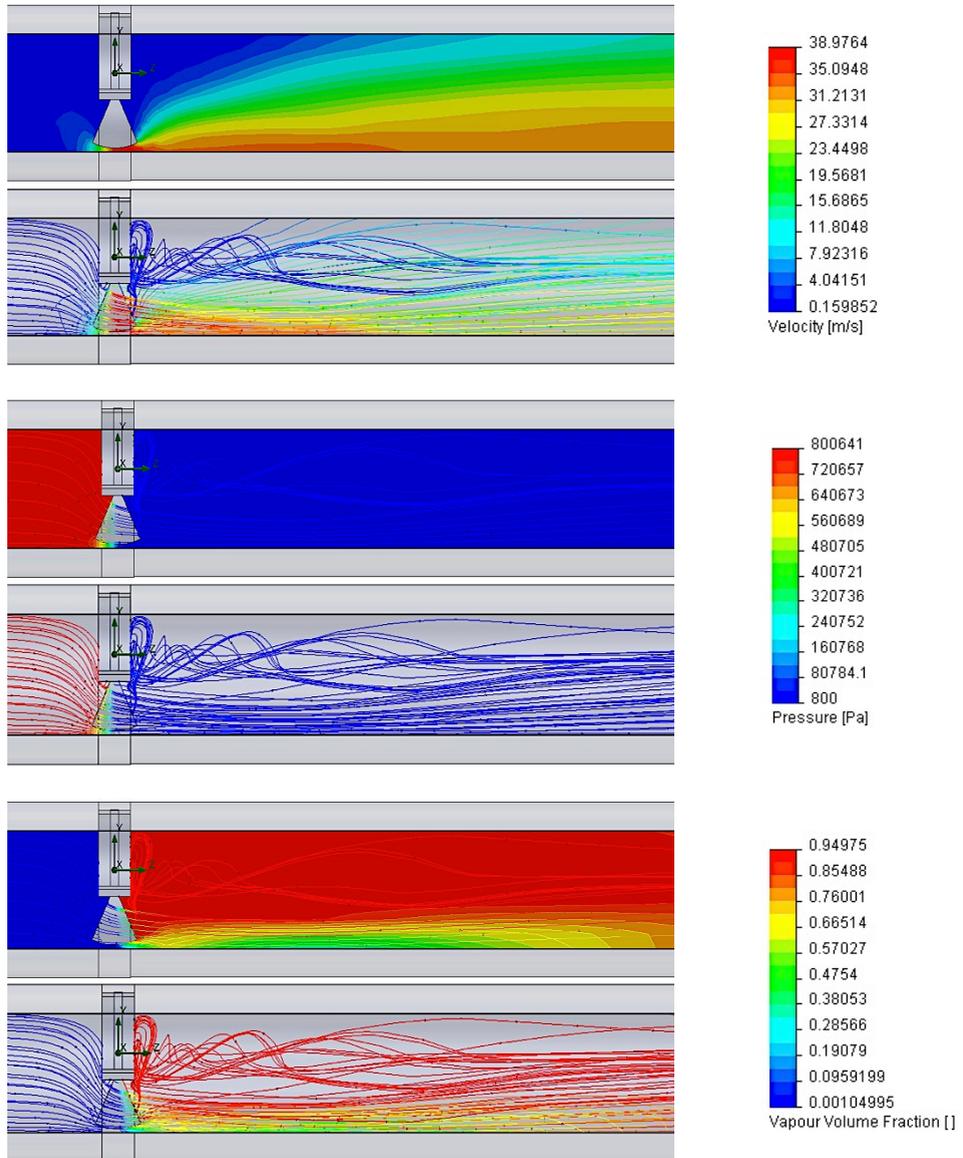


Fig. 3.68.- Líneas de corriente y mapa de isocías sección longitudinal central VN $h=3\text{mm}$, $P=80\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

3.3.5.- VN. Abertura $h=6\text{ mm}$, $P=40\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

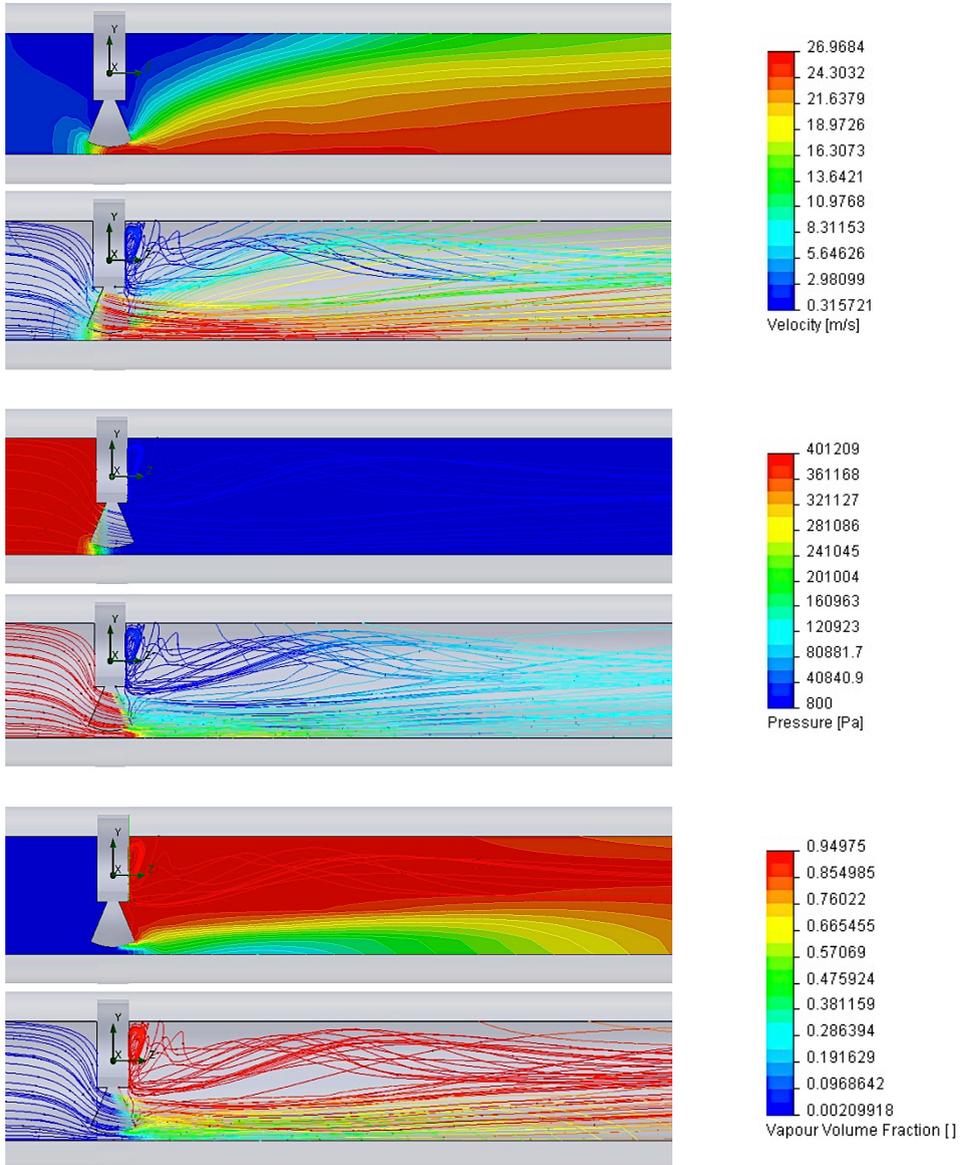


Fig. 3.69.- Líneas de corriente y mapa de isóneas sección longitudinal central VN $h=6\text{mm}$, $P=40\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

3.3.6.- VN. Abertura $h=6\text{mm}$, $P=80\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

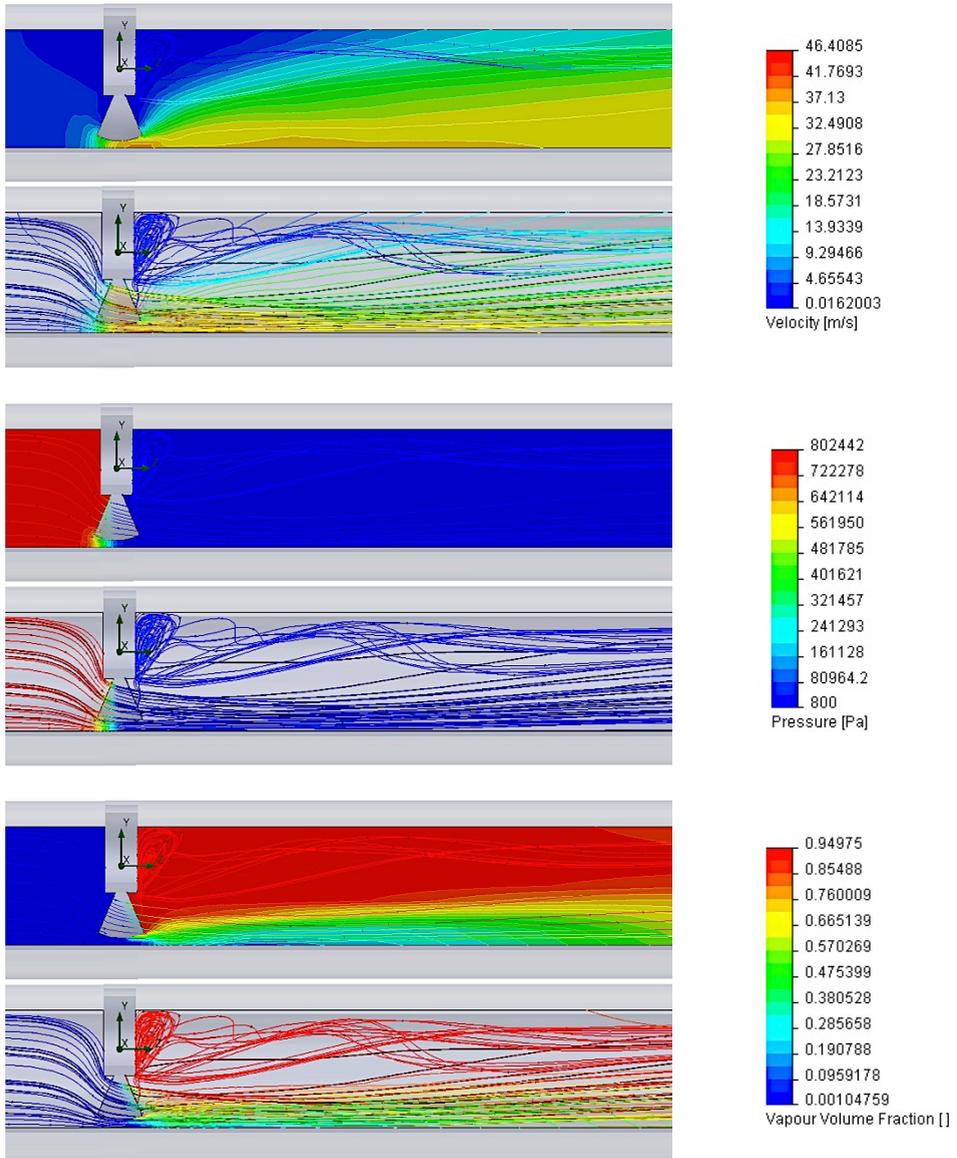


Fig. 3.70.- Líneas de corriente y mapa de isocías sección longitudinal central VN $h=6\text{mm}$, $P=80\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

3.3.7.- VN. Abertura $h=9\text{mm}$, $P=40\text{ mca}$, $Q=20\text{ l/s}$.

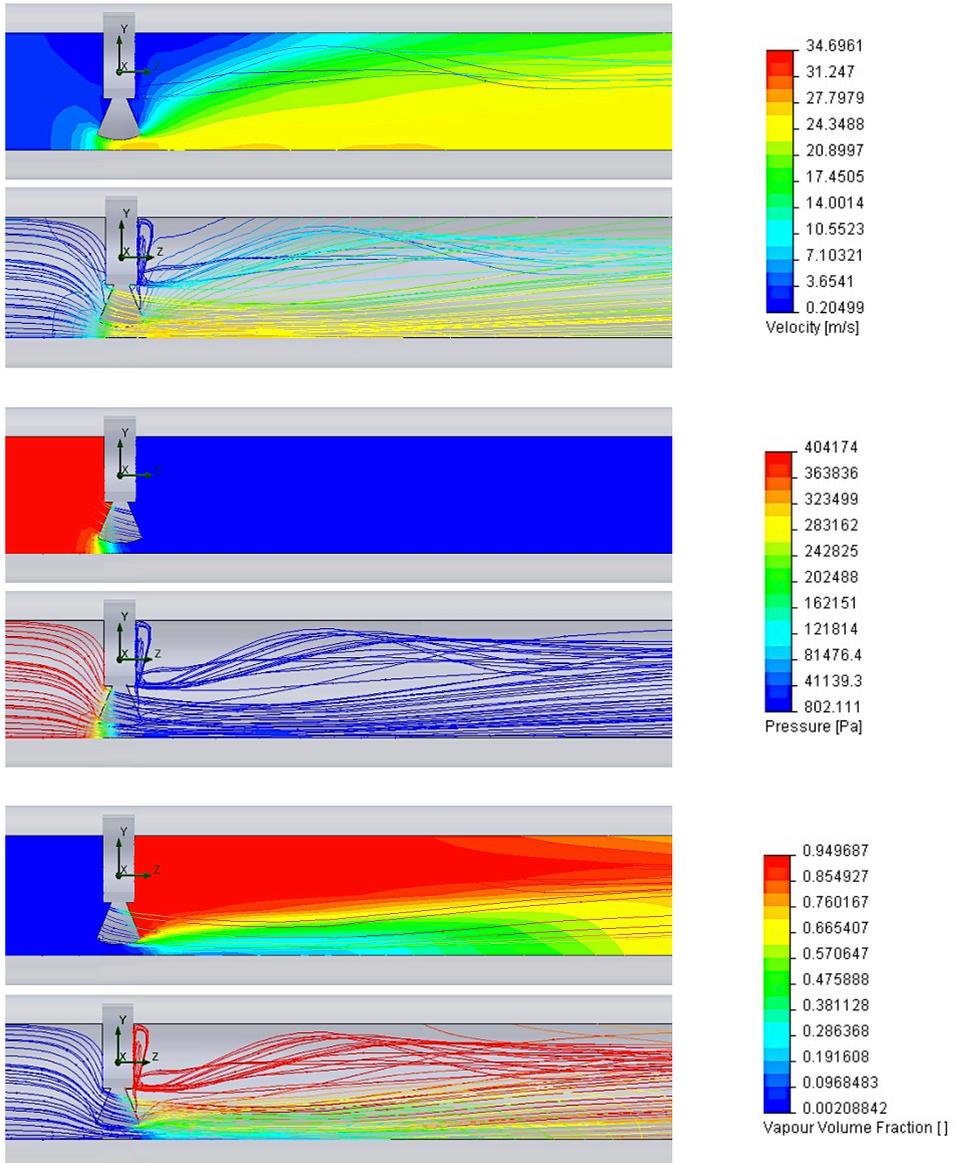


Fig. 3.71.- Líneas de corriente y mapa de isóneas sección longitudinal central VN $h=9\text{mm}$, $P=40\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$. Velocidad, Presión y Facción Volumen de vapor del agua.

**3.3.8.- VN. Resumen para $h=6$ mm, $P=20, 40$ y 80 mca, $Q=20$ l/s;
 $h=9$ mm, $P=40$ y 80 mca, $Q=20$ l/s.**

El resumen de los resultados obtenidos de presión, densidad, temperatura y fracción volumen de vapor respecto a la anchura de la compuerta para cada una de las series y caudal de 20 l/s para $h=6$ mm y 9 mm $z=21,385$ mm se muestra en las figuras 3.72; 3.73; 3.74 y 3.75.

VÁLVULA DE COMPUERTA SIN RESALTE. Abertura $h=6$ y 9mm, y temperatura del agua 273,15 K

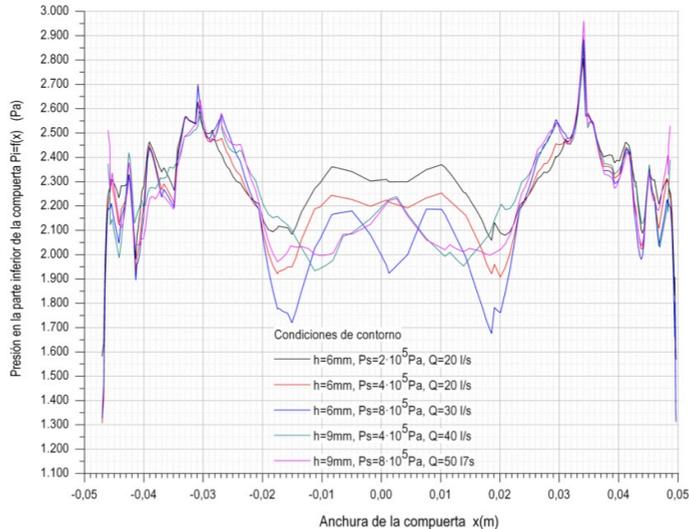


Fig. 3.72.- Correlación P vs. Anchura compuerta. Altura $h=6$ y 9mm, $z=21,385$ mm.

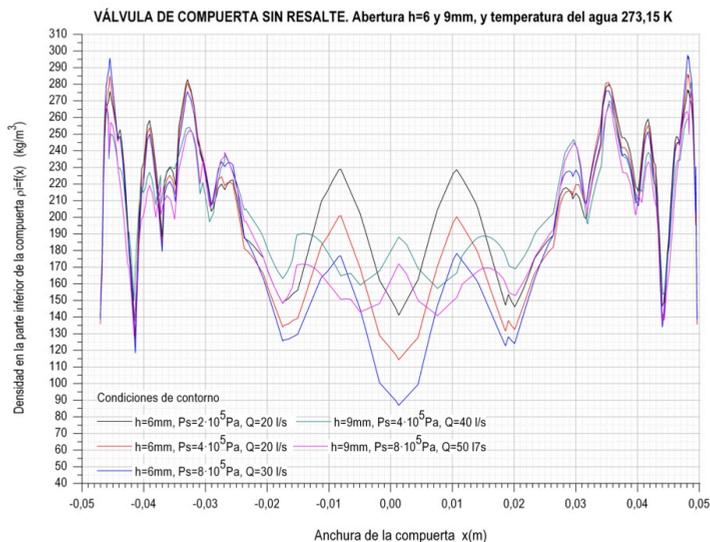


Fig. 3.73.- Correlación ρ vs. Anchura compuerta. Altura $h=6$ y 9mm, $z=21,385$ mm.

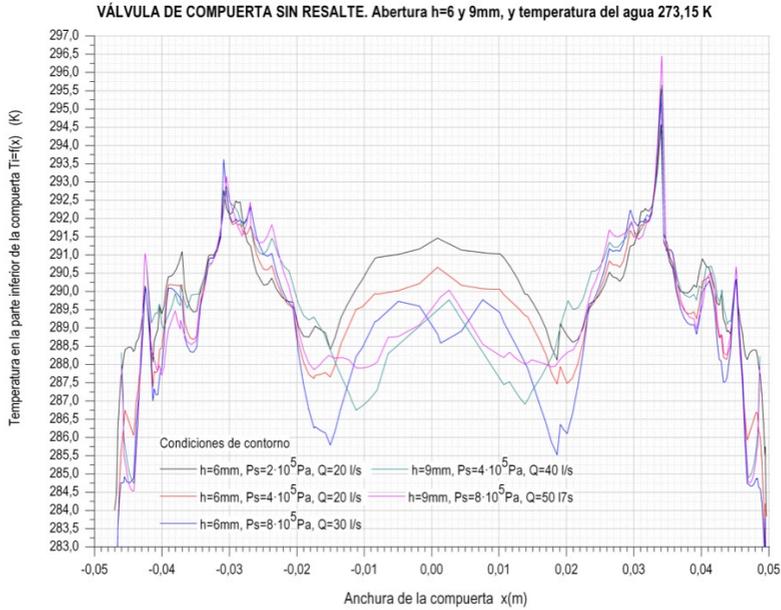


Fig. 3.74.-Correlación T vs. Anchura compuerta. Altura $h=6$ y 9 mm, $z=21,385$ mm.

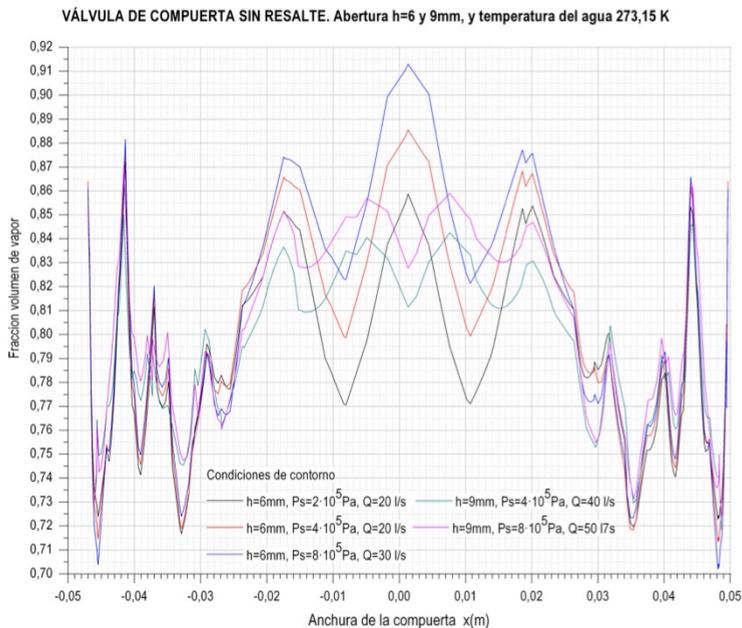


Fig. 3.75.-Correlación VP vs. Anchura compuerta. Altura $h=6$ y 9 mm, $z=21,385$ mm.

La valoración del resumen de los resultados obtenidos en las *figuras 3.72; 3.73; 3.74 y 3.75*, para cada una de las series a estudio para $z=21,385$ mm es la siguiente:

1. Las curvas de Presión, Densidad, Temperatura y Fracción del volumen de vapor vs. Anchura de la compuerta, para cada una de las series $h=6$ mm $P=20, 40$ y 80 mca y $h=9$ mm $P=40$ y 80 mca para un caudal $Q=20$ l/s, son semejantes en su trazado aunque variables en su cuantificación (*figuras 3.72; 3.73; 3.74 y 3.75*).
2. Los valores máximos de la presión se encuentran localizados a una cota $x=\pm 30$ mm. Y los valores mínimos se localizan en dos tramos, el primero de ellos se encuentra en una franja comprendida entre $x=\pm 10$ y ± 20 mm, y el segundo a partir de $x=\pm 40$ mm (*figura 3.72*).
3. A partir de los resultados del apartado anterior (1) la velocidad máxima del fluido no se encuentra en la parte central de la tobera de la compuerta ($x=0$) sino desplazada donde la presión es mínima. Y lo mismo ocurre para la velocidad mínima del fluido localizada donde la presión es máxima.
4. Las velocidades máximas se concentran en el arco que describe la parte inferior de la compuerta y el cuerpo inferior de la válvula (*figura 3.84*).
5. La variación de la presión a lo largo de la anchura de la compuerta cuyos resultados vienen dados por la *figura 3.72* proporciona una velocidad aproximadamente uniforme evitando **la formación de lóbulos** en la parte inferior del cuerpo de la válvula (*figura 3.84*).
6. La variación de los valores máximos y mínimos de la densidad y de la temperatura para cada serie estudiada es relativamente muy pequeña, lo que confirma que la viscosidad cinemática del agua inicial se mantiene prácticamente constante.

3.3.- Análisis.

3.3.1.- Válvula antiguo diseño o con resalte hidráulico (VA).

De todos los casos estudiados en este tipo de válvulas el estado más desfavorable corresponde a la abertura $h=3\text{mm}$, $P=20\text{mca}$ y $Q=20\text{l/s}$ coincidente con el modelo hidráulico. En la *figura 3.76* se aprecia que las elevadas velocidades se concentran en la parte inferior de la válvula y de la tubería con resaltos hidráulicos relativamente muy pequeños, originando erosiones fuertes tanto en la válvula como en la tubería.

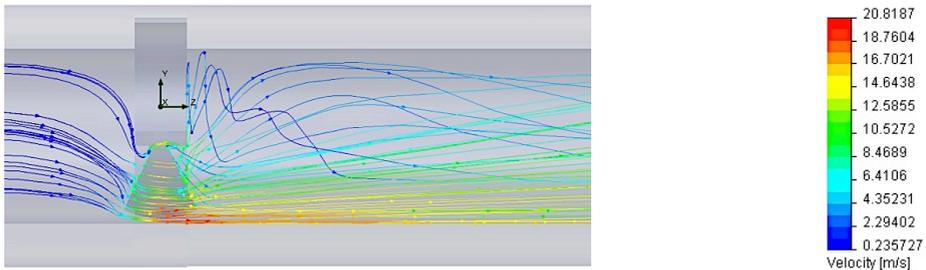


Fig. 3.76.- Trayectoria de las líneas de corriente y mapa de isolíneas de la velocidad en la sección longitudinal central VA $h=3\text{mm}$, $P=20\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$ (figura 3.11).

A continuación se describe en las *figuras 3.77; 3.78; 3.79 y 3.80* los resultados obtenidos en la sección transversal de la válvula a la cota $z=21,385\text{mm}$, cara exterior de la compuerta.

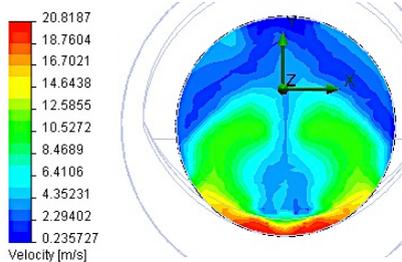


Fig. 3.77.- Velocidad (fig. 3.8).

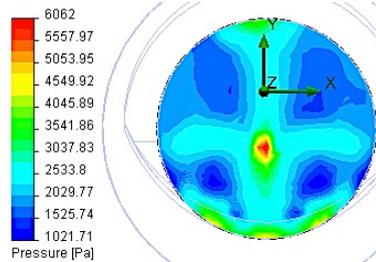


Fig. 3.78.- Presión (fig. 3.8).

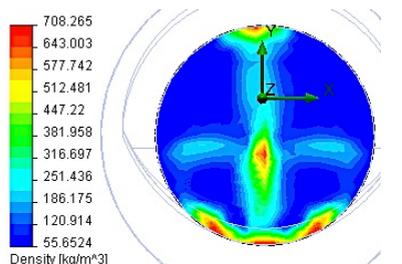


Fig. 3.79.- Densidad (fig. 3.9).

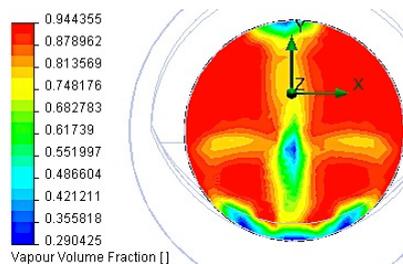


Fig. 3.80.- Fracción volumen de vapor (fig. 3.10).

La cavitación no se inicia en el estrangulamiento de la compuerta, a una distancia $z=66$ mm y a una cota de $x= \pm 25$ mm por simetría de forma y de carga, *figura 3.81*. Una vez iniciada la cavitación con arranque de material, la erosión se propaga hacia la compuerta debido a la elevada velocidad existente en este tramo y se acelera justamente al pie de la válvula donde la velocidad del fluido es máxima.

En las *figuras 3.77; 3.78; 3.79 y 3.80* se observa la aparición de **2 lóbulos** simétricos al eje Y de la válvula en su generatriz inferior que pronostica la forma que va a adquirir el arranque del material semejante a la patología presentada en el *capítulo 2 Detalles experimentales* correspondiente a las *figuras 2.7; 2.8; 2.9 y 2.10* en forma y simetría.

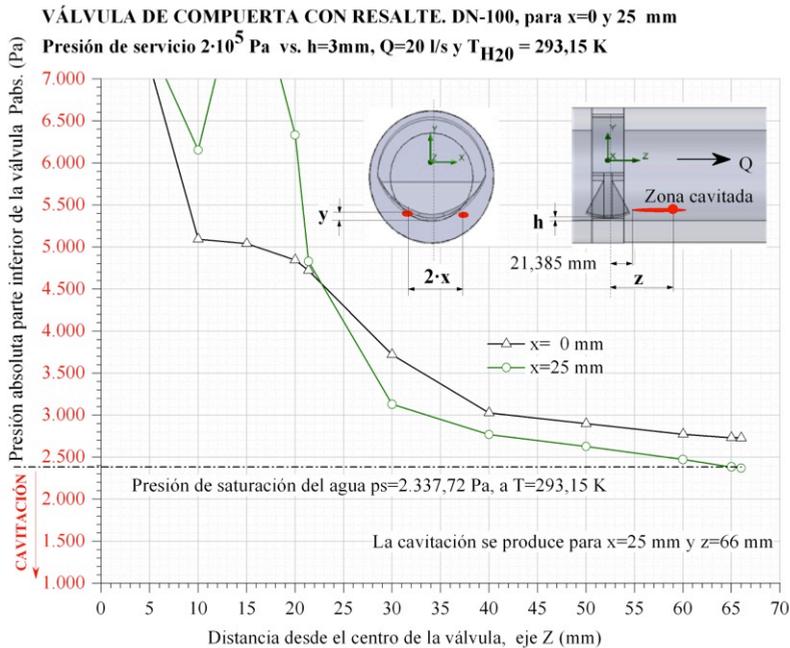


Fig. 3.81.- Correlación Pabs vs. Distancia z. Valores de $x=0$ y 25 mm.

En la *figura 3.82* se han representado las características del fluido para la cota $x=25$ mm, donde se inicia la cavitación.

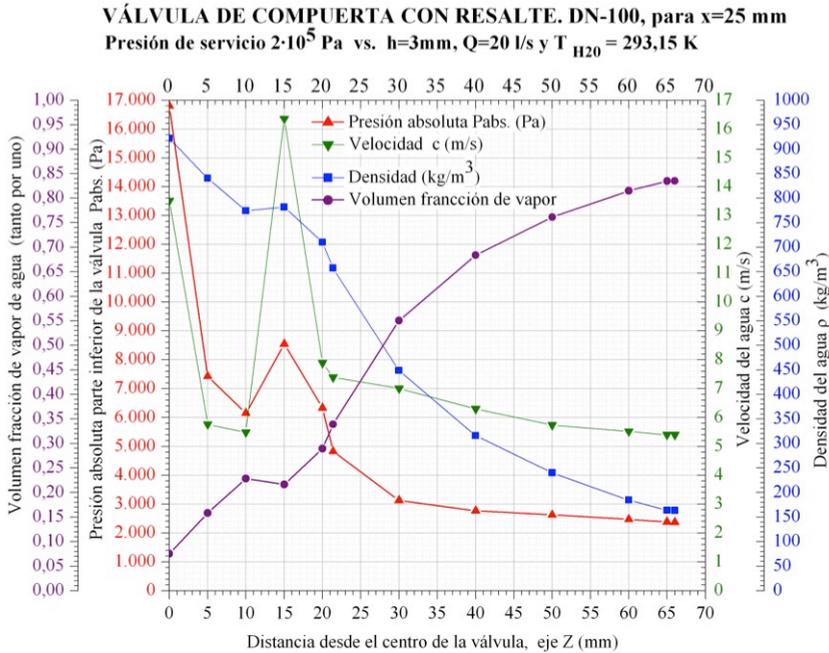


Fig. 3.82.- Correlación P_{abs} , ρ , r , F_v vs. Distancia z . Valor de $x=25$ mm.

Se aprecia en la *figura 3.82* que para $z=15$ mm (interior de la tobera) la velocidad y presión son máximas, existiendo un aumento relativo de densidad y una disminución del volumen de la fracción del vapor de agua.

3.3.2.- Válvula nuevo diseño o sin resalte hidráulico (VN).

Para realizar la comparativa con el nuevo diseño propuesto por el fabricante para el mismo estado de servicio que en el caso anterior $h=3\text{mm}$, $P=20\text{mca}$ y $Q=20\text{ l/s}$, se observan dos características bien definidas, por una parte una distribución más uniforme de la velocidad a lo largo del eje Z, *figura 3.83* y por otra parte, para la misma abertura h de la compuerta, la sección de paso del fluido es mayor en la válvula sin resalte, mientras que los valores obtenidos de presión, velocidad, densidad del fluido y fracción del volumen del vapor para la sección de $z=21,385\text{mm}$ son muy similares en cuantía pero no en su distribución a lo largo de la sección transversal de la vena líquida, siendo más uniformes y no generando lóbulos, *figuras 3.84; 3.85; 3.86 y 3.87*.

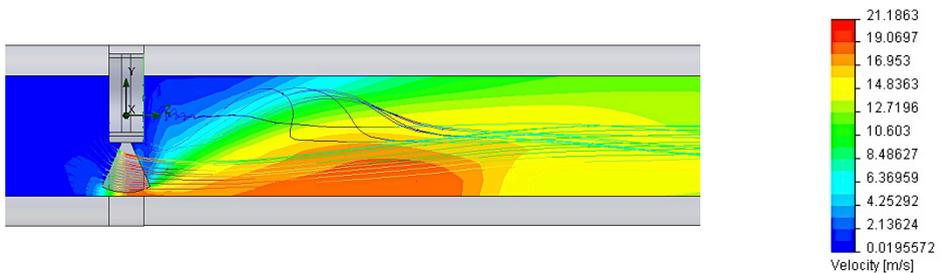


Fig. 3.83.-Trayectoria de las líneas de corriente y mapa de isocías de la velocidad en la sección longitudinal central VN $h=3\text{mm}$, $P=20\text{mca}$, $Q=20\text{l/s}$ (fig. 3.65).

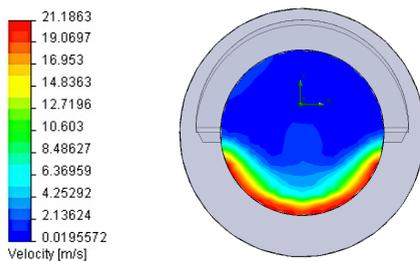


Fig. 3.84.- Velocidad.

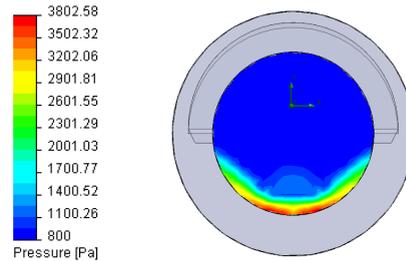


Fig. 3.85.- Presión.

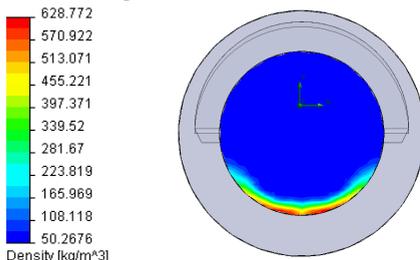


Fig. 3.86.- Densidad.

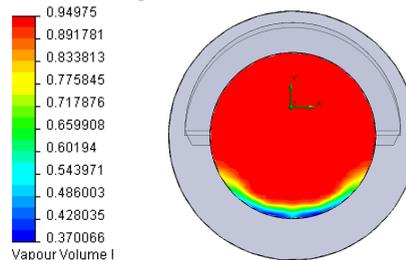


Fig. 3.87.- Fracción volumen de vapor.

La cavitación se inicia a una distancia $z=40$ mm a una cota $x=\pm 38$ mm por simetría de forma y carga, *figura 3.88*. Por similitud con el caso anterior es de esperar que la propagación de la erosión en el cuerpo de la válvula llegue hasta la compuerta dado que en este diseño la velocidad del agua en este tramo es mayor que en el caso anterior.

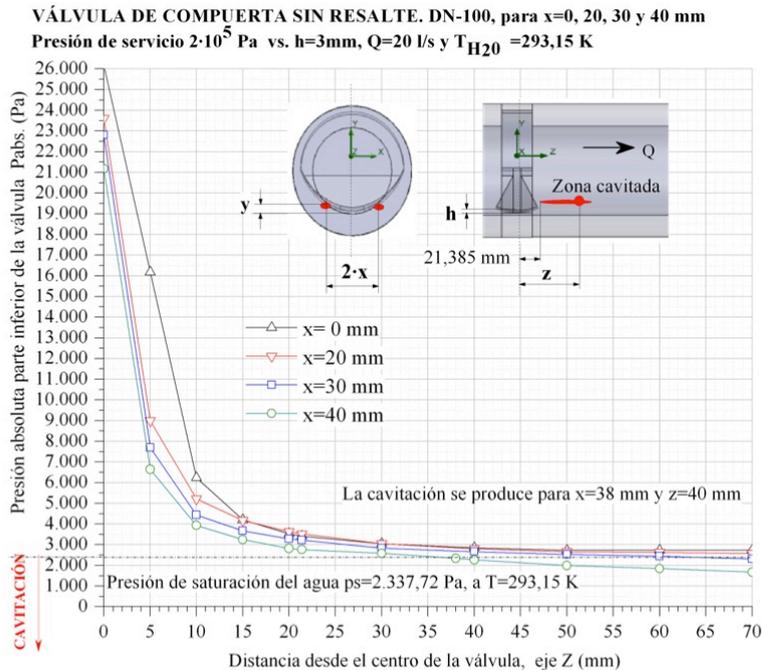


Fig. 3.88.- Correlación P_{abs} vs. Distancia z . Valores de $x=0, 20, 30$ y 40 mm.

No obstante, para poder confirmar esta hipótesis sería recomendable realizar el estudio experimental.

En la *figura 3.89*, se han representado los valores de la presión, velocidad, densidad y fracción del volumen de vapor, para $z=40$ mm (inicio de la cavitación), alcanzándose la velocidad máxima a una distancia de $z=21,385$ (salida de la tobera de la compuerta).

VÁLVULA DE COMPUERTA SIN RESALTE. DN-100, para $x=40$ mm
 Presión de servicio $2 \cdot 10^5$ Pa vs. $h=3$ mm, $Q=20$ l/s y $T_{H_2O} = 293,15$ K

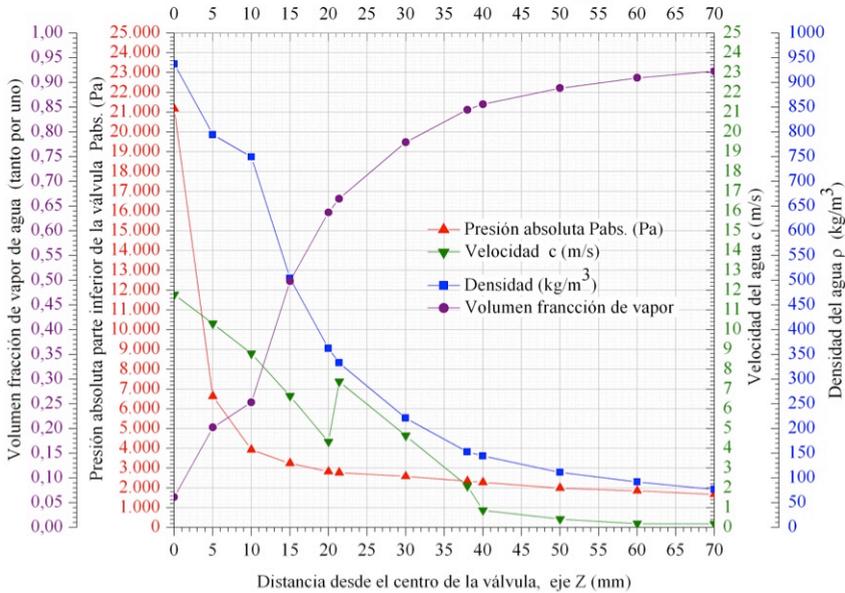


Fig. 3.89.- Correlación Pabs, c, ρ , Fv vs. Distancia z. Valor de $x=40$ mm.

Por comparativa con el caso anterior, en la *figura 3.89* no se aprecian cambios bruscos significativos en las curvas de presión, densidad y volumen fracción de vapor a excepción de la velocidad donde se aprecia un incremento de la velocidad para una distancia de $z=22$ mm, tal vez producido por las turbulencias generadas por las burbujas de vapor de agua.

4. CONCLUSIONES.

4.1.- Resumen.

Las conclusiones que a continuación se exponen solamente son válidas para las válvulas de diámetro nominal DN-100 para el fabricante Belgicast, no siendo extensible para otro tipo de diámetros y marca comercial.

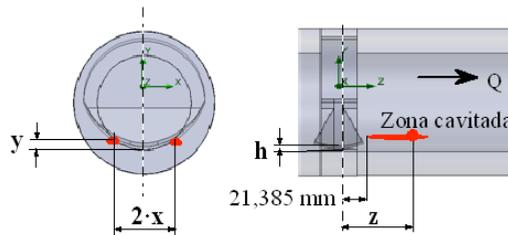
- a. El comportamiento de la erosión-cavitación en válvulas hay que analizarlo para cada caso en concreto de diseño, presión y caudal.
- b. En la actualidad los fabricantes de válvulas proporcionan los valores de la correlación de la Pérdida de carga o de presión vs. Caudal, no aportando las condiciones de la medición de ensayo. Así mismo ningún fabricante de los catálogos comerciales consultados aporta las condiciones de abertura de válvula, presión y caudal a partir de las cuales se inicia el fenómeno de erosión-cavitación, solamente se limitan a mencionar que no son válvulas aptas para la regulación.
- c. La formación de la patología por erosión-cavitación poseen un denominador común atribuible al grado de abertura de la compuerta, cuanto más pequeña es la altura de abertura se alcanza con mayor facilidad la depresión del fluido y en consecuencia el fenómeno de la cavitación. En los dos casos estudiados aparece en el cuerpo metálico de fundición en su parte inferior de la válvula de forma simétrica al eje Y de la válvula, por existir simetría de forma y de carga.
- d. La utilización de materiales poliméricos en la compuerta (EPDM) es totalmente adecuado. La justificación de utilizar este material es por ser totalmente elástico lo cual permite el cierre total de la vena líquida por deformación del propio material recuperando su forma inicial (memoria) cuando la válvula se encuentra parcialmente abierta, y lo más importante, debido a su elasticidad permite la deformación sin arranque del material en estados de cavitación o de erosión por el arrastre del sílice que lleva el agua procedente del acuífero o del propio material metálico de la válvula.
- e. El inicio de la patología se realiza mediante la cavitación en el cuerpo inferior metálico de la válvula alejado de la compuerta y su propagación se realiza aguas arriba hasta alcanzar el pie de la válvula debido al fenómeno de la erosión por las altas concentraciones de velocidad entre estos dos tramos. Llegan-

do a perforar el cuerpo de la válvula donde se concentra la máxima velocidad del fluido cuando la abertura de la compuerta es pequeña.

f. De la comparativa analizada entre los dos diseños de válvula, de nuevo diseño o sin resalte hidráulico (VN) y de antiguo diseño o con resalte hidráulico (VA) se desprenden las siguientes conclusiones:

f.1 La válvula VN no está exenta del fenómeno de erosión-cavitación, lo que se obtiene con este nuevo diseño es desplazar las coordenadas (x , y , z) del punto de inicio de la patología con respecto a la válvula VA.

f.2 Las coordenadas de inicio de la cavitación dependen de las condiciones de contorno de la válvula: Altura de abertura, presión y caudal. Para el estado modelizado $h=3\text{mm}$, $P=20\text{mca}$ y $Q=20\text{ l/s}$ para cada una de las válvulas VA y VN *figura 4.1* son:



*Fig. 4.1.- Vista frontal y longitudinal de la válvula.
Coordenadas inicio de la cavitación.*

VA: $x=\pm 25\text{ mm}$; $z=66\text{ mm}$.

VN: $x=\pm 38\text{ mm}$; $z=40\text{ mm}$.

En la válvula VA aparecen 2 lóbulos simétricos al eje Y (*figura 2.8 y 3.77*) que indican cual va a ser la morfología de la patología, mientras que en la válvula VN no se tienen resultados de laboratorio para poder afirmar cual será su morfología, no obstante cabe esperar que ésta sea uniforme en base a los resultados obtenidos en la modelización obtenida por MEF (*figura 3.84*).

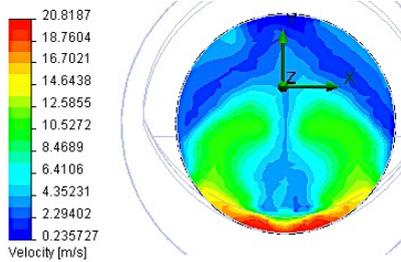


Fig. 3.77.- Velocidad (fig. 3.8).



Fig. 2.8.- Sección transversal vena líquida compuerta totalmente abierta.

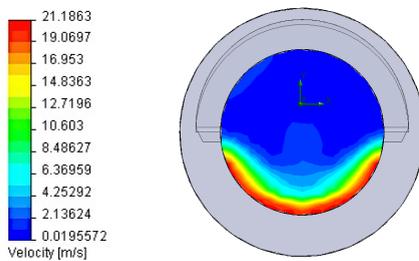


Fig. 3.84.- Velocidad.

- f.3 Las curvas de correlación entre la Presión, Densidad, Temperatura y Fracción volumen de vapor vs. Anchura de la compuerta para la válvula VN son relativamente más planas que para la válvula VA, para cualquier condición de contorno.
- g. El cuerpo de la válvula esta formada por una matriz metálica de ferrita más perlita con inclusiones de grafito esferoidal, posee la particularidad de poseer huecos que permite acelerar la cavitación una vez iniciada. No obstante, la elección por parte del fabricante en optar por inclusiones esferoidales le aporta al material una resistencia a la tracción y a la flexión mucha más elevada que la fundición con grafito laminar, conveniente para resistir los esfuerzos mecánicos correspondientes a la presión de servicio, de trabajo y a la de choque (transitorios), además las inclusiones esferoidales le aportan al material una elevada plasticidad (10 y 15% alargamiento) mayor que el grafito laminar, vermicular y nodular, lo cual contribuye en mejor medida a amortiguarla vibración producida por la cavitación [23].

- h. La justificación de utilizar la fundición en las válvulas viene condicionada por tener mejores propiedades para la fusión y colada que el acero para piezas de grandes dimensiones [32]. El hecho de que su temperatura de fusión sea más baja y que la cristalización finalice a temperatura constante (formación eutéctica), no solo hace que el trabajo sea más fácil, sino también que la fluidez del líquido sea mayor y se llenen mejor los moldes. La presencia del grafito posee ventajas sobre el acero: primero, porque la existencia del grafito facilita la mecanización, hace que la viruta sea frágil y se rompa cuando la herramienta llega a la inclusión del grafito; segundo, la fundición tiene buenas propiedades de antifricción debido a sus cualidades lubricantes; tercero, la existencia de segregaciones de grafito amortigua rápidamente las vibraciones y las oscilaciones de resonancia y cuarto, la fundición es casi insensible a las incisiones.

4.2.- Recomendaciones.

Con la finalidad de mejorar el producto se recomienda:

1. No utilizar este tipo de válvulas para regular la presión y caudal en las redes. Este tipo de válvulas no son aptas para la regulación. Su diseño está concebido para su apertura en todo o nada.
2. Para poder regular el caudal y la presión es aconsejable utilizar válvulas reguladoras y sostenedoras comerciales.
3. Para el tipo de válvula de fundición estudiada es muy difícil evitar la cavitación para pequeñas aberturas de la compuerta. Se aconseja realizar en la parte interior del cuerpo de la válvula un tratamiento superficial en ambos lados de la compuerta con materiales elásticos como el EPDM capaces de resistirlas las elevadas implosiones para pequeñas aberturas de la compuerta.
4. De forma general se aconseja para la elección de este tipo de válvulas, aquellas que posean el arranque de las guías de la compuerta lo más elevadas posible, con la finalidad de disminuir las turbulencias aguas abajo de la compuerta y con ello la pérdida de carga secundaria y por otro lado, disminuir la concentración de la erosión cavitación y hacer que esta patología sea más uniforme consiguiendo de este modo alargar su vida útil.



4.3.- Temas de investigación.

El trabajo desarrollado puede ser objeto de posteriores estudios de investigación y tesis doctorales. Los temas que se plantean son los siguientes:

- A. Morfología a nivel micro-estructural de la erosión - cavitación para distintos tipos de materiales, metálicos y poliméricos.
- B. Corrosión exterior por ataque químico del suelo en los materiales metálicos.
- C. Creep en las tuberías poliméricas sometidas a ciclos de fatiga por variación de presión en su interior.
- D. Comportamiento de las tuberías poliméricas sometidas a presión frente a la porosidad de las mismas.
- E. Ensayo y construcción de curvas de correlación mediante modelos matemáticos de la rugosidad de tuberías comerciales nuevas y la estimada mediante envejecimiento del sistema provocado por la calidad del agua.
- F. Estudio predictivo aplicado a la teoría del fallo de las instalaciones de abastecimiento de agua potable.

5. REFERENCIAS.

- [1] M.G. Fontana, *Corrosion Engineering*. McGraw-Hill, New York, 1986.
- [2] C.P. Dillon (Ed.): *Forms of Corrosion - Recognition and Prevention*: NACE Handbook 1, Vol. 1, NACE International, Houston, 1982.
- [3] Merkle, C.L. Feng, J. & Buelow, *Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation*. 3rd International Symposium on Cavitation, Grenoble, France. P.E.O., 1998.
- [4] K.W.Shin, P.Andersen, R. Mikkelsen, *Cavitation Simulation on Conventional and Highly-Skewed Propellers*, Second International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany, June 2011.
- [5] Claudio Mataix, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, México: Oxford University Press, 2ª ed., 2004.
- [6] Carlos Ferrer Giménez, *Diagnóstico del comportamiento en servicio de materiales*. Ref.: 2006.4063, Editorial UPV 2006.
- [7] Romero Sedó, A.M.; Arrué Burillo P., *Cálculo de instalaciones hidrosanitarias con software para calculadora gráfica HP y Excel:(adaptado al CTE, exigencias HS-4 y HS-5*. Ref.: 792, 794, Editorial UPV. 2010.
- [8] Radcom Technologies Ltd – Mejoras Energéticas S.A. *Software para registradores de datos (Radlog for Windows)* ver. 4.50, 2002.
- [9] Lewis A. Rossman, Drinking Water Research Division Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, Ohio. *Software Environmental Protection Agency (EPANET)*, United States, ver. 2.0, 2002.
- [10] Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos. *Software de análisis de redes de agua (SARA)*, , UPV, ver. 1.3, 2003.
- [11] Romero Sedó, A.M., *Diagnóstico y acciones correctoras del comportamiento en servicio de los materiales que componen las redes hidráulicas de aguas potables de abastecimiento a poblaciones medias. Elaboración de un modelo de simulación y análisis de la influencia del deterioro de los materiales sobre el funcionamiento de la red*. Signatura I D-PFC/08517, ETSII UPV 2010.



- [12] Hermann Sewerin GmbH. *Equipo inalámbrico de lectura alimentado por batería (logger), SePem 01/SePem 01 Master*, 2006.
- [13] Radcom Technologies Ltd – Mejoras Energéticas S.A. *Equipo control sectorial con transmisión de datos por SMS (Multilog SMS)*, 2002.
- [14] Darcy, M.H., *Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux*, Mallet-Bachelier. Paris, 1857. Weisbach, Julius. *Die Experimental-Hydraulik*, J.G. Engelhardt, Frieberg, 1855.
- [15] Colebrook, C.F., *Turbulent Flow in Pipes, with Particular referent to the Transition region between Smooth and Rough pipe Laws*. J. Inst. Civil Engrs., Londres febrero 1939.
- [16] Rahal, C.M., Sterling, M.J.H., Coulbeck, B., *Parameter Tuning for Simulation Models of Water Distribution Networks*. Proc. Inst. Civ. Engrs. Sept 1980, 69(2), pp. 751-762, 1980.
- [17] Lansey, K.E., *A Procedure for Water Distribution Network Calibration Considering Multiple Loading Conditions*. International Symposium on Computer Modelling. Kentucky Water Resources Research Institute. University of Kentucky. Lexington, 1988.
- [18] García-Serra, J., *Estudio y mejora de las técnicas de Calibración de Modelos de Redes Hidráulicas*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 1988.
- [19] García-Serra, J., Martínez, F., Bastida, A., *Calibrating Techniques of Hydraulic Network Models*, International Symposium on Water Resources System Application, Winnipeg (Canada), June 1990.
- [20] Donachie, A., *Digital Program for Water Network Analysis*. J., of the Hydraulic Division ASCE. March 1974, pp. 293-403, 1974.
- [21] Software Ces Selector.
- [22] Hermann Sewerin GmbH. *Equipo portátil para localización de fugas de agua AQUAPHON A 100*, 2006.
- [23] A.P. Guliáiev, *Metalografía, tomo I y II*. URSS Moscú 1994.



- [24] ASM Handbook, Vol. 9, *Metallography and Microstructures*, 2004.
- [25] O.C. Zienkiewicz – R.L. Taylor, *El método de los elementos finitos, Dinámica de fluidos*, vol. 3 5ª ed., Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España (CIMNE), 2004.
- [26] R. Temam, *The Navier-Stokes Equation*, North-Holland, 1977.
- [27] H. Lamb, *Hydrodynamics*, 6ª ed., Cambridge Univ. Press, 1932.
- [28] C.K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge Univ. Press, 1967.
- [29] C. Hirsch, *Numerical Computation of Internal and External Flows*, Vol. 1, Wiley, Chichester, 1988.
- [30] P.J. Roach, *Computational Fluid Mechanics*, Hermosa Press, Albuquerque, New Mexico, 1972.
- [31] Software elementos finitos (MEF). *SolidWorks, Flow Simulation*, ver. 2011.
- [32] A. Suárez Sanabria y J. Fernández Carrasquilla, *Microestructura y propiedades mecánicas de una función esferoidal ferrítica en bruto de colada para su uso en piezas de grandes dimensiones*. Revista de metalurgia, 42 (1), enero-febrero, 18-31, 2006.