

Capítulo 7

Resultados experimentales

A continuación mostraremos las medidas obtenidas en el laboratorio para el dispositivo fabricado en el capítulo anterior. A partir de estos valores, caracterizaremos nuestra microválvula, comprobando en qué medida los resultados experimentales se ajustan al modelo teórico descrito.

7.1 Preparación de los ensayos

Antes de proceder a los ensayos en el laboratorio, se fabricó un montaje sencillo que permitiese acoplar dos válvulas en su interior para ser conectada cada una de forma independiente a una bomba de presión externa. Recordemos que el PCB fue cortado de modo que tuviésemos cuatro grupos de dos válvulas, estando diseñado cada grupo para encajar perfectamente en este montaje.

Principalmente, el sistema consta de dos láminas rígidas de aluminio del mismo tamaño y su función consiste en presionar ambas válvulas a modo de sándwich para evitar fugas de presión a través de sendos orificios practicados a través del metal. Estos orificios conectan a su vez con los previamente realizados en el PCB donde se encuentra la cámara de presión, empleando para este fin una junta tórica de goma para cada orificio. Estas juntas amortiguarán el apriete realizado con el montaje de aluminio, y evitarán posibles fugas de presión una vez conectado el sistema completo con el

exterior. Para tal apriete, se prepararon varios orificios simétricos en ambas láminas de aluminio que coincidían perfectamente, con idea de emplear unos tornillos con rosca.

En la lámina de aluminio que no contiene las conexiones a presión externa se practicó un orificio rectangular que hacía las veces de ventana, para poder inspeccionar el comportamiento de la membrana a lo largo de todo el experimento. El montaje no presentaba ninguna fuga a una presión máxima de 8 atmósferas en el laboratorio, por lo que asegurábamos que toda la presión inyectada por la bomba llegaría al depósito. Este utensilio se muestra en la siguiente fotografía:

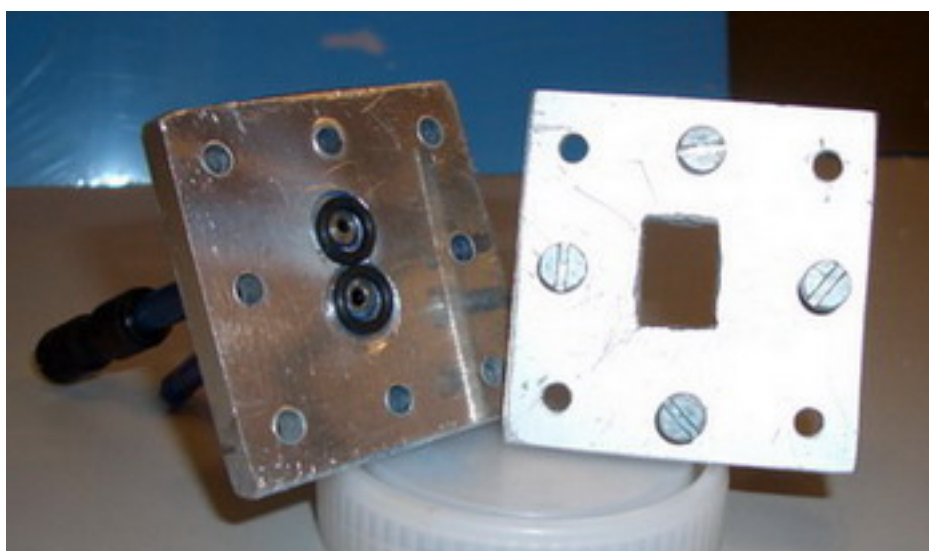


Figura 7.1: Montaje de aluminio encargado de albergar una pareja de microválvulas para poder suministrar presión a través de los orificios. 4 tornillos serán los encargados de fijar bien el conjunto.

El objetivo de este sistema consiste en evitar posibles fugas a la hora de forzar en el depósito de la microválvula presiones elevadas para realizar los ensayos en el laboratorio. Como hemos visto en capítulos anteriores, para poder ejercer una fuerza apreciable sobre una membrana de SU-8 de tan reducidas dimensiones, será necesario emplear un aporte de presión importante. Por este motivo, los experimentos finalmente se realizaron de modo que las válvulas se comportasen como microinyectores, al poder conseguir en el laboratorio una presión de hasta siete atmósferas respecto a la atmosférica con la bomba de presión de que disponemos. Si por el contrario empleásemos las válvulas como microextractores, fijaríamos el depósito a unos pocos

milibares, siendo la presión respecto a la atmosférica inferior a la unidad, necesitando así un aporte calorífico muchísimo mayor, con el correspondiente consumo de potencia.

Una vez aclarado este punto, se fabricaron en primer lugar varias válvulas con el espesor mínimo y la altura máxima de membrana que nos permitía el proceso de fabricación. La máxima relación de aspecto que se pudo obtener de esta forma se aproximaba a 13:1, siendo la anchura real de las membranas 40 μm y sus alturas 525 aproximadamente. Estas dimensiones, aplicando una presión máxima de 8 atmósferas, resultarían en una tensión mecánica sobre la estructura ligeramente inferior a los 70 MPa teóricos, valor por el cual la membrana se encontraría al límite de la rotura mediante un ensayo destructivo por presión.

Por otro lado, se fabricaron tres PCBs con válvulas de tres relaciones de aspecto diferentes siguiendo el proceso de fabricación descrito previamente y aplicando un margen de seguridad para conseguir cierta repetitividad. De este modo contábamos con ocho válvulas con un espesor de membrana de 45 μm , otras ocho con un espesor en torno a las 55 μm , para una misma altura de 495 μm y por último otras ocho con una altura de 200 μm y un espesor de 50 μm . Estas últimas, fabricadas con espesores de membrana similares a las anteriores, pero mucho menor altura, demostraron que aunque alcancemos espesores muy reducidos, será la relación de aspecto la que determine las condiciones de activación de la válvula. De este modo, resultaron relaciones de aspecto de 11:1, 9:1 y 4:1 respectivamente.

Según el modelo matemático, estas membranas de SU-8 necesitarían un aporte calorífico para poder romper, incluso a presiones muy elevadas. Concretamente, según la ecuación [14], la tensión mecánica ejercida a una presión máxima de 8 atmósferas sería 48,8 MPa, 32,7 MPa y 6,5 MPa para los tres grupos respectivamente. El objetivo consistirá por tanto en cuantificar la corriente eléctrica necesaria que, circulando por el hilo calentará esa zona de la membrana y propiciará la rotura de la misma. De este modo podremos buscar una relación de compromiso entre potencia eléctrica consumida y presión necesaria para optimizar el funcionamiento de la microválvula.

7.2 Procedimiento de medida

Para realizar los ensayos en el laboratorio se empleó una bomba de presión conectada al montaje de aluminio, unida a su vez a un manómetro externo que indicaba la presión alcanzada en el interior del depósito de la válvula. Un paso previo consistió en comprobar que ninguno de los canales de las válvulas se encontrasen obstruidos, para así asegurar que la rotura se produjese sólo en la membrana del dispositivo. También se utilizó una fuente externa de intensidad regulable, mediante la cual, conectada a los pads de las pistas de cobre, pudiésemos seleccionar la corriente que suministrábamos al microhilo presente en la válvula. Por último, los ensayos pudieron ser visualizados a través de un microscopio enfocando las zonas de interés del dispositivo, como la membrana, el hilo y el depósito de presión. El microscopio incluía una cámara portátil que podía acoplarse al objetivo y transmitir las imágenes a un ordenador en tiempo real, permitiendo hacer capturas de imágenes concretas o grabar vídeos para posteriormente analizar el comportamiento de la microválvula. Este equipamiento se muestra en la figura 7.2.

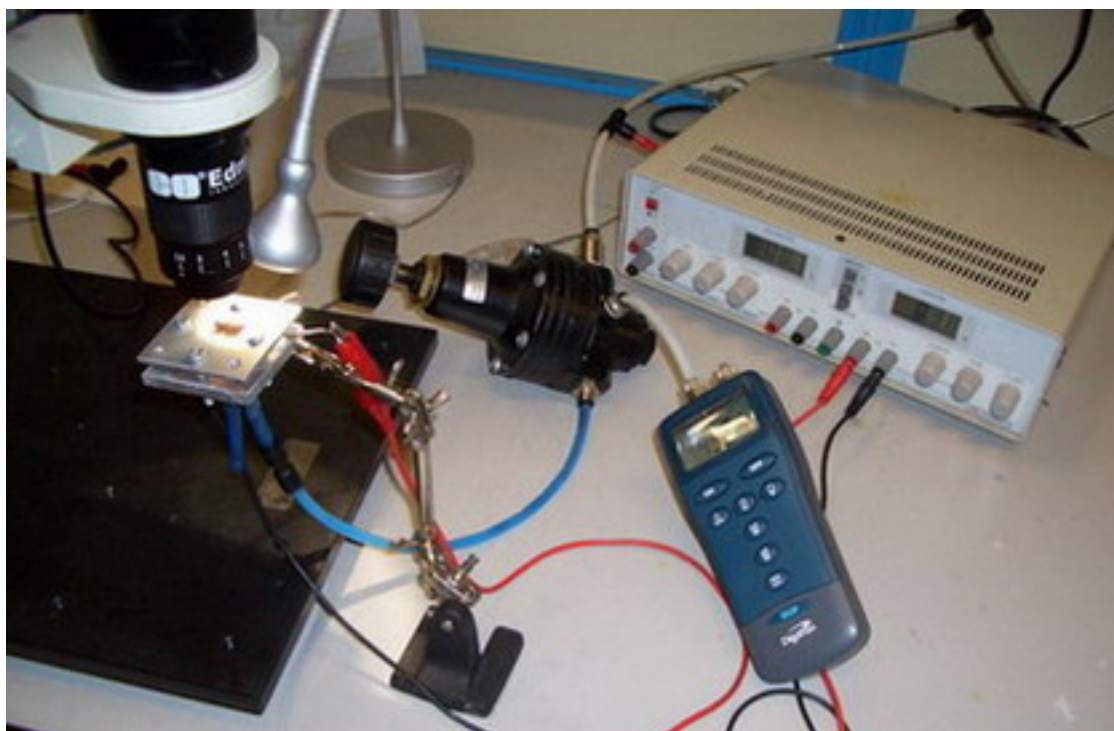


Figura 7.2: Preparación del experimento con todo el equipamiento necesario.

7.2.1 Ensayo de presión

En primer lugar se procedió a realizar ensayos destructivos por presión con las válvulas de relación de aspecto más elevada (13:1), para comprobar si la membrana aguantaría la tensión mecánica sin fugas. Cabe destacar que estas válvulas fueron rechazadas para hacerlas operar con presión y corriente simultáneamente debido a problemas de repetitividad. Una vez preparada cada una en el montaje de aluminio, fueron conectadas a la bomba externa, aumentando la presión suavemente hasta alcanzar el tope de 8 atmósferas.

Tras varios ensayos, resultó que todas las membranas resistieron, siendo imposible romperlas mediante este método. El resto de las paredes de la estructura, así como las zonas adheridas al sustrato y a la lámina de metacrilato aguantaron perfectamente, corroborando el procedimiento de adhesión SU-8 – SU-8 empleado así como la correcta adherencia al PCB. Se concluyó por tanto demostrando que, para ensayos destructivos por presión, esta estructura necesitaba relaciones de aspecto o presiones externas aún mayores, lo que sitúa este experimento en el límite con la teoría descrita.

7.2.2 Ensayo de presión y temperatura

Para este experimento se utilizaron las válvulas citadas en el apartado 7.1 con relaciones de aspecto de 11:1, 9:1 y 4:1, empleando de nuevo el montaje de aluminio conectado a la bomba de presión. Para visualizar con mayor facilidad el movimiento el fluido una vez activada la válvula, se introdujo previamente una pequeña cantidad de tinta oscura diluida en el conducto más cercano a través del cual se forzaba la presión en el depósito. Con este procedimiento, la tinta es empujada hacia la membrana, aunque el aire contenido dentro del depósito impedirá que éste se llene de tinta, lo que dificultaría ver el funcionamiento de la válvula. Sin embargo, una vez rota la membrana, el aire será el primero en salir a través del microcanal, seguido por la tinta, como veremos en capturas del ensayo posteriores.

A su vez, las pistas de cobre a ambos extremos del hilo de wire bonding se conectaron a una fuente DC de intensidad regulable capaz de suministrar hasta 5 amperios e indicar simultáneamente la tensión entre bornas. Como el montaje en principio es un cortocircuito, la tensión será nula, sin embargo irá aumentando gradualmente conforme incrementemos la intensidad.

Una vez comprobadas todas las conexiones, se procedió a aplicar presión al depósito progresivamente, asegurándonos de la ausencia de fugas tanto en la membrana como en el resto de la estructura. Con la presión ajustada al valor deseado, se mantuvo fija aproximadamente durante un minuto, para evitar efectos transitorios indeseables y comprobar cómo la membrana aguantaba sin problemas la tensión mecánica sufrida. A continuación, comenzamos a incrementar lenta y gradualmente la intensidad a través del microhilo, esperando a que se produjese la rotura de la membrana como combinación de ambos fenómenos, sin perder de vista el comportamiento de la válvula a través del microscopio y la pantalla del ordenador.

Una vez alcanzada la temperatura suficiente en el área central de la membrana circundante al hilo, comenzamos a apreciar una ligera degradación del SU-8 seguida de un pequeño desplazamiento de la membrana justo en este punto, en el sentido que fuerza la presión fijada previamente. Al cabo de escasos segundos, esa zona debilitada acaba cediendo ante el empuje de la presión y se rompe dejando pasar el aire contenido en el depósito así como la tinta del conducto, igualando las presiones entre el depósito y el microcanal. La rotura tendrá lugar por el punto más débil de la membrana, situado entre la unión con el sustrato y el wire bonding. Aunque descrito paso a paso parece ser un mecanismo lento, el proceso completo tiene lugar en menos de 5 segundos. Las fotografías capturadas que se muestran a continuación, correspondientes a una válvula de relación de aspecto 11:1, describen perfectamente las diferentes etapas que acabamos de explicar:

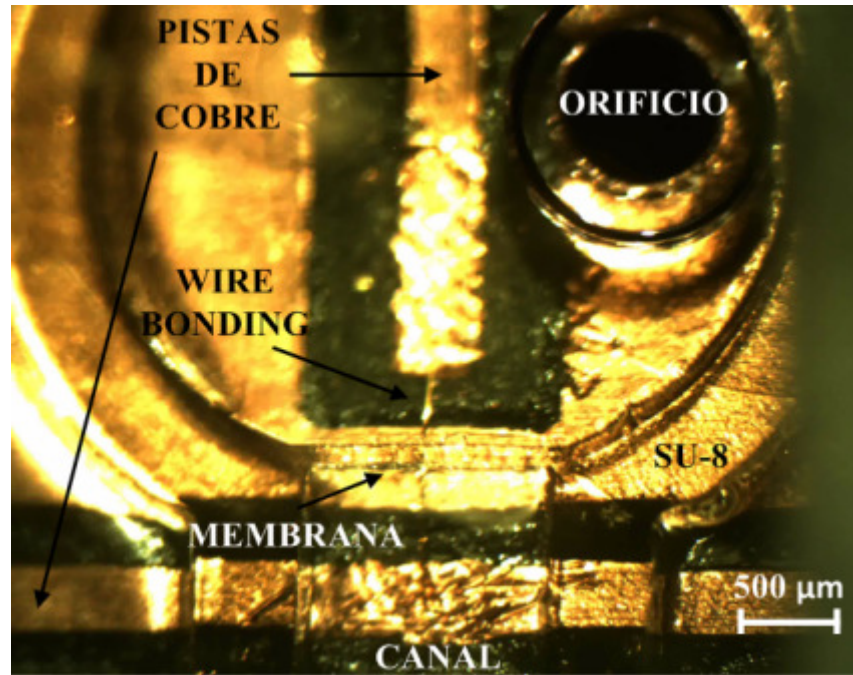


Figura 7.3: (a) Al depósito se le empieza a forzar externamente presión a través del orificio. En esta imagen se aprecia el efecto del pegado de la tapadera, haciendo parecer la parte superior de la membrana del orden del doble de gruesa de lo que realmente es. En este paso aún no ha sido aplicada corriente en el wire bonding.

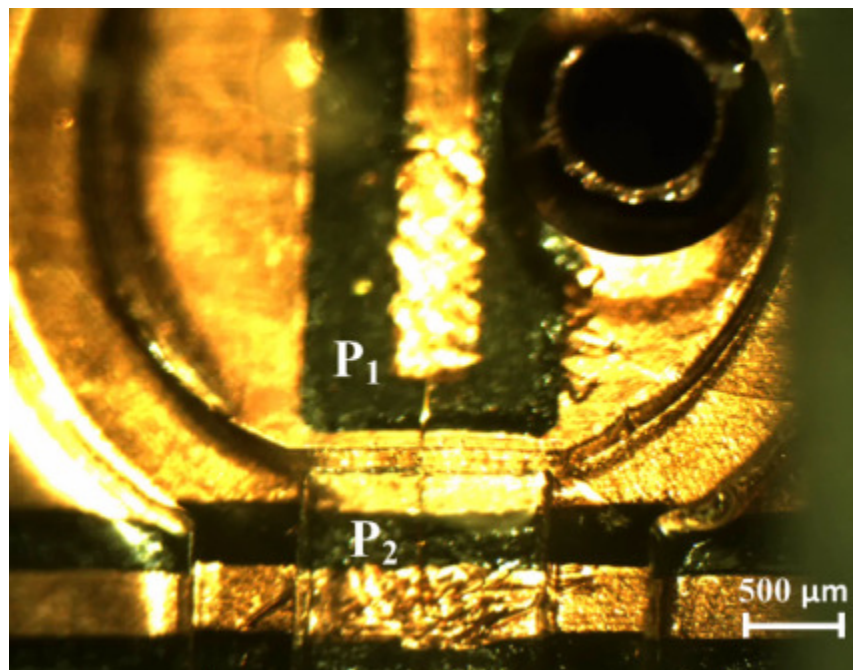


Figura 7.3: (b) La presión de funcionamiento ha sido ya fijada a P_1 , mientras que el microcanal, abierto por el otro extremo, se encuentra a presión atmosférica P_2 . La membrana soporta la diferencia de presiones sin romperse ni deformarse apreciablemente, aunque el aire del interior del depósito se comprime y deja asomar un poco de tinta por el orificio.

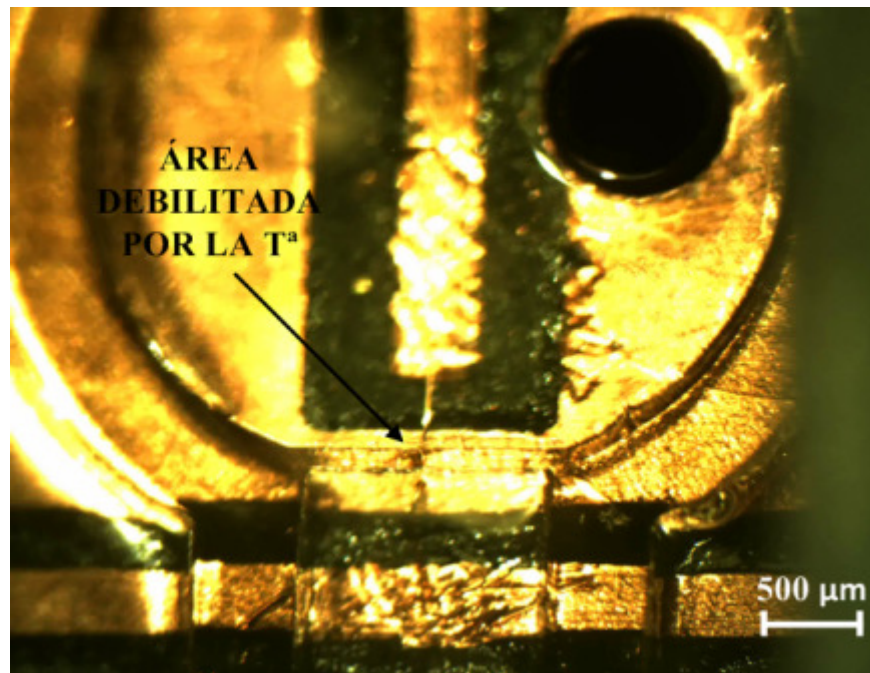


Figura 7.3: (c) Se le comienza a suministrar corriente al wire bonding a través de las pistas de cobre, provocando que su temperatura aumente considerablemente y comience a debilitar la membrana en ese punto, que empieza a ceder ante la presión.

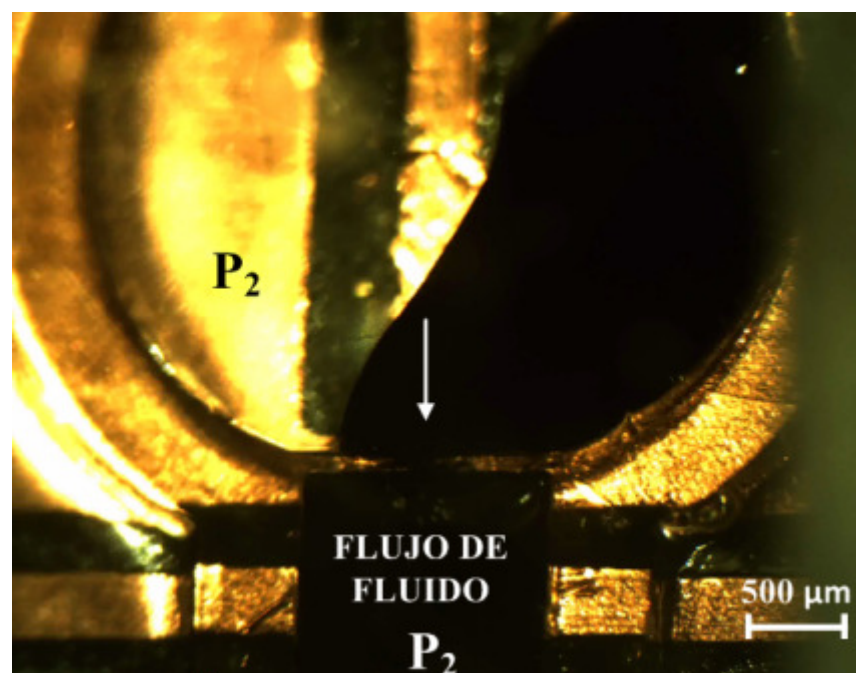


Figura 7.3: (d) Finalmente la membrana cede, se igualan las presiones entre el depósito y el canal, y la tinta fluye en la dirección que ha forzado la presión. Si una aguja se conectase al otro extremo del canal, el dispositivo actuaría como sistema microinyector.

Una vez mostrado el comportamiento a simple vista de la microválvula, pasaremos a mostrar y analizar las medidas y resultados obtenidos durante la realización del experimento, con el fin de comprender todos los fenómenos físicos involucrados en su activación.

7.3 Resultados y análisis del funcionamiento

Las medidas obtenidas en el laboratorio se detallan a continuación. En primer lugar, la figura 7.4 muestra la intensidad de corriente necesaria para activar el funcionamiento de la microválvula con diferentes presiones fijadas en el depósito, para los tres diseños con relaciones de aspecto diferentes en la membrana:

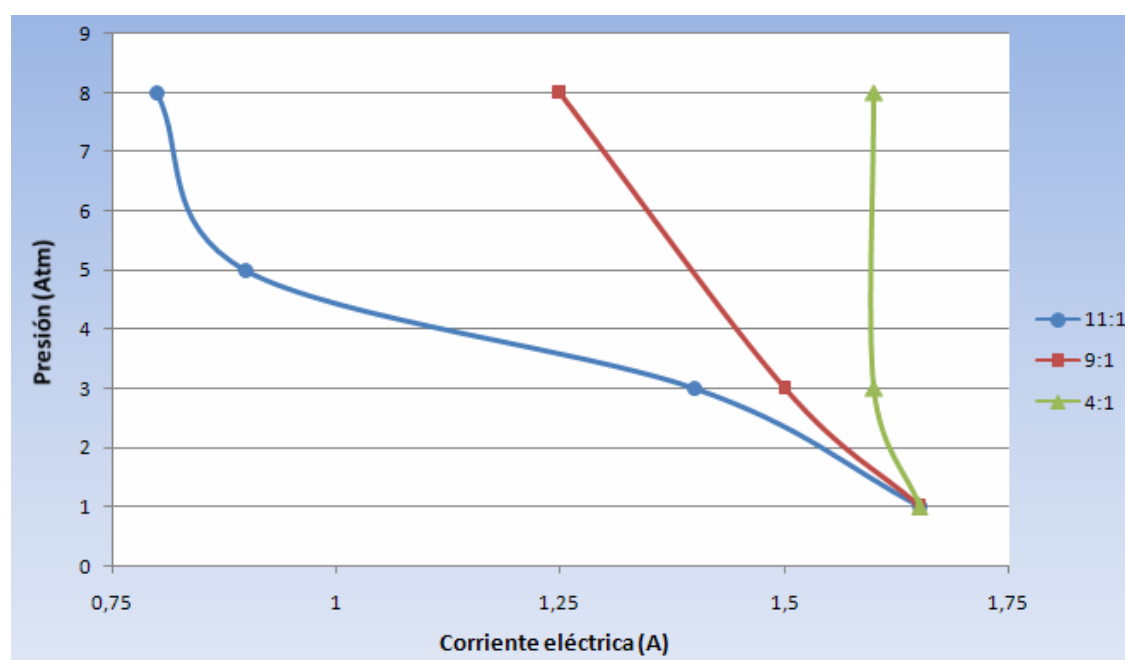


Figura 7.4: Corriente eléctrica necesaria en función de la presión en el depósito para microválvulas con membranas de relaciones de aspecto 11:1, 9:1 y 4:1.

Para esos puntos de corriente y presión, la membrana se romperá y activará el flujo de fluido. Sin embargo, será necesario cuantificar el aporte de cada fenómeno responsable de la actuación por separado para comprender los mecanismos físicos implicados y diferenciar diferentes regiones de funcionamiento en el dispositivo.

Antes de nada, mostraremos en la tabla siguiente los valores con los que se ha elaborado la gráfica:

| | Válvula tipo I (11:1) | Válvula tipo II (9:1) | Válvula tipo III (4:1) |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Presión (atm.) | Intensidad (A) | | |
| 1 | 1,65 | 1,65 | 1,65 |
| 3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 |
| 5 | 0,9 | - | - |
| 8 | 0,8 | 1,25 | 1,6 |

Tabla 7.1: Corriente eléctrica necesaria para activar la válvula a diferentes presiones.

En la gráfica se aprecia que para romper una membrana con relación de aspecto mayor, se necesita menos aporte de intensidad para una presión dada, salvo cuando dicha presión es demasiado baja y la activación de la válvula se lleva a cabo mayoritariamente por T^a . Antes de entrar en este tema, analicemos lo que ocurre con la válvula mostrada en la línea azul (11.1). En los dos puntos del extremo más a la izquierda vemos como la intensidad necesaria para la activación variará ligeramente (100 mA), siendo más apreciable el cambio de presión aportado. Esto nos indica que el efecto de la temperatura en la membrana jugará un papel menos determinante que la presión, la cual será la causante de provocar la rotura mecánicamente.

A partir de ese valor medido a 5 atmósferas, la pendiente de la curva será mucho menor, ocurriendo el efecto contrario: la diferencia de presión no será tan determinante como la variación de temperatura a través del hilo, siendo la diferencia de intensidad 0,5 A entre ambos puntos. Para entender mejor este comportamiento, recordaremos la gráfica mostrada en la figura 5.9.a del estudio térmico del capítulo 5, donde se muestra la variación del módulo de Young del SU-8 en función de la temperatura, esta vez expresada en grados Celsius:

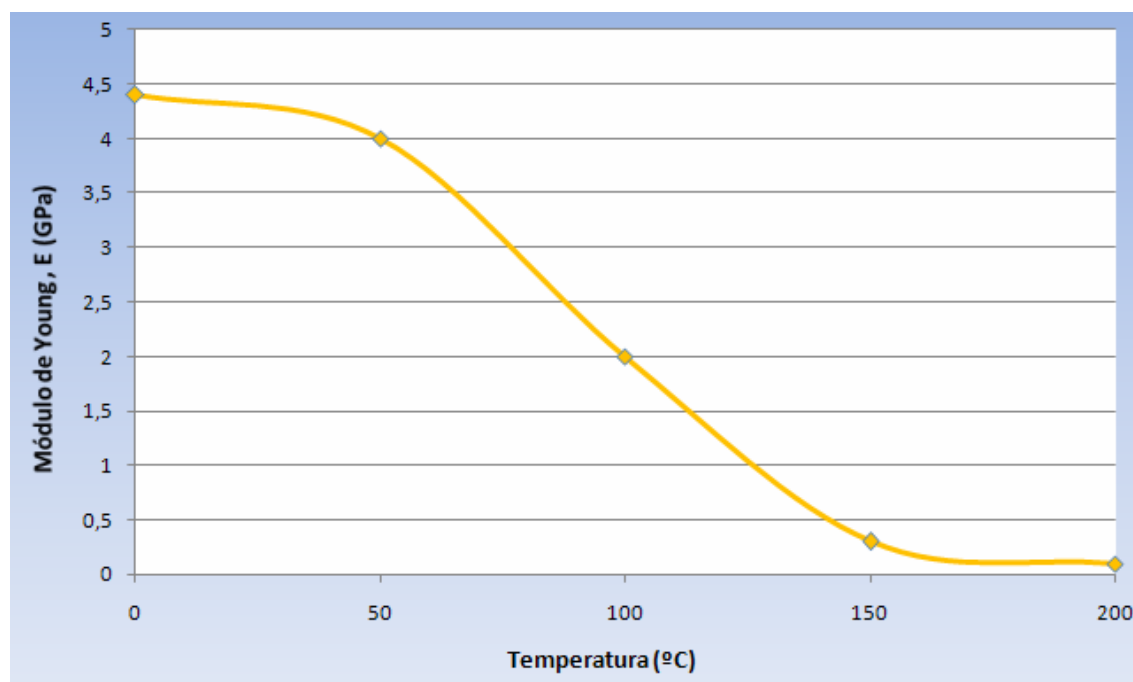


Figura 7.5: Variación del módulo de Young del SU-8 en función de la T° .

Se aprecia como a partir de los 50° aproximadamente, la caída del módulo de Young (E) comienza a ser importante, hasta llegar a los $150-200^{\circ}$, temperatura cercana a la de transición vítrea del material, donde el SU-8 comenzará a pasar de estado sólido a líquido. En este punto, el modelo físico empleado para caracterizar la rotura de la membrana dejaría de ser válido, pasando de una situación con una sección rectangular sólida sometida a presión a otra con un cilindro circundante al hilo en un estado intermedio entre sólido y líquido, igualmente sometido a presión.

Al calentar el microhilo hasta la temperatura de transición vítrea del material, tendremos una distribución de temperatura radial que iría desde este valor máximo en la zona más cercana alrededor del hilo hasta la temperatura ambiente en los extremos más alejados de la membrana. Este modelo teórico simplificado se muestra gráficamente con el esquema de la figura 7.6, donde T_{int} y T_{ext} serán la temperatura en la zona más próxima al hilo y en el borde de la membrana, respectivamente. De este modo, el SU-8 circundante al hilo comenzaría a derretirse, siendo más vulnerable a ser arrastrado por la presión. Aunque esta aproximación no se ajuste perfectamente a la realidad, nos dará una idea aproximada del comportamiento de la membrana.

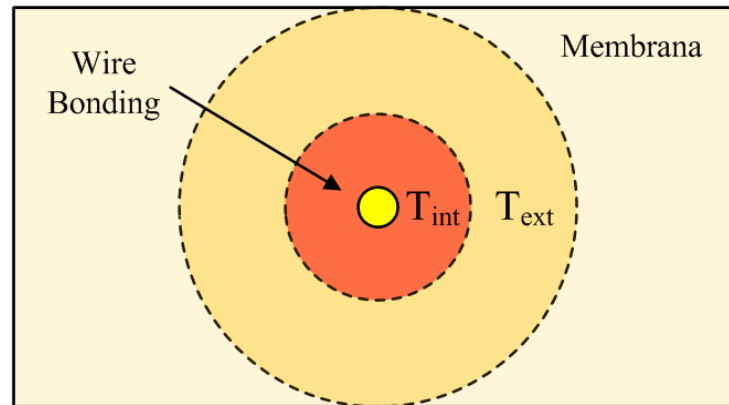


Figura 7.6: Modelo matemático de distribución de T^a alrededor del wire bonding (sección).

Para comprobar que a partir del punto que estábamos analizando en la curva azul, correspondiente a 5 atmósferas y 0,9 A, la pendiente decrece debido a este fenómeno, debemos comprobar que la temperatura alcanzada alrededor del hilo a esa intensidad se encuentra próxima a de transición vítrea del SU-8. Para ello aplicaremos la fórmula que determina la variación de la resistividad de un material en función de la temperatura:

$$\rho = \rho_{20^\circ} (1 + \alpha(T - 20^\circ)) \quad [36]$$

Donde ρ será la resistividad del oro a una temperatura T , ρ su resistividad a 20°C y α el coeficiente de temperatura del material. Suponiendo que la temperatura es la de transición vítrea del SU-8 (200°) introduciremos el resto de valores en la ecuación:

$$\rho = 2,35 \cdot 10^{-8} (1 + 3,4 \cdot 10^{-3} (200 - 20)) = 3,79 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \quad [37]$$

A continuación, recordaremos la expresión que determina la resistencia R de un material [17], donde l y S son su longitud y sección, respectivamente:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [38]$$

Con esto, calcularemos la resistencia del hilo de wire bonding en la longitud que se encuentra atravesando la membrana, en nuestro caso $45 \mu\text{m}$:

$$R = 3,79 \cdot 10^{-8} \frac{45 \cdot 10^{-6}}{\pi(12,5 \cdot 10^{-6})^2} = 0,0035\Omega \quad [39]$$

Con este valor obtendremos la potencia calorífica por unidad de longitud H que provoca la corriente eléctrica $I=0,9$ A suministrada al microhilo:

$$\frac{q}{H} = \frac{I^2 \cdot R}{H} = \frac{0,9^2 \cdot 0,0035}{45 \cdot 10^{-6}} = 63 \frac{W}{m} \quad [40]$$

Si particularizamos la ecuación al caso de una capa cilíndrica en la que sus superficies tengan una diferencia de temperaturas ΔT , tenemos:

$$\frac{q}{H} = \frac{\Delta T}{\ln(r_{ext}/r_{int}) / 2\pi k} = \frac{\Delta T}{R_{cilindro}} \quad [41]$$

Donde ΔT será la diferencia de temperatura entre el SU-8 alrededor del hilo de oro y el borde de la membrana, $T_{int} - T_{ext}$, como muestra la figura 7.6, y r_{ext} y r_{int} los radios desde el centro geométrico de la fuente de calor al borde de la membrana y al borde del wire bonding, respectivamente. $R_{cilindro}$ se define como la resistencia térmica por conducción de una capa cilíndrica, como es nuestro caso, y k es la conductividad térmica del SU-8, expresada en la tabla 4.3. Para entender este modelo matemático, puede aplicarse la analogía eléctrica de la ley de Ohm, donde ΔT sería la diferencia de tensión entre dos puntos, $R_{cilindro}$ la resistencia eléctrica, y q/H la corriente. En la figura siguiente se muestra el esquema:

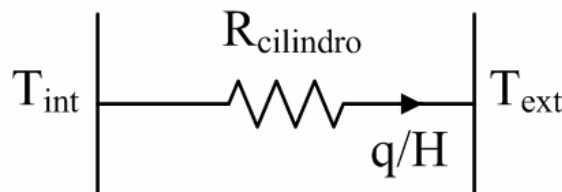


Figura 7.7: Analogía eléctrica a los parámetros de conducción térmica.

Si hayamos $R_{cilindro}$, a continuación podremos despejar la temperatura del hilo T_{int} de la expresión [41]:

$$R_{cilindro} = \frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2\pi k} = \frac{\ln\left(\frac{(247,5-12,5)}{12,5}\right)}{2\pi \cdot 0,2} = 2,33 \frac{m \cdot K}{W} \quad [42]$$

Como vemos en la expresión, hemos tenido en cuenta las dimensiones de nuestro dispositivo en el cálculo de r_{ext} y r_{int} . Por último, despejando la temperatura del hilo T_{int} , tendremos:

$$T_{int} - T_{ext} = R_{cilindro} \cdot \frac{q}{H} \Rightarrow T_{int} = T_{ext} + R_{cilindro} \cdot \frac{q}{H} \quad [43]$$

Para obtener T_{int} , supondremos que el borde de la membrana se encuentra a temperatura ambiente (25°) y emplearemos los resultados obtenidos en las expresiones [40] y [42]:

$$T_{int} = 20 + 2,33 \cdot 63 = 171,8^\circ \quad [44]$$

Queda por tanto demostrado que la temperatura alcanzada alrededor del hilo en ese punto de la curva se encuentra próxima a de transición vítrea del SU-8, y como demuestra la gráfica 7.5, el módulo de Young a la dercha de esa zona no se verá afectado. De este modo, el principio de rotura de la membrana desde ese hasta el siguiente punto de la gráfica 7.4 será térmico principalmente, aunque la presión también contribuirá a acelerar el proceso.

A partir del siguiente valor de la curva, para 3 atmósferas y 1,4 A, la temperatura del hilo seguirá aumentando, convirtiendo el SU-8 en estado líquido completamente y llegando así hasta el valor máximo de intensidad, 1,65 A. Si continuásemos aumentando la corriente, el hilo se fundiría, inutilizando la válvula. Es curioso observar como en ese punto, para I=1,65 A, todas las curvas de la gráfica 7.4 convergen, sin importar la relación de aspecto de las membranas. Esto es debido a que nos encontramos ante unas condiciones de T^a extremas, que degradarán completamente el SU-8 alrededor del hilo provocando un orificio en la membrana, sin importar en absoluto la presión aplicada.

Una vez analizadas las zonas de funcionamiento de la válvula para una relación de aspecto 11:1, pasaremos a comentar las otras dos curvas. Como la presión máxima que podíamos inyectar al depósito en el laboratorio estaba acotada a 8 atmósferas, no se puede apreciar el comportamiento de estos dos dispositivos en todas las regiones de interés, sin embargo, con lo comentado anteriormente nos podemos hacer una idea general de su funcionamiento.

En ambos casos, la relación de aspecto lograda sería insuficiente para que el aporte por presión fuera significativo, por lo que sería necesario llegar a una temperatura que licuase el SU-8 por completo para producir la activación. En la siguiente gráfica se muestra la contribución que la tensión mecánica ejercida sobre la estructura produce para diferentes valores de presión:

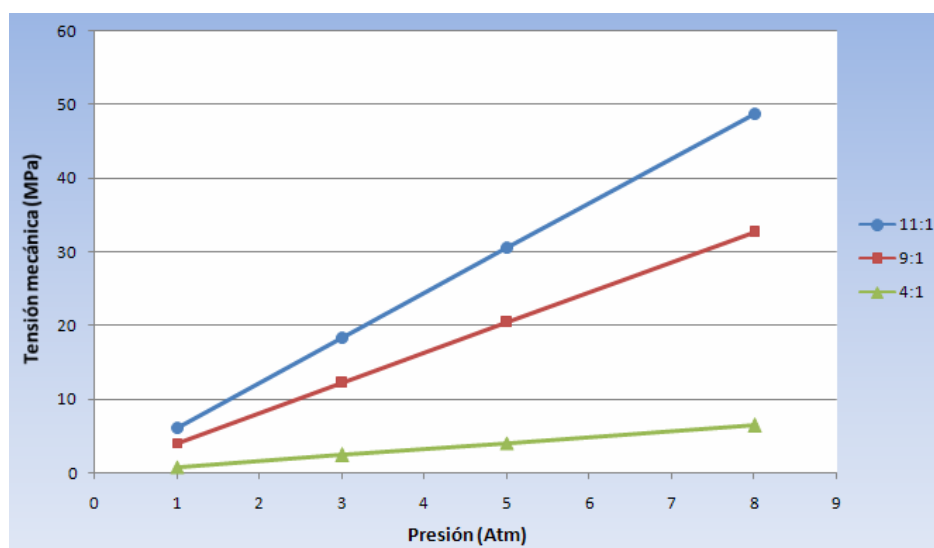


Figura 7.8: Tensión mecánica ejercida sobre las membranas de las válvulas caracterizadas en nuestro ensayo, en función de la presión.

La gráfica muestra como ninguna válvula se acerca lo suficiente a la tensión de rotura del SU-8, 70 MPa. Vemos como para una presión de 5 Atm. en la recta azul, necesitaríamos un aporte de 8 Atm. en la recta roja para producir el mismo efecto mecánico en la estructura. Por lo tanto, podríamos suponer que a partir de ese punto, la membrana de relación de aspecto 9:1 entraría en la región en que la presión aceleraría la aparición de fugas en el cilindro de SU-8 licuado, siguiendo la gráfica un comportamiento similar al mostrado más a la izquierda por la curva azul. En cuanto a la

membrana de menor relación de aspecto, sus dimensiones son claramente insuficientes para que la presión logre algún efecto, necesitando licuar la estructura para activar el mecanismo y siendo siempre un fenómeno puramente térmico. Una vez hecho este estudio, resumiremos las diferentes zonas de funcionamiento analizadas para poder caracterizar completamente la microválvula fabricada.

7.4 Zonas de operación del dispositivo

Con los resultados anteriores, en la siguiente figura se muestran las zonas de operación de la microválvula de relación de aspecto 11:1, que determinarán el fenómeno físico de activación.

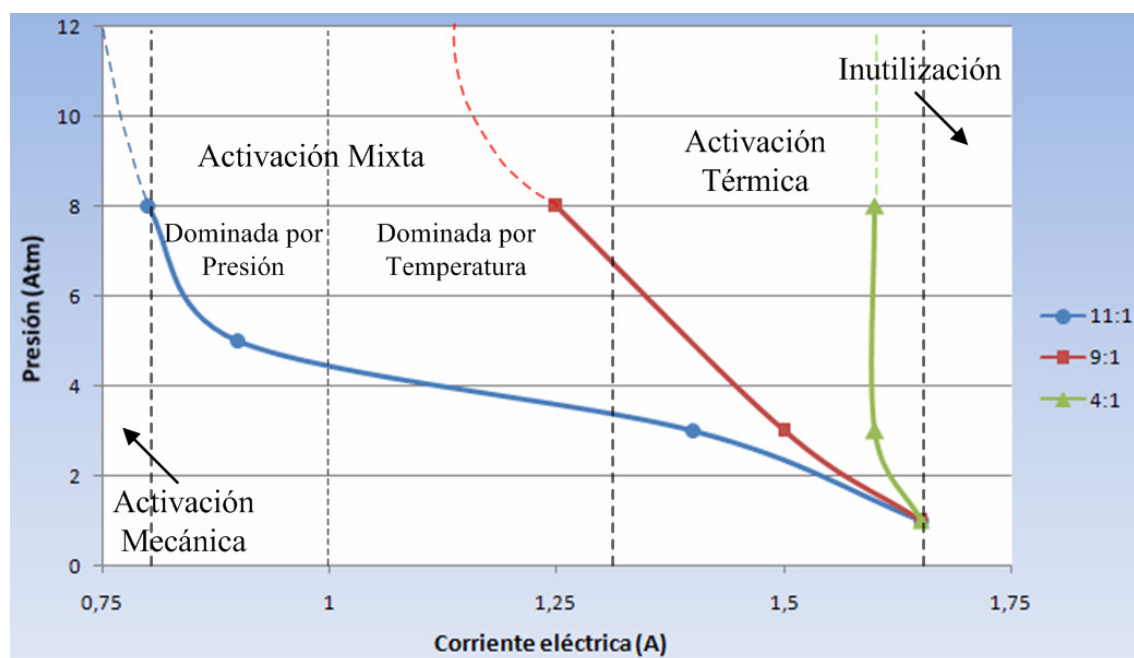


Figura 7.9: Zonas de operación de la microválvula. Es importante destacar que las diferentes regiones corresponden con la válvula de relación de aspecto mayor.

Si comenzamos de izquierda a derecha, tendremos que:

- **Activación mecánica:** La intensidad suministrada al dispositivo será nula o muy baja, dejando todo el peso de la actuación a la presión ejercida sobre la membrana, como ya estudiamos en el apartado 7.2.1. Esta zona abarcará desde el punto $I=0$ A hasta que el valor del módulo de Young del SU-8 comience a disminuir a causa de la T^a . En la gráfica 7.5 se puede apreciar que este

fenómeno comenzará a ocurrir a los 50°, lo que, aplicando las ecuaciones anteriormente descritas, nos sitúa en un intensidad de corriente de aproximadamente 0,8 A. Una válvula de este tipo, con un depósito de presión fijo, no sería de ninguna utilidad trabajando en esta región, puesto que no se podría controlar el momento de activación.

- Activación mixta: En esta zona de funcionamiento, la rotura de la membrana se produciría a causa de un fenómeno combinado, mecánico y térmico. Sin embargo, diferenciaremos dos zonas en las que uno de los dos fenómenos será dominante. Por un lado, desde los 50° hasta los 200° aproximadamente, la estructura del SU-8 se mantendría sólida, disminuyendo progresivamente el módulo de Young según la temperatura. El modelo de sección rectangular sometido a presión sería por tanto válido, aunque la membrana sería más vulnerable a la tensión mecánica soportada. El funcionamiento de la válvula se llevaría a cabo mecánicamente, siendo el aporte térmico el causante de la activación.

Por otra parte, a partir de los 200°, superaríamos la T^a de transición vítrea del material, comenzando lentamente a cambiar su estado a líquido. El modelo matemático anterior ya no sería correcto, siendo necesario suponer la membrana como un cilindro viscoso circundante al wire bonding y sometido a presión. En este caso, el mecanismo de activación sería principalmente térmico, acelerando la presión el tiempo que tardaría la válvula en funcionar.

- Activación térmica: En este caso, el SU-8 ha superado su temperatura de degradación, en torno a 400°, y ha provocado una fusión de la membrana en la zona cercana al wire bonding, independientemente de la presión aplicada. Para alcanzar esa temperatura, el hilo debería estar sometido a 1,3 A. De este modo, la activación de la válvula dependerá fundamentalmente del tiempo que estemos suministrando corriente y del grosor de la membrana, siendo el fenómeno físico de funcionamiento únicamente térmico.
- Inutilización: Cuando la corriente suministrada al hilo supera los 1,65 A, el hilo se fundirá, quedando inutilizado el dispositivo.

7.5 Consumo y prestaciones

Teniendo en cuenta las zonas de operación del dispositivo, buscaremos el área óptima de funcionamiento para reducir el consumo de potencia tanto como sea posible. Los valores medidos de presión, corriente eléctrica, voltaje y potencia a los que la válvula se activa, se muestran en la tabla 7.2. No se incluyó en el estudio la válvula de menor relación de aspecto al presentar un consumo máximo, debido a que necesitaba valores de intensidad muy elevados.

| | Válvula tipo I (11:1) | | | Válvula tipo II (9:1) | | |
|----------------|-----------------------|-------------|---------------|-----------------------|-------------|---------------|
| Presión (atm.) | Corriente (A) | Voltaje (V) | Potencia (mW) | Corriente (A) | Voltaje (V) | Potencia (mW) |
| 1 | 1,65 | 0,65 | 1072 | 1,65 | 0,65 | 1072 |
| 3 | 1,40 | 0,55 | 770 | 1,5 | 0,61 | 915 |
| 5 | 0,90 | 0,38 | 342 | - | - | - |
| 8 | 0,80 | 0,35 | 280 | 1,25 | 0,48 | 600 |

Tabla 7.2: Presión, corriente eléctrica, voltaje y potencia de las válvulas estudiadas.

Los valores de la potencia resultante se resumen en la siguiente gráfica:

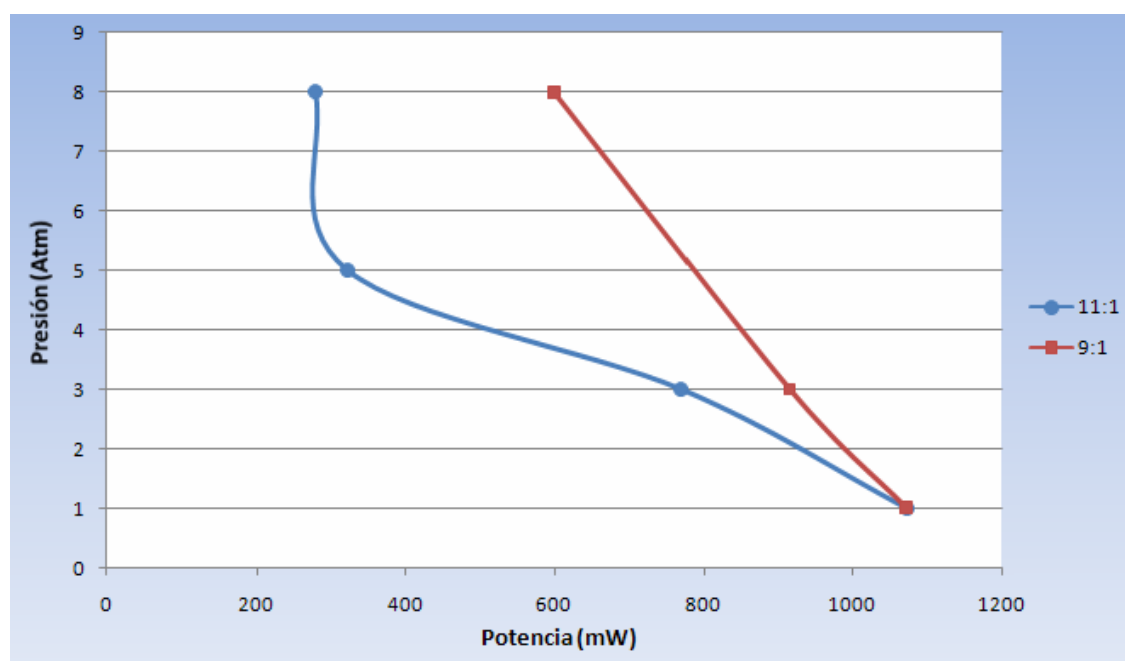


Figura 7.10: Potencia consumida para diferentes presiones en el depósito.

Según las zonas de operación del dispositivo, la de menos consumo será la de activación mixta dominada por presión, debido a que necesitará sólo la intensidad necesaria para debilitar mecánicamente la estructura, sin llegar a derretirla. Obviamente la peor será la zona de activación térmica, al requerir potencias cercanas a 1 W.

Para concluir, mostraremos en la tabla 7.3 un breve resumen de las características más destacadas para la válvula con mejores resultados actuando como microinyector, donde la potencia consumida fue inferior a 300 mW. Como era de esperar, la válvula con la membrana de mayor relación de aspecto resultó ser la que tenía mejores prestaciones. Si empleásemos el dispositivo como microextractor, la potencia necesaria sería en torno al vatio.

| | |
|--|-------------------------------|
| Dimensiones de la membrana (μm) | 495 \times 1000 \times 45 |
| Relación de aspecto | 11:1 |
| Presión soportada en ausencia de T^a (Atm) | > 8 |
| Consumo mínimo (mW) | 280 |
| Tiempo de respuesta (s) | < 5 |

Tabla 7.3: Características generales de la microválvula con mejores prestaciones de entre las fabricadas.