

Proyecto Final

Máster en Diseño Mecánico y Producción con Sistemas

CAD-CAM-CAE

Inyector electromecánico portátil de gases en líquidos

Autor del proyecto: Rubén Martín Torres

Director del proyecto: José Antonio Pardos Blasco

Fecha: Zaragoza, 30 de noviembre de 2019

 <p>estudios abiertos SEAS GRUPO SANVALERO</p>	 <p>SAPIENTIA IN VERITATIS LIBERATE UNIVERSIDAD CATÓLICA DE ÁVILA</p>
SEAS, Estudios Abiertos	Universidad Católica de Ávila

● Índice General

● DECLARACIÓN DEL ALUMNO	6
● DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS.....	7
● RESUMEN PROYECTO	8
● PALABRAS CLAVE	10
1. OBJETO Y OBJETIVOS.....	11
1.1. Enunciado.....	12
1.2. Análisis del Enunciado.....	12
1.3. Alcance del Proyecto.....	12
2. ESTUDIO DEL ARTE	13
2.1. Fundamentos Teóricos.....	13
2.2. Fundamentos Constructivos.....	28
2.3. Análisis de Mercado	34
2.4. Posibles Soluciones	41
2.4.1. Actuador electromecánico o meramente mecánico	42
2.4.2. Fabricación con Piezas de Catálogo	42
2.4.3. Fabricación A Medida.....	43
2.4.4. Fabricación Híbrida	44
2.5. Solución Adoptada	45
3. DESARROLLO	46
3.2. Esquema general	49
3.2.2. Funcionamiento	50
3.3. Diseño del Agitador	51
3.3.2. Bombona	53
3.3.2.2. Cálculos.....	55
3.3.2.3. Diseño	57
3.3.3. Agitador Entrada - Válvula 1, de estrangulación	61
3.3.3.2. Cálculos.....	63
3.3.3.3. Diseño	65
3.3.3.4. Simulación CFD	67
3.3.1. Agitador Interconexión - Válvula 2, electroválvula.....	76
3.3.1.2. Diseño	78
3.3.1.3. Conectorización.....	79
3.3.1. Agitador Salida – Conexión de difusor rápida	80
3.3.1.1. Diseño	80
3.3.2. Contactor – Difusor.....	82
3.3.2.2. Cálculos.....	84

3.3.2.3. Diseño	84
3.3.2.4. Simulación CDF	86
3.4. Diseño de la Base	98
3.4.2. Base - Mainflow	100
3.4.2.1. Diseño	101
3.4.2.2. Electrónica principal	103
3.4.2.3. Tapa	105
3.4.3. Base – Fijación	107
3.4.4. Base - Válvula 3, reguladora de presión	108
3.4.4.2. Cálculos.....	110
3.4.4.3. Diseño	110
3.4.5. Base -Válvula 4, reguladora de caudal.....	118
3.4.5.2. Diseño	121
3.5. Columna de burbujeo	128
4. PRESUPUESTO	129
5. CONCLUSIONES	134
6. LIMITACIONES Y PROSPECTIVA.....	139
• REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140
• BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA.....	143
• ANEXOS	144
A-1.CODIFICACIÓN DEL PROYECTO	144
A-2.TABLAS UTILIZADAS DE DISEÑO	149
A-2.1.Tabla de tolerancias dimensionales.....	149
A-2.2.Diámetros y roscas	151
A-2.3.Diámetros y roscas paso fino	152
A-2.4.Rugosidades según acabados superficiales	153
A-2.5.Juntas tóricas.....	154
A-2.6.Tabla periódica.....	158
A-3.ARCHIVOS DEL PROYECTO	159
A-3.1.Memoria del proyecto	159
A-3.2.Archivos de modelado de piezas	159
A-3.3.Archivos de simulaciones.....	159
A-3.4.Presentación del proyecto	159
A-3.5.Video de defesa del proyecto	159

● Índice de Imágenes¹

Figura 2.1.1. Distribución de gas y líquido en una tubería. Fuente (Dirdal, 2015 p. 8).	15
Figura 2.1.2. Regímenes de flujo en una mezcla bifásica. Fuente (E. Brennen, 2005 p. 170).	19
Figura 2.1.3. Mapa de regímenes de flujo bifásicos. Fuente (E. Brennen, 2005 p. 170).	19
Figura 2.1.4. Fotos del flujo aire/agua en una tubería vertical. Fuente (E. Brennen, 2005 p. 171).	20
Figura 2.2.1. Tipos de reactores multifásicos. Fuente (Stankiewicz, 2019 p. 2).	29
Figura 2.3.2. Instalación de inertización fija en continuo. Fuente (Metálicos, 2019).	39
Figura 2.3.3. Instalación de gasificación fija en continuo. Fuente (Metálicos, 2019).	40
Figura 3.1.1. Reactor bifásico. Vista general del dispositivo montado.	46
Figura 3.1.2. Cómo se utiliza el reactor bifásico. Montaje.	47
Figura 3.1.3. Cómo se utiliza el reactor bifásico. Ajuste y activación.	48
Figura 3.2.1. Reactor bifásico, esquema neumático general.	49
Figura 3.3.1. Agitador, vista de conjunto.	51
Figura 3.3.2. Agitador, piezas del ensamblaje.	52
Figura 3.3.3. Bombona no recargable. Cortesía de SEFIC.	53
Figura 3.3.4. Bombona recargable. Cortesía de SEFIC.	53
Figura 3.3.5. Bombona, tamaños. Cortesía de SEFIC.	54
Figura 3.3.6. Cilindros de toma de muestras. Fuente Swagelok.	55
Figura 3.3.7. Conjunto bombona, vista de conjunto.	57
Figura 3.3.8. Bombona, válvula de seguridad. Vista de detalle.	58
Figura 3.3.9. Muelle de compresión.	58
Figura 3.3.10. Junta tórica.	60
Figura 3.3.11. Válvula de restricción "Lee Jet". Fuente "The Lee Co".	61
Figura 3.3.12. Calculadora para la válvula de restricción "Lee Jet". Fuente "The Lee Co".	62
Figura 3.3.13. Selector de la válvula de restricción "Lee Jet". Fuente "The Lee Co".	62
Figura 3.3.14. Efecto Venturi. Fuente (Pazmiño Mayorga, et al., 2017).	63
Figura 3.3.15. Agitador-Entrada, válvula 1 de restricción de flujo. Vista de conjunto.	65
Figura 3.3.16. Agitador-Entrada, válvula 1 de restricción de flujo. Detalle de la válvula.	66
Figura 3.3.17. Válvula 1 de restricción de flujo. Modelo simplificado.	67
Figura 3.3.18. Válvula 1. Simulación. Dominio computacional y condiciones de contorno.	68
Figura 3.3.19. Graficas de resultados. Flujo de 0,1 l/min (izquierda) y 0,5 l/min (derecha).	69
Figura 3.3.20. Graficas de resultados. Escenario completo.	70
Figura 3.3.21. Resultados de presión estática. Para flujos de 0,1 l/min y 0,5 l/min.	71
Figura 3.3.22. Resultados de velocidad, número de Mach. Para flujos de 0,1 l/min y 0,5 l/min.	72
Figura 3.3.23. Resultados, líneas de flujo. Para flujos de 0,1 l/min y 0,5 l/min.	73
Figura 3.3.24. Detalle de velocidad de salida.	75
Figura 3.3.25. Electroválvulas de Lee Co. Serie INK (izquierda) y LGV (derecha). Fuente The Lee.	76
Figura 3.3.26. Electroválvulas de Staiger. Serie Spider. Fuente Stiger.	76
Figura 3.3.27. Electroválvula de Schult, serie VPKM007. Fuente Schultz.	77
Figura 3.3.28. Agitador-Interconexión, válvula 2 de conmutación de vías. Vista de conjunto.	78
Figura 3.3.29. Agitador, electrodos de la válvula 2.	79
Figura 3.3.30. Conectores "pogo pin". Tipos y estructura.	80
Figura 3.3.31. Agitador-Salida con punto de conexión rápido. Vista de conjunto.	81
Figura 3.3.32. Agitador-Salida. Conexionado rápido.	82
Figura 3.3.33. Tubo de acero para el difusor. Fuente Swagelok.	83
Figura 3.3.34. Micro taladrado láser de hasta 30 µm. Fuente Rofin.	83
Figura 3.3.35. Contactor - Difusor. Despiece.	85
Figura 3.3.36. Difusor. Simulación. Modelo simplificado.	87
Figura 3.3.37. Difusor. Simulación. Dominio computacional y condiciones de contorno.	88
Figura 3.3.38. Difusor. Simulación. Velocidad de salida del difusor.	89
Figura 3.3.39. Resultados de velocidad. Para un flujo de 0,1, 0,3 y 0,5 l/min.	90
Figura 3.3.40. Líneas de flujo. Para un flujo de 0,1, 0,3 y 0,5 l/min.	91
Figura 3.3.41. Detalle, recirculación de flujo.	91
Figura 3.3.42. Análisis de partículas (burbujas). Para un flujo de 0,1, 0,3 y 0,5 l/min.	93
Figura 3.3.43. Análisis de partículas, estadísticas. Para burbujas de 0,3, 0,5 y 1 mm de diámetro.	94
Figura 3.4.1. Base, vista de conjunto.	98
Figura 3.4.2. Base, piezas del ensamblaje.	99
Figura 3.4.3. Colector, canalización de flujos tocha. Fuente Swagelok.	100

¹ Todas las figuras en las que no se indica la fuente son de elaboración propia.

Figura 3.4.4. Tapones, para cerrar tubos. Fuente "The Lee Co".	101
Figura 3.4.5. Base - Mainfold, canalizaciones internas. Y vista hexagonal de la planta.	101
Figura 3.4.6. Base - Mainfold, piezas del ensamblaje.....	102
Figura 3.4.7. Electrónica principal y elementos electrónicos.	104
Figura 3.4.8. Electrónica principal, detalle de conectorización.	104
Figura 3.4.9. Tapa de la base con botón de activación.....	105
Figura 3.4.10. Botón. Modelo de ensamblaje paramétrico.....	106
Figura 3.4.11. Fijación de la base. Montaje.	107
Figura 3.4.12. Tres tipos de fijación de la base. Modelado por superficies.....	108
Figura 3.4.13. Tipos de reguladores de presión. Fuente Swagelok.	109
Figura 3.4.14. Reguladores de presión, sensor a muelle. Fuente Swagelok.	109
Figura 3.4.15. Válvula 3, vista de posición.....	110
Figura 3.4.16. Válvula 3, vista de conjunto.	111
Figura 3.4.17. Válvula 3, piezas del ensamblaje.....	112
Figura 3.4.18. Válvula 3, consigna.....	113
Figura 3.4.19. Válvula 3, empaquetadura.	113
Figura 3.4.20. Válvula 3, tornillo de ajuste.	114
Figura 3.4.21. Válvula 3, muelle del sensor.	114
Figura 3.4.22. Válvula 3, Cuerpo.	115
Figura 3.4.23. Válvula 3, elemento sensor.....	116
Figura 3.4.24. Válvula 3, asiento.	116
Figura 3.4.25. Válvula 3, obturador.....	117
Figura 3.4.26. Válvula 3, tapón.	117
Figura 3.4.27. Válvula 4, de aguja con bonete integrado. Fuente Swagelok.	118
Figura 3.4.28. Válvula 4, empaquetadura. Fuente Swagelok.	118
Figura 3.4.29. Válvula 4, piezas y materiales. Fuente Swagelok.....	119
Figura 3.4.30. Válvula 4, series de precisión. Fuente Swagelok.	120
Figura 3.4.31. Válvula 4, piezas del ensamblaje.....	121
Figura 3.4.32. Válvula 4, vista de conjunto.	122
Figura 3.4.33. Válvula 4, vista de posición.....	123
Figura 3.4.34. Válvula 4, recorrido del vástago.	124
Figura 3.4.35. Válvula 4, consigna.....	124
Figura 3.4.36. Válvula 4, empaquetadura.	125
Figura 3.4.37. Válvula 4, Cuerpo.	125
Figura 3.4.38. Válvula 4, Vástago.	126
Figura 3.4.39. Válvula 4, Asiento.	127
Figura 3.4.40. Válvula 4, Tapón.	127
Figura 3.5.1. Botella de vino Bordelesa. Columna de burbujeo.	128
Figura 4.1.1. Prototipo conceptual para presupuestos.....	129
Figura 4.1.2. Cotización de Protolabs.	130

● Índice de Tablas²

<i>Tabla 2.1.1.</i> Factores que influyen en la disolución. Fuente (Tamajón Álvarez, 2015).....	16
<i>Tabla 2.1.2.</i> Tabla de densidades y volúmenes molares. Transcripción (Alcalá, 1993).....	22
<i>Tabla 2.1.3.</i> Tabla de constantes de Van der Waals. Fuente (Alcalá, 1993) y Wikipedia.....	25
<i>Tabla 2.1.4.</i> Factores que influyen en la disolución controlables.....	25
<i>Tabla 2.3.1.</i> Tabla de producto VinoMax. Fuente: fabsoluciones.es.....	34
<i>Tabla 2.3.2.</i> Tabla de producto Vacuvin. Fuente: vacuvin.com	35
<i>Tabla 2.3.3.</i> Tabla de producto Presovac. Fuente: fabsoluciones.es.....	36
<i>Tabla 2.3.4.</i> Tabla de producto Inyector. Fuente: tiendainvia.com.....	36
<i>Tabla 2.3.5.</i> Tabla de producto Coravin®. Fuente: coravin.com.....	37
<i>Tabla 2.3.6.</i> Tabla de producto Pistola Inyectora. Fuente: abellolinde.es.....	38
<i>Tabla 2.3.7.</i> Tabla de producto Dispensador CV1T. Fuente: vinoteca.es.....	38
<i>Tabla 2.4.1.</i> Tabla comparativa. Tipo de actuador.....	42
<i>Tabla 2.4.2.</i> Características de una fabricación con piezas de catálogo.	43
<i>Tabla 2.4.3.</i> Características de una fabricación con piezas A Medida.....	43
<i>Tabla 2.4.4.</i> Características de una fabricación Híbrida.	44
<i>Tabla 2.5.1.</i> Tabla resumen de las posibles soluciones.....	45
<i>Tabla 3.3.1.</i> Equivalencia de presiones en la bombona.....	55
<i>Tabla 3.3.2.</i> Muelle de compresión modelo A20750. Tabla de Sodemann.....	59
<i>Tabla 3.3.3.</i> Condiciones Normalizadas TPN. Fuente Wikipedia.....	61
<i>Tabla 3.3.4.</i> Tabla de resultados. Escenario del diseño paramétrico de la garganta.....	69
<i>Tabla 3.3.5.</i> Tabla de resultados. Diámetro inicial de la burbuja en función del flujo y taladro.	92
<i>Tabla 3.3.6.</i> Tabla de resultados medios estadísticos.	96
<i>Tabla 4.1.1.</i> Presupuesto escalado en aluminio. Protolabs.	130
<i>Tabla 4.1.2.</i> Coste materia prima.....	131
<i>Tabla 4.1.3.</i> Coste de fabricación de las piezas.	132
<i>Tabla 4.1.4.</i> Coste de fabricación.	133
<i>Tabla 4.1.5.</i> Piezas del equipo.....	133

² Todas las tablas en las que no se indica la fuente son de elaboración propia.

● Declaración del Alumno

Este trabajo constituye parte de mi candidatura para la obtención del título de “Máster en Diseño Mecánico y Producción con Sistemas CAD-CAM-CAE” de SEAS Estudios Abiertos del Grupo San Valero, por la Universidad Católica de Ávila y no ha sido entregado previamente (o simultáneamente) para la obtención de cualquier otro título.

Este documento es el resultado del mi propio trabajo, excepto donde de otra manera esté indicado y referido.

No doy mi consentimiento para que se archive este trabajo en la biblioteca de SEAS Estudios Abiertos del Grupo San Valero.

Zaragoza, viernes, 29 de noviembre de 2019



Rubén Martín Torres
Alumno del Máster

● Dedicatoria y Agradecimientos

A mi Madre

A Diego y su Pequeño

A Diego X en Ledesma

● Resumen Proyecto

El presente trabajo recoge las bases técnicas de fundamentos teóricos y constructivos para la compresión del principio de funcionamiento del dispositivo, así como un modelo 3d completo y funcional fuertemente estructurado y completamente acotado.

Detrás de este trabajo, hay un amplio trabajo de documentación que queda evidenciado en las referencias, notas a pie de página, ecuaciones, figuras y tablas de la memoria.

Las fases del diseño que detallaremos en el desarrollo de este proyecto se pueden resumir en los siguientes puntos:

Solución adoptada

Este objetivo ha sido cumplido habiendo abordado de manera satisfactoria el estudio de los diferentes métodos de inyección y los parámetros que influyen en la eficiencia de la disolución y que vamos a poder modificar desde el dispositivo.

He buscado activamente información sobre la posible materia prima, la he clasificado y la he discriminado para al final elegir la que mejor se adapta a cada pieza del inyector. Durante el desarrollo de proyecto, al explicar cada pieza del mismo, hago referencia a la materia prima de referencia. Normalmente se trata de fabricantes de renombre.

En la fase de documentación, he hecho un estudio de mercado para ver que hasta donde se ha llegado en la inyección de gases en líquidos. Sorprendentemente no he encontrado nada parecido a lo que se ha diseñado en este proyecto. Los dispositivos que he encontrado, se centran en la preservación y dispensación de vino.

Con la información adquirida y una vez documentado, he elaborado una lista de posibles soluciones para dar salida al dispositivo. Finalmente me decanté por la fabricación completamente a medida por entender que es la única que tiene sentido en un trabajo de índole académica. En un ámbito profesional hubiera optado por un diseño por piezas, aunque estéticamente feo, sería funcional y fiable.

La elección del diseño a medida conlleva asumir las siguientes consecuencias de cara a los objetivos inicialmente propuestos:

- Aumenta el tiempo para la realización del diseño.
- Mas tiempo para documentación
- Menor estabilidad.
- Precio del prototipo muy alto.

Diseño 3D eficaz

El diseño presentado cumple con el objetivo en cuestiones de calidad y eficacia:

- ✓ Diseño limpio y estructurado.
- ✓ Reutilización de piezas.
- ✓ Modelos con ensamblajes y bocetos completamente restringidos.
- ✓ Se han generado varios ordenamientos.
- ✓ Modelo de ensamblaje paramétrico, en el pulsador.
- ✓ Utilización de modelado por superficies, en la pieza de centrado en la botella.

El manejo del dispositivo va a ser muy sencillo limitándose a poner el dispositivo sobre la botella y pulsar un botón.

Para facilitar la inserción en la botella, el diseño se ha dividido en dos piezas principales, el agitador y la base:

- El agitador que contiene la bombona con el gas y el difusor, se inserta en la base ya colocada sobre la boca de la botella
- La base contiene la electrónica principal con el pulsador de activación y dos válvulas, la de estabilización de presión y la de regulación de caudal que se controlan de forma precisa a través de un tornillo moleteado.

Con la intención de facilitar el mantenimiento y limpieza, tanto las válvulas como el difusor son extraíbles y desmontables.

Simulaciones

El diseño de la mecánica, ha sido realimentado con los resultados obtenidos en las simulaciones efectuadas:

La válvula V1. Con simulación de fluidos y mediante estudios paramétricos, he creado un escenario de dos variables de entrada donde variaba el flujo y el diámetro de la garganta y miraba que la presión a la salida fuera la adecuada para la siguiente etapa.

El difusor de burbujas D1. De nuevo con simulación computacional de dinámica de fluidos y un estudio paramétrico, he simulado el flujo al salir por las perforaciones del difusor y sobre estos flujos, he inyectado partículas de gas para ver como se comportan las burbujas de distintos diámetros en el interior de la botella. El diámetro que producía burbujas cuyas trayectorias nos ofrecían una mejor distribución volumétrica del gas es importado al diseño.

Documentación CAM y Fabricación

Estos objetivos que planteaba en un principio no se han llevado a cabo.

La principal consecuencia de elegir el diseño con piezas completamente a medida es un aumento del tiempo de diseño y de documentación. Además de elevar el coste del prototipo.

He preferido dejar bien documentado el diseño 3d y la documentación de las simulaciones.

● Palabras Clave

Estas son las palabras clave a las que podría responder la temática de este proyecto:

Inyector de Gases. Reactor químico multifásico. Reactor químico bifásico. Columna de burbujeo. Sistema portátil. Proyecto final de máster. PFM. Simulación CFD. Simulación FEA. PLM NX. Diseño 3D. CAD, CAM, CAE. Mecanizado. SEAS.

1. Objeto y Objetivos

Objeto

El principal motivo para la realización de este proyecto es profundizar en el campo del diseño 3D orientado a la fabricación CNC utilizando las herramientas de la suite de Siemens y aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de estos estudios.

Objetivos generales:

El objetivo a abordar es el "diseño y fabricación de un inyector de gases", para lo que deberé alcanzar los siguientes objetivos generales:

1. *Diseño 3D eficaz del inyector.* Utilizando la información teórica disponible en este marco de estudio, deberá ser capaz de modelar adecuadamente un inyector 3D utilizando las herramientas de diseño utilizadas en el máster.
2. *Simulación del modelo y la inyección, utilizando FEA y/o CFD.* Mediante estas potentes herramientas simularé la conveniencia o no del modelo 3D para los objetivos deseados. Las partes a simular serán las zonas sensibles a este tipo de análisis como el regulador de presión, el elemento de control de flujo del gas o el dimensionado de los elementos sometidos a presión o estrés mecánico. Los resultados realimentarán el modelo 3D (objetivo 1) para corregirlo y/o ajustarlo.
3. *Documentación CAM para la fabricación.* Planos, ficheros para la mecanización de las diferentes piezas, etc.
4. *Fabricación del inyector.* El objetivo final es la fabricación de un prototipo.

Aspectos a abordar:

- Para el Objetivo 1:
 - ✓ Estudio de los diferentes métodos de inyección y eficiencia del sistema (disolución del gas en el líquido).
 - ✓ Elección del sistema que mejor se acomode a nuestras necesidades.
 - ✓ Búsqueda de materia prima. Electroválvulas, baterías, reguladores de presión, bombonas para gases a presión de pequeño tamaño, etc.
- Para el Objetivo 2:
 - ✓ Software y herramientas a utilizar.
 - ✓ Tipo de simulación
 - ✓ Resultados de la simulación y posibles interacciones.
 - ✓ Análisis de resultados e incertidumbre del diseño.
- Para el Objetivo 3:
 - ✓ Obtención de planos y documentación para fabricación del prototipo.

- ✓ Elección de materiales y acabados superficiales para la carcasa del inyector de gases.
- Para el Objetivo 4:
 - ✓ Elección de tipo y tecnología para la fabricación de las piezas para el prototipo.
 - ✓ Posibles fabricantes o formas de fabricar las piezas.

1.1. Enunciado

Fabricación de un inyector a presión portátil de gases en líquidos.

1.2. Análisis del Enunciado

Dependiendo de la temperatura, la presión y la composición química, un líquido determinado es capaz de aceptar mayor o menor cantidad de un gas dado produciéndose una disolución en la mezcla resultante.

Esta disolución de un gas en un líquido aporta a la mezcla resultante unas características químicas (y físicas) diferentes a las originales pudiendo obtener diferentes y curiosas variaciones en sus propiedades.

Las aplicaciones son múltiples en muchos ámbitos tanto industriales como domésticos. El principal ámbito hacia el que me gustaría orientar el proyecto es hacia cuestiones culinarias en un entorno doméstico. En concreto a cuestiones enológicas.

1.3. Alcance del Proyecto

En este proyecto se va a modelar un instrumento de fácil manejo y absolutamente inofensivo con la idea de que pueda ser utilizado en entornos domésticos en un futuro.

No se requiere ningún tipo especialización para su manejo y el funcionamiento debe ser lo más sencillo posible. La interface va a ser simple pero suficiente.

No se van a generar los documentos de mecanizado ni planos de todas las piezas. Tampoco se van a simular todas las partes del modelo. En el presente trabajo se va a limitar a cumplir con los objetivos mínimos marcados para cada área del máster y a abordar los objetivos enunciados en el apartado anterior.

Hay que tener claro que este diseño no es un instrumento de laboratorio ya que no vamos a tener controlados parámetros muy importantes como son la temperatura, la presión, la forma y tamaño del recipiente para la reacción química. No vamos a tener controlada la composición química del vino, su viscosidad, etc.

Si que va a ser un instrumento que permita una repetibilidad de la mezcla estable. Es decir, que con un determinado gas y con un vino dado se obtenga siempre la misma mezcla (o muy parecida) y por consiguiente el sabor del vino sea siempre el deseado.

2. Estudio del Arte

2.1. Fundamentos Teóricos.

Para llevar a cabo un proyecto es imprescindible realizar un estudio previo para asegurarnos de:

- La viabilidad del diseño. Tenemos que ver si es posible llevar a cabo lo que pretendemos. Para ello deberemos estudiar y recopilar todas las leyes físicas y/o químicas que regulan el funcionamiento de nuestro proyecto.
- Para hablar con propiedad y en términos correctos. Debemos utilizar un lenguaje común dentro del ámbito académico y utilizar los términos correctos para referirnos a las distintas partes de nuestro diseño.
- Ver qué y cómo han tratado este tema (o un tema muy parecido) otras personas y estudiar hasta dónde se ha llegado en el ámbito de este proyecto. Es lo que desarrolla en el estudio de mercado previo en el siguiente punto.

En este caso se trata de un proyecto que tiene un alto grado de base teórica química por lo que he tenido que estudiar intensivamente los diferentes tipos de reacciones químicas entre gases y líquidos, cómo se forman y en qué condiciones reaccionan.

Así, de lo primero que me di cuenta en las primeras búsquedas es que el proyecto que aquí se desarrolla tiene un nombre muy específico en el mundo químico y en el ámbito farmacéutico e industrial (que es donde más se usan estos equipos). Se denominaría literalmente “Reactor Químico Multifásico de Columna de Burbujeo” y más concretamente nuestro caso sería un “Reactor Químico Bifásico de Columna de Burbujeo”. La explicación la daré un poco más adelante en este mismo apartado, pero antes debemos empezar por el principio que es entender que reacciones se producen en nuestro reactor químico.

Mezcla o disolución

Tenemos dos componentes uno en fase líquida y otro en fase gaseosa, ¿qué sucede si los ponemos en contacto? Ésta es la primera pregunta que me hice y que podemos encontrar respuesta en las referencias bibliográficas³ (ThoughtCo, 2019), (Gitbook, 2016) o (ScientDirect, 2019).

Básicamente en una mezcla no se produce reacción química entre los componentes mientras que en las disoluciones sí que la hay. En una mezcla los componentes mantienen su identidad química ya que no se modifican o combinan los enlaces químicos entre ambas sustancias. Pese a no haber reacción química, sí que puede haber cambios en las propiedades físicas de la mezcla resultante.

Por ejemplo, la mezcla de alcohol y agua produce una mezcla cuyo punto de ebullición es mayor que el del agua y un punto de congelación por debajo que el alcohol

³ Además de las referencias bibliográficas, se puede consultar la documentación en el directorio de GitHub:
https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/blob/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/ref_doc

Las mezclas se pueden clasificar de distintas formas:

- Atendiendo a la homogeneidad del resultado, se clasifican en:
 - ✓ Homogéneas, cuando la mezcla tiene una composición uniforme a lo largo del volumen.
 - ✓ Heterogéneas cuando la mezcla no parece uniforme o cuando se aprecian diferentes fases.
- Atendiendo al tamaño relativo de las partículas de los compuestos se pueden dividir en:
 - ✓ Soluciones, cuando las partículas son tan pequeñas (menos de 1 nanómetro) que no es posible separarlas por decantación o centrifugación. Las soluciones son físicamente estables. Algunos ejemplos son, oxígeno en agua, mercurio en oro, opal, etc.
 - ✓ Coloides, cuando las partículas son muy pequeñas (entre 1 nanómetro y 1 micrómetro) y parece que se han desaparecido completamente ante el ojo humano. También son soluciones físicamente estables, pero pueden ser separadas por decantación o aisladas por centrifugación. Exhiben el efecto Tyndall⁴. Ejemplos de soluciones coloidales son la sangre, un spray de pelo o el humo.

Suspensiones. En las que se aprecia una mezcla no homogénea, No son estables por lo que se requiere continuo movimiento o estabilizantes para que las sustancias no se apelmacen. Como las soluciones coloides, muestran el efecto Tyndall⁴ y pueden ser separadas o aisladas las sustancias por decantación o centrifugación respectivamente. Ejemplos de suspensiones son las vinagretas (vinagre y aceite), arena, granito, etc.

¿Cuándo no se produce una mezcla? Como he comentado antes cuando hay reacción química, lo que significa que la entidad del reactante cambia. Ejemplos que no son mezclas sino disoluciones son, vinagre y soda que reacciona produciendo dióxido de carbono y agua.

Transferencia de materia en sistemas gas-líquido

Ya tenemos claro las diferencias entre las mezclas y las disoluciones, pero no hemos respondido todavía a la pregunta inicial ¿qué sucede si ponemos en contacto un gas y un líquido?

La respuesta está en el estudio realizado por Francisco Tamajón Álvarez en su Tesis Doctoral (Tamajón Álvarez, 2015 pp. 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.7, 3.8, 3.8.4, 6.1). En ella nos habla de los distintos modelos para transferencia de materia en sistemas gas-líquido (sistemas bifásicos).

La lectura de esta tesis ha constituido una fuente de información inigualable a la hora de abordar este proyecto tanto en aspectos teóricos como en aspectos constructivos (apartados 3.8, 3.8.4) y es de obligada lectura para quien quiera profundizar en el funcionamiento del presente proyecto.

Voy a resumir los aspectos fundamentales que he utilizado.

- Que es una fase y una interfase.

⁴ El efecto Tyndall es el fenómeno físico que causa que las partículas sean visibles al dispersar la luz.
Fuente Wikipedia.

Una fase es uno de los cuatro estados básicos en los que se puede encontrar una sustancia. Es lo que se denomina estados de agregación de la materia⁵. Hablaré de fase gaseosa (o soluto) cuando nos refiramos al gas que queremos mezclar y de fase líquida (o solvente) al vino.

Cuando ponemos en contacto dos fases, aparece otro concepto muy importante para los cálculos que es la interfase o la zona en la que están en contacto ambas fases. En esta zona se produce un gradiente de intercambio de materia.

Podemos ver esta ilustración en (Dirdal, 2015 p. 8), donde se apreciar la sección transversal de una burbuja de Taylor de radio r_{gas} en una tubería de radio r_{pipe} con un grosor de capa de líquido de λ .

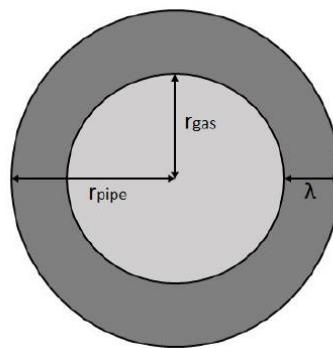


Figura 2.1.1. Distribución de gas y líquido en una tubería. Fuente (Dirdal, 2015 p. 8).

- Concepto de difusión.

“La difusión es el movimiento de un componente individual a través de una mezcla debido a un estímulo físico” (Tamajón Álvarez, 2015 p. 2.2).

Por lo tanto, en una difusión existe una transferencia de materia dese la fase gaseosa a la líquida a través de la superficie de interfase. El equilibrio se alcanza cuando las presiones parciales se igualan, es decir, cuando no existe gradiente o este se anula.

Los gradientes son las principales causas en un proceso de difusión y sus componentes principales son: difusión térmica (gradiente térmico), difusión por presión (gradiente de presión) y difusión forzada (por un agente externo, por ejemplo, un agitador).

Cuando juntamos el vino con el gas se va a producir un proceso de difusión del gas en el vino ya que existen distintos gradientes de presión y temperatura que van a forzar una transferencia de materia desde la fase gaseosa a la líquida a través de la interfase.

- Concepto de absorción de gases.

Es un proceso difusional en el que hay una transferencia de materia desde la corriente gaseosa a la líquida. Mas adelante veremos los distintos tipos de absorción.

- Coeficiente de transferencia de materia

⁵ Estado de agregación de la materia. Fuente Wikipedia.

Hemos visto que se produce una difusión entre la fase gaseosa y la líquida, pero, ¿de qué depende esa difusión.

Podemos aumentar la velocidad y el porcentaje de la difusión del gas en el vino de las siguientes maneras:

- ✓ Aumentando la velocidad de transferencia por unidad de área interfacial, esto es, aumentando la velocidad con la que se renuevan las superficies interfase (se puede lograr por medio de flujos forzados entre gas y líquido).
- ✓ O bien aumentando el área de interfase y la dispersión (maximizando el número de burbujas y disminuyendo su diámetro y distribuyéndolo por toda la base del reactor).
- ✓ Aumentando la diferencia entre las fuerzas impulsoras. Por ejemplo, centrándonos en la difusión por presión, si aumentamos la presión del líquido aumentará la difusión del gas en vino.

El coeficiente de transferencia de materia se introduce en las fórmulas para tratar la transferencia de materia entre dos fases (Tamajón Álvarez, 2015 p. 2.3).

Podemos decir que en un proceso donde tenga lugar una transferencia de una propiedad física entre dos fases, la velocidad de esta será proporcional al área entre las fases y la fuerza impulsora de la propiedad tratada. Matemáticamente lo podemos expresar así:

$$dJ = k \cdot dA \cdot \Delta C \quad (2.1.1)$$

donde:

- dJ:* caudal de propiedad transferido a través de un elemento diferencial de área interfacial.
- k:* coeficiente local de transferencia de materia.
- dA:* área de elemento diferencial de superficie interfacial.
- ΔC:* fuerza impulsora.

Los factores físicos-químicos e hidrodinámicos que influyen sobre el coeficiente local de transferencia de materia y por lo tanto sobre la velocidad de disolución del gas en el vino se pueden ver en la siguiente tabla:

Factores físico-químicos	Factores hidrodinámicos
Propiedades físicas del líquido. Solubilidad del gas en el líquido. Difusividad del gas en el líquido.	Velocidad del flujo del gas. Velocidad de flujo del líquido. Renovación interfacial. Geometría del difusor. Agitación de la fase líquida.

Tabla 2.1.1. Factores que influyen en la disolución. Fuente (Tamajón Álvarez, 2015).

Al final de este capítulo especificaremos cuales son las simplificaciones que hemos supuesto y los parámetros que podremos variar en nuestro dispositivo.

Pero antes es necesario echar un vistazo a los distintos modelos teóricos para la transferencia de materia en sistemas gas-líquido y dilucidar cual es el que vamos a utilizar para nuestros cálculos.

Modelos para la transferencia de materia en sistemas gas-líquido

De nuevo nos basamos en el trabajo de Tamajón (Tamajón Álvarez, 2015 p. 2.4) para analizar los distintos modelos teóricos que establecen el mecanismo de transferencia de materia de la fase gaseosa a la fase líquida, las resumo a continuación:

- Teoría de película. Esta teoría considera que la resistencia a la transferencia de materia está concentrada en una película estacionaria de un determinado espesor en el límite del fluido.
- Teoría de doble película. Esta teoría supone despreciables las diferencias de concentración en las fases y considera que la resistencia a la transferencia de materia se localiza en las dos películas de un determinado espesor adyacentes a la interfase, una película en la fase líquida y otra película en la fase gaseosa. Esta teoría supone que no hay resistencia en la interfase (Whitman, 1962).
- Teoría de penetración. (Higbie, 1935) fue el primero en demostrar que no hay difusión si el tiempo en contacto entre las películas separadas por la interfase es corto ya que no se genera gradiente. Higbie se basó en la absorción de burbujas estableciendo que cuando una burbuja asciende, el líquido en contacto con la burbuja es reemplazado en el tiempo que tarda en ascender el diámetro de la burbuja (aproximadamente).
- Teoría de renovación superficial. (Danckwerts, 1950) modificó la teoría de la penetración introduciendo el concepto de velocidad de renovación superficial.
- Teoría de película-penetración y Teoría de película-renovación. Toor y Marchello (1958), establecen hipótesis que permiten unificar las teorías de modelo de película y modelo de penetración.
- Teoría de la difusión turbulenta. Esta teoría incorpora el concepto de renovación superficial con variación de la difusión cerca las superficies por la acción de los remolinos en régimen turbulento.
- Teoría de estiramiento superficial. (Stewart, et al., 2005) aplica los conceptos de penetración y renovación a situaciones donde cambia periódicamente la superficie interfacial.

En nuestro caso consideraremos en régimen estacionario la teoría de la película en la fase líquida ya que la resistencia a la transferencia de mansa en la fase gaseosa es despreciable respecto a la líquida.

En el análisis CFD consideraremos otros modelos numéricos más ajustados al régimen transitorio turbulento.

Tipos de absorción de gases

- Absorción física.

En un proceso de absorción física (Tamajón Álvarez, 2015 p. 2.5), no existe reacción química. Por lo que estaremos hablando de mezclas bifásicas. La absorción del gas dependerá de su solubilidad que está en función de:

- ✓ La naturaleza de las sustancias y su fuerza impulsora proporcional a la desviación del equilibrio.
- ✓ Concentración del gas disuelto en un líquido a una presión y temperatura determinadas.
- ✓ Temperatura, siendo la solubilidad inversamente proporcional a ella.
- ✓ Presión, siendo la solubilidad directamente proporcional a ella.

En una absorción física, cuando un gas se pone en contacto con la superficie de un líquido, se produce una transferencia de materia desde la fase gaseosa a la líquida a través de la interfase que dará lugar a un proceso de disolución del gas en el líquido hasta establecer un equilibrio. La concentración resultante del gas disuelto en el líquido será la solubilidad del gas a la temperatura y presión de la operación.

En la transferencia de materia en sistemas bifásicos influyen distintas propiedades físicas como la viscosidad y la tensión superficial de vital importancia a la hora de calcular los coeficientes de transferencia.

- Absorción con reacción química.

La absorción seguida de una reacción química (Tamajón Álvarez, 2015 p. 2.6) se utiliza con mucha frecuencia ya que se consiguen factores de absorción muy superiores a los obtenidos en la absorción física.

En la absorción química se mezcla con la fase líquida un reactante que aumenta la capacidad de disolución. Este reactante disminuye la presión parcial interna de soluto sobre la disolución que conlleva un aumento de la fuerza impulsora y por lo tanto de la transferencia de materia.

- Absorción isoterma o no isoterma

La absorción física y la absorción química pueden provocar un aumento de temperatura en la fase líquida que suele concentrarse en la interfase de separación. Este aumento de temperatura es debido a los calores de disolución y reacción, y disminuye la solubilidad del gas en el líquido. En algunos casos este aumento de temperatura es despreciable, pero en otros hay que tenerlo muy en cuenta. (Tamajón Álvarez, 2015 p. 2.7).

En nuestro proyecto, vamos a suponer una absorción meramente física del gas en el vino. También vamos a despreciar el aumento de temperatura en la absorción y suponer que el proceso de disolución es isotérmico en todo el volumen de reacción.

Regímenes de flujo

Cuando en el interior de un recipiente cilíndrico ponemos en contacto el gas y un fluido, el movimiento de estos depende tanto de las fuerzas de flotabilidad como de fuerzas externas como el gradiente de presión, temperatura, etc., o combinación de ambas.

Cuando metemos gas en el fondo de la botella que contiene la fase líquida o vino, esta comienza a subir debido a las diferencias de densidad entre el gas y el líquido. Cómo se distribuye el gas en la botella es lo que se denominamos régimen de flujo (Dirdal, 2015 p. 2.2).

Los flujos de una sola fase son laminar (flujo laminar) y flujo turbulento (flujo caótico). En flujos bifásicos, el gas puede distribuirse en capas (régimen agitado o “chum” en inglés), pequeñas burbujas (régimen de burbujeo “bubbly” o disperso “disperse” en inglés), burbujas grandes (régimen baboso o “slug” en inglés, también conocidas como burbujas de Taylor (Taylor, et al., 1950)) o como columnas de gas rodeadas por el líquido (régimen anular o “annular” en inglés). En la siguiente figura (fuente original Weisman, 1983) podemos ver los distintos tipos de regímenes de flujo aire-agua en una tubería vertical.

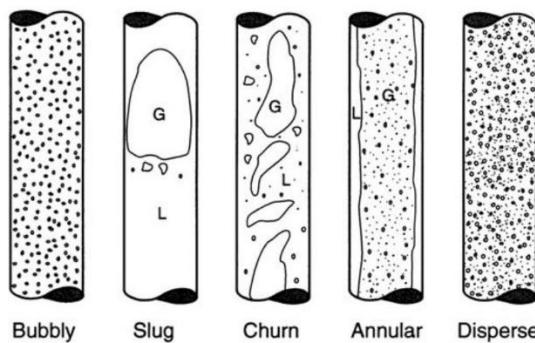


Figura 2.1.2. Regímenes de flujo en una mezcla bifásica. Fuente (E. Brennen, 2005 p. 170).

La siguiente figura relaciona la tendencia a un régimen de flujo determinado atendiendo a las velocidades de flujo de las fases. Fuente original Weisman, 1983.

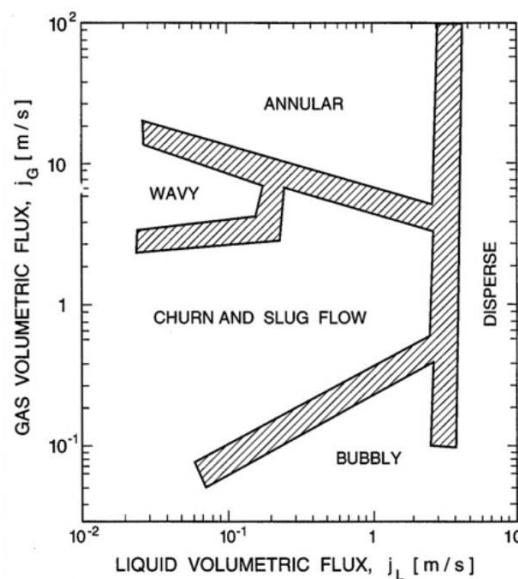


Figura 2.1.3. Mapa de regímenes de flujo bifásicos. Fuente (E. Brennen, 2005 p. 170).

El mapa anterior está trazado en base a los datos experimentales obtenidos en el estudio una mezcla bifásica aire-agua en una tubería vertical de 2,5cm de diámetro. En el mapa podemos ver las zonas de transición entre los distintos regímenes.

Este mapa nos puede servir de referencia para posicionar el régimen de funcionamiento de nuestro reactor bifásico en la zona de burbujeo que es la que nos interesa. Para ello deberemos trabajar con un flujo volumétrico de gas bajo.

También tendremos que tener en cuenta la distribución de las burbujas de manera que abarquen la mayor superficie posible de la botella o columna de burbujeo.

En la Figura 2.1.4, podemos ver las fotografías recogidas en el estudio de E. Brennen en las que se puede observar las distintas distribuciones según el flujo de gas en una tubería vertical de 10,2cm. A la izquierda: 1% de aire, en medio: 4,5% de aire, a la derecha: > 15% de aire. En este estudio se cita a la fuente original (Kytömaa, 1987).

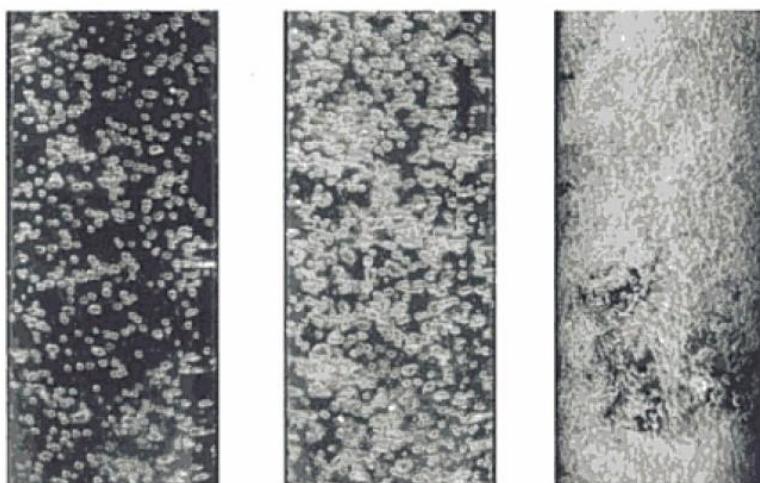


Figura 2.1.4. Fotos del flujo aire/agua en una tubería vertical.
Fuente (E. Brennen, 2005 p. 171).

Ecuaciones y modelos utilizados

Los modelos matemáticos para el cálculo de flujos de mezclas bifásicas se basan en varios principios fundamentales y en observaciones experimentales. Los principios fundamentales en los que se basa son, (Dirdal, 2015):

- ✓ Conservación de la masa
- ✓ Conservación del momento. Segunda ley del movimiento de Newton.
- ✓ Conservación de la energía. Primera ley de la termodinámica.

En este proyecto se van a realizar cálculos numéricos que resuelven de una manera gráfica los problemas que queremos acometer. Esto cálculos numéricos integran los modelos que hemos visto anteriormente que hacen uso de los principios fundamentales enunciados por (Dirdal, 2015) entre otros.

También se han utilizado ecuaciones y conceptos básicos de gases y teoría cinético molecular recogidas en la bibliografía (Cidead, 2019) y (Alcalá, 1993) como aproximación a los cálculos de algunas de las partes del reactor de este proyecto como el cálculo de válvulas y pérdida de carga a lo largo del sistema.

A continuación, voy a hacer un breve resumen de las ecuaciones base de los gases. Las leyes de los gases son:

- Ley de Boyle.

“A temperatura constante, el volumen de una mezcla gaseosa es inversamente proporcional a la presión del gas”

$$V = k_1 \cdot 1/p \quad (2.1.2)$$

donde:

V: volumen del gas.

p: presión del gas.

k₁: es una constante.

- Ley de Charles.

“A presión constante, el volumen de una muestra gaseosa es proporciona a la temperatura del gas, expresada en escala absoluta o Kelvin”

$$V = k_2 \cdot (t + 273,15) = k_2 \cdot T \quad (2.1.3)$$

donde:

V: volumen del gas.

t: temperatura en grados centígrados.

T: temperatura escala absoluta o Kelvin. El cero absoluto es -273,15°C.

k₂: es una constante.

- Ley de Gay-Lussac.

“A volumen constante, la presión ejercida por una muestra gaseosa es proporciona a la temperatura del gas en la escala absoluta”

$$p = k_3 \cdot (t + 273,15) = k_3 \cdot T \quad (2.1.4)$$

donde:

p: presión ejercida por el gas.

t: temperatura en grados centígrados.

T: temperatura escala absoluta o Kelvin. El cero absoluto es -273,15°C.

k₃: es una constante.

- Principio de Avogadro

A presión y temperatura fijas, el volumen de cualquier gas es proporcional al número de moles presentes.

$$n = k_4 \cdot V \quad (2.1.5)$$

donde:

V: volumen del gas.

n: número de moles.

k₄: es una constante de proporcionalidad.

- Ley de los gases ideales.

Un gas ideal es el que cumple exactamente las leyes anteriores. Los gases reales no las cumplen exactamente sobre todo a baja presión y a temperatura alta. Para un gas ideal, se pueden resumir las tres leyes anteriores en la ley de los gases ideales.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.1.6)$$

donde:

p: presión ejercida por el gas.

V: volumen del gas.

n: número de moles.

T: temperatura escala absoluta o Kelvin.

R: constante de los gases ideales. $R = 0,08205 \text{ litro} \cdot \text{atm} / \text{K} \cdot \text{mol}$

Volumen molar de un gas (V_m) es el ocupado por un mol de dicho gas. En condiciones normales, 273,15K (0°C) de temperatura y 1 atm de presión, este volumen molar se llama volumen molar normal y para cualquier gas ideal es de 22,414 litros

A continuación, podemos ver una tabla con los volúmenes molares de algunos gases reales que podrían ser utilizados para inyectar en el vino.

Gas	H ₂	He	Ne	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	NH ₃
Densidad (g/litro)	0,090	0,178	0,900	1,250	1,429	1,784	1,977	0,771
Masa molar (g/mol)	2,020	4,003	20,180	28,010	32,000	39,950	44,010	17,030
Volumen molar normal (l/mol)	22,428	22,426	22,425	22,404	22,394	22,393	22,256	22,094

Tabla 2.1.2. Tabla de densidades y volúmenes molares. Transcripción (Alcalá, 1993).

- La teoría cinético-molecular de los gases

Desarrollada por L. Boltzmann (1844-1906) y J.C. Maxwell (1831-1879). Esta teoría explica por qué los gases reales se comportan de forma distinta a los gases ideales. Muchos de los modelos que hemos visto en puntos anteriores se basan en cálculos numéricos aplicados sobre gases reales lo que implica aplicar la teoría cinético-molecular en los cálculos.

Esta teoría parte de tres hipótesis:

1. La distancia entre las moléculas de un gas es muy grande en comparación al tamaño de las partículas.
2. Las moléculas se mueven rápido y constantemente con dirección aleatoria y en línea recta. Chocan entre sí y con las paredes de forma elástica. No hay fuerzas de atracción entre las moléculas ni con las paredes.
3. Cada molécula tiene una energía cinética determinada y la energía media total es proporcional a la temperatura absoluta.

Según este modelo para cualquier temperatura puede haber moléculas que se mueven muy rápido. La presión no es más que los choques de las moléculas con las paredes del contenedor. Considerando N partículas con una masa m moviéndose a una velocidad v en un cubo de volumen V, tenemos que:

$$p = \frac{N \cdot m \cdot v^2}{3 \cdot V} \quad (2.1.7)$$

donde:

- p:* presión ejercida por el gas.
V: volumen del gas.
N: número de partículas.
m: masa de una partícula.
v: velocidad media de las partículas.

- Ley de las mezclas gaseosas

Formulada por Dalton en base a la teoría cinético molecular mediante observaciones experimentales, dice:

“La presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales de cada uno de los componentes individuales de la mezcla gaseosa, definiendo presión parcial como la que produciría cada gas si estuviera solo en el recipiente”

- Ley de difusión de los gases

Graham (1805-1869) observó que las velocidades de difusión de dos gases a la misma presión y temperatura están en razón inversa a de la raíz cuadrada de sus masas molares:

$$\frac{v_{\text{difusión1}}}{v_{\text{difusión2}}} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_c}{m}} = \sqrt{\frac{3 \cdot R \cdot T}{M}} \text{ utilizando (2.1.6)} \quad (2.1.8)$$

donde:

$v_{\text{difusión1}}$: velocidad de difusión del gas 1.

$v_{\text{difusión2}}$: velocidad de difusión del gas 2.

M_1 : masa molar del gas 1.

M_2 : masa molar del gas 2.

E_c : Energía cinética.

m : masa de una partícula.

v : velocidad media de las partículas.

- Los gases reales.

Van der Waals, enunció la ecuación de los gases reales cuyo comportamiento difiere de los gases ideales ya que el volumen de las moléculas no siempre es despreciable (sobre todo cuando los comprimimos) y además hay atracciones entre ellas (sobre todo a bajas velocidades, temperaturas bajas). Esta ecuación tiene en cuenta los factores derivados de la compresión y de las bajas temperaturas.

$$(p + \frac{n^2 \cdot a}{V^2}) \cdot (V - n \cdot b) = n \cdot R \cdot T \quad (2.1.9)$$

donde:

p : presión ejercida por el gas.

a : constante experimental relacionada con las atracciones moleculares.

b : constante experimental relacionada con el volumen molecular.

V : volumen del gas.

n : número de moles.

T : temperatura escala absoluta o Kelvin.

R : constante de los gases ideales. $R = 0,08205 \text{ litro} \cdot \text{atm} / \text{K} \cdot \text{mol}$

En la siguiente tabla podemos ver las constantes de la ecuación de los gases reales para determinados gases de interés en nuestro proyecto:

Gas	H ₂	He	Ne	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	Xe
a (l ² atm / mol ²)	0,244	0,0341	0.2135	1,390	1,360	1,363	3,592	4,250
b (cm ³ / mol)	26,610	23,700	0.0171	39,120	31,830	0,0322	42,670	0.051

Tabla 2.1.3. Tabla de constantes de Van der Waals.

Fuente (Alcalá, 1993) y Wikipedia⁶.

Modelo teórico adoptado

Hemos hecho un pequeño repaso a los fundamentos teóricos sobre los que se apoya el principio de funcionamiento del dispositivo que vamos a diseñar en este proyecto. Todos estos aspectos son muy importantes y nos han servido para responder a la pregunta inicial que nos hacíamos “¿qué sucede cuando ponemos en contacto un gas con un líquido?”. En nuestro caso, qué va a suceder cuando ponemos en contacto el vino con alguno de los gases que queremos disolver.

Con los conocimientos adquiridos debemos establecer los modelos que vamos a utilizar a lo largo del proyecto, para ello lo primero que he hecho es detectar qué parámetros que influyen en la disolución voy a poder controlar.

1.- Parámetros controlables

Partiendo de la Tabla 2.1.1, en la que indicamos los factores que influyen en la disolución, he elaborado esta tabla con los factores que influyen en la disolución y vamos a poder controlar con nuestro reactor químico:

Factores físico-químicos	Factores hidrodinámicos
Propiedades físicas del gas.	Velocidad del flujo del gas. Renovación interfacial. Tiempo de reacción. Geometría del difusor.

Tabla 2.1.4. Factores que influyen en la disolución controlables.

- Propiedades físicas del gas.

Vamos a poder elegir el tipo de gas a inyectar por lo tanto controlaremos la solubilidad de un determinado gas en el vino previo estudio empírico.

⁶ https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Constantes_de_Van_der_Waals

- Velocidad del flujo del gas.

Nuestro sistema va a ser capaz de reducir y estabilizar la presión de suministro de una bombona con el gas de inyección para posteriormente controlar precisamente el flujo del gas en el líquido en el rango deseado con una precisión y estabilidad requeridas.

- Renovación interfacial.

Con el flujo del gas ajustado y el diámetro de los orificios del difusor, vamos a poder controlar el diámetro inicial de las burbujas, (Akita, et al., 1974) y (Martín del Campo, 2015). El diámetro inicial de las burbujas influye en dos aspectos muy importantes para controlar la difusión:

4. La velocidad con la que se renueva la interfase a través de la cual se produce la difusión. A menor diámetro, mayor superficie de interfase y en consecuencia mayor disolución.
5. El tiempo de ascensión de la burbuja. A mayor diámetro, burbujas más grandes y menor tiempo de reacción debido a que la burbuja asciende más rápido.

Este parámetro lo vamos a poder variar teniendo diseñados físicamente varias cabezas de difusor con distintos diámetros y distribuciones. Estas cabezas de difusor van a ser intercambiables.

- Tiempo de reacción.

Podremos controlar, dentro de un rango determinado, el tiempo de reacción variando la longitud de la varilla del difusor. Para ello podremos tener distintas longitudes de varilla de difusor.

- Distribución del gas.

Con las cabezas de difusor intercambiables, vamos a poder fijar distintas geometrías de difusión del gas en el vino, por lo tanto, vamos a tener distintas concentraciones de difusión en la columna de burbujeo. Las distintas distribuciones las vamos a controlar con el diámetro, el número y la localización de las miro perforaciones del difusor.

Algunos de estos parámetros están estrechamente interrelacionados y habrá que tenerlos en cuenta a la hora de ajustar los parámetros del reactor. Por ejemplo. La distribución del gas depende del flujo prefijado y del tipo de difusor. El tiempo de reacción depende de la longitud de la varilla del difusor, pero también depende de la velocidad a la que asciende la burbuja y por consiguiente del flujo prefijado, etc.

2.- Suposiciones

Una vez detectados los parámetros que voy a poder controlar, es necesario establecer una serie de suposiciones que van a ser tenidas en cuenta a la hora de diseñar o resolver los problemas que nos encontraremos durante la realización de este proyecto. En este caso, estas son las suposiciones que he hecho:

- Trabajaremos en régimen de burbujeo (ver Figura 2.1.2). Nos interesa trabajar este régimen para maximizar el tiempo de reacción y la superficie interfacial. Se trata de un régimen de velocidad lenta (ver el mapa de la Figura 2.1.3) por lo que deberemos trabajar con flujos volumétricos de gas pequeños. En la Figura 2.1.4 podemos ver en la imagen central el régimen de flujo hacia el que tenderemos de forma ideal.
- Porcentaje de mezcla gas-líquido inferior al 10%. Supondremos siempre que el volumen de gas en el líquido es inferior al 10% con esta suposición, podremos aplicar el modelo discretizado Lagrangiano al cálculo de las trayectorias de las burbujas en el cálculo del difusor (Fluent, 2001), (Bakkerr, 2002-2006). Lo veremos con mayor detalle en el punto 3.3.2.4.
- Reacción isoterma y adiabática. Supondremos que en la absorción del gas no se produce calor o que este es despreciable y además no se transmite a su entorno. Supondremos condiciones ambientales de 20°C y 1 atm.
- Flujos laminar y turbulento. En los cálculos supondremos un flujo laminar cuando el caudal volumétrico sea pequeño y turbulento cuando aumentemos la velocidad de este.

3.- Simplificaciones

Dado que el ámbito de aplicación de este proyecto es muy amplio, he decidido aplicar una serie de simplificaciones generales:

- Fase gaseosa. Gas, dióxido de carbono CO₂. Pese a que la idea del dispositivo inyector de este proyecto es mezclar distintos tipos de gases con el vino, voy a centrarme en un solo tipo de gas, el dióxido de carbono. La razón principal por la que he elegido este gas como fase gaseosa es la extensa literatura en la que también se utiliza como referencia, la facilidad de obtenerlo, etc. Ver conclusiones en (Tamajón Álvarez, 2015 p. 6.1.1) donde nos habla de la absorción física del CO₂ en agua y su dependencia con la temperatura.
- Fase líquida. Líquido, agua H₂O. El agua no es vino, pero nos sirve de referencia a la hora de modelar nuestro inyector. Cualquier vino tiene una compleja composición con largas cadenas de hidro carburos, gran cantidad de sales, azúcares, taninos y otras sustancias imposibles de tratar en este proyecto, además cada vino es distinto. La elección del agua como solvente o fase líquida es una decisión de simplificación universal, es un componente fundamental del vino. También ampliamente tratada en la literatura de referencia. Para una aproximación más real al cálculo de solubilidades en mezclas salinas recomiendo la lectura del trabajo de (J. Pérez, et al., 2009).
- Gas ideal. La fase gaseosa se comporta de forma ideal ya que trabajamos a relativamente bajas presiones y a temperaturas normales no criogénicas que es donde se acentúan la divergencia de los gases ideales.

- Absorción física. Vamos a despreciar la componente química en la reacción si suponer que la absorción del gas sólo se debe a cuestiones físicas. Vamos a despreciar la viscosidad y la tensión superficial del agua que influyen en la disolución del gas en el líquido.
- La columna de burbujeo es siempre la misma. La columna de burbujeo de nuestro sistema es la botella de vino en sí. Vamos a suponer que siempre va a ser la misma botella de vino, una la botella Bordelesa de 75cl que se utiliza comúnmente en el embotellado de vinos secos. Ver apartado 3.5 más adelante.

2.2. Fundamentos Constructivos.

Con los fundamentos teóricos claros, es importante adentrarnos en los aspectos constructivos de los reactores químicos para acometer este proyecto. Debemos ser capaces de identificar las partes del reactor y ver que alternativas tenemos a la hora de diseñar.

La literatura disponible para el diseño de reactores multifásicos es muy extensa, recomendando la lectura de la bibliografía sobre este tema. (Juan A., 2019), (Tamajón Álvarez, 2015 p. 3.8), (Iborra, et al., 2013), (Stankiewicz, 2019), (Díaz Martín, 2001 p. 2.2.2). Reactores de tres fases 2.2.2. Reactores de tanque airlift, donde hay circulación forzada de las distintas fases en zonas diferenciadas circulación de fases. 2.2.

Tipos de reactores multifásicos

La función principal de los reactores multifásicos es proporcionar el mejor contacto posible entre las fases involucradas para que la reacción sea lo más eficaz posible (Tamajón Álvarez, 2015 p. 3.8). Para que el reactor sea lo más eficaz posible se deben tener en cuenta los factores que influyen en la reacción y que se recogen en la Tabla 2.1.1. Para maximizar este contacto entre fases y aumentar la eficacia se utilizan distintas técnicas como:

- ✓ La utilización de catalizadores. Se pueden utilizar catalizadores químicos disueltos en la fase líquida para aumentar la reacción del sistema aumentando la fuerza impulsora. O se pueden utilizar catalizadores en estado sólido en suspensión homogénea o catálisis con la fase líquida para aumentar eficiencia en la absorción del gas.
- ✓ El control de temperatura. Es común a nivel industrial tener con control de temperatura de manera que podemos reducir la temperatura para aumentar la absorción física del gas en el líquido
- ✓ La presurización de los tanques. También es muy común a nivel industrial, químico o en la industria farmacéutica utilizar tanques presurizados en los que aumentando la presión se consigue aumentar la transferencia de materia.
- ✓ Flujos forzados a la par o en contra de las fases. Es posible forzar los flujos para que la renovación de la superficie interfacial sea más rápida y en consecuencia aumente la cantidad de gas absorbido y la eficiencia del sistema.
- ✓ Procesos en cascada y/o realimentados. Se pueden poner varios reactores en cascada optimizados para un tipo de reacción o proceso determinado. También es común la realimentación de las fases (previo proceso regenerativo) hasta llegar a la concentración deseada.

Me ha parecido interesante el resumen visual de los tipos de reactores que hace (Stankiewicz, 2019 p. 2)

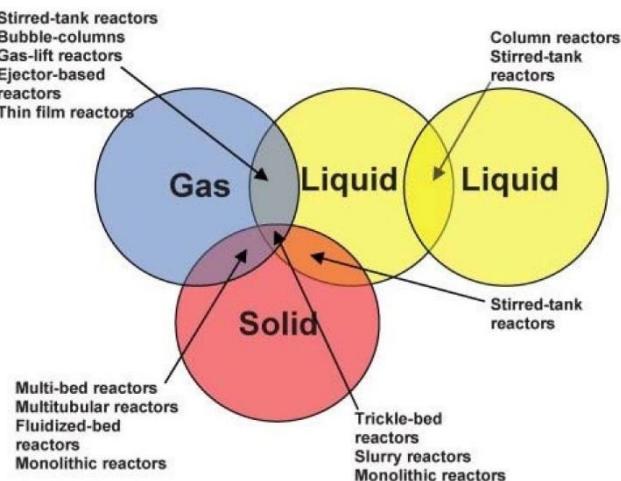


Figura 2.2.1. Tipos de reactores multifásicos. Fuente (Stankiewicz, 2019 p. 2).

Regímenes de operación de los reactores

Existen dos tipos de modo de operación de los reactores químicos:

- Modo discontinuo: en el que no hay una alimentación continua de las fases, sino que se introducen estas, se espera la reacción y se descarga la mezcla para empezar un nuevo ciclo.
- Modo continuo: en este modo la alimentación de las fases es continua.

Tipos de reactores bifásicos gas-líquido

En los reactores bifásicos la velocidad de transferencia de materia depende, entre otras cosas, de los coeficientes de transferencia de materia del gas y del líquido y del área interfacial disponible para la transferencia del gas al líquido. (Tamajón Álvarez, 2015 p. 3.8).

En nuestro reactor químico van a estar implicadas las fases líquida y gaseosa así que nos centraremos en los reactores químicos bifásicos tipo:

- ✓ Reactores de tanque agitado (Stirred-tank reactors). Para grandes cantidades o en reacciones exotermas⁷ ya que la agitación favorece la reacción. También es útil cuando el catalizador⁸ tiene que mantenerse en suspensión (Juan A., 2019 pág. 6).
- ✓ Columnas de burbujeo o borboteo (Bubble-columns reactors). Burbujas de gas ascendentes (fase dispersa), reaccionan en un tanque con la fase líquida continua. La fase líquida puede tener algún componente disuelto o en suspensión para aumentar la reacción. Si hablamos de una columna de burbujeo en cuya fase continua hay un sólido en suspensión, nos referiremos a reactor trifásico.
- ✓ Tanques de burbujeo con circulación forzada (Gas-lift reactors). A diferencia de las columnas de burbujeo los reactores gas-lift o air-lift (según la literatura) tienen zonas

⁷ Cualquier reacción que genera energía. https://es.wikipedia.org/wiki/Reacci%C3%B3n_exot%C3%A9rmica

⁸ Cualquier sustancia que aumenta la reacción sin perder masa. <https://es.wikipedia.org/wiki/Cat%C3%A1lisis>

de circulación forzada para las distintas fases (Díaz Martín, 2001 p. 2.2.2). Estas zonas se consiguen introduciendo en el tanque de reacción tubos delimitadores de las zonas.

- ✓ Reactores de inyección (Ejector-bassed reactors). En estos reactores, la mezcla se produce al más alto nivel inyectando el líquido en la zona de baja presión de un estrechamiento donde por efecto de Venturi el gas ha adquirido una alta energía cinética. Al aumentar la presión en la tobera de salida el gas implosiona generándose una mezcla total muy rápidamente (Ogawa, et al., 1986).
- ✓ Columnas de paredes mojadas (Thin film reactors). Útil para reacciones muy exotermas⁷ y rápidas o cuando necesitamos tener muy controlada la superficie interfacial (Juan A., 2019 pág. 6).

Tipos de reactores trifásicos gas-líquido-sólido

Pero también podríamos utilizar una tercera fase sólida en el vino (un catalizador⁸ inocuo) para aumentar el coeficiente de transferencia de masa y por consiguiente la cantidad de gas en el líquido. Con una tercera fase aumentamos enormemente el rendimiento del reactor químico, (Díaz Martín, 2001). Los reactores químicos que utilizan tres fases son:

- Reactores monolíticos, (Monolithic reactors). Son un tipo de reactores estructurados que constan en su interior de unas unidades mínimas sólidas extrusionadas llamadas monolitos por los cuales circula una fase que intercambia calor con la segunda fase líquida del exterior a través de la fase sólida del monolito. Esto reactores también son conocidos como intercambiadores caloríficos de tubos. (Jeifetz, y otros, 2011)
- Atendiendo a la fase sólida
 - ✓ Reactores de sólido disperso, (Slurry reactors). Reactores de fluidazo, compuesto acuoso o lechazo. Pueden tener un contactor o difusor de tipo:
 - Tanque agitado.
 - Lecho fluidazo.
 - Lecho móvil o pistón.
 - Columnas de burbujeo o borboteo.
 - ✓ Reactores de sólido fijo, Lecho fijo.
- Atendiendo a la fase líquida, si la resistencia a la transferencia de masa se encuentra en la fase líquida o en la gaseosa, se considera el líquido como fase dispersa o el gas como fase continua o viceversa
 - ✓ Líquido fase dispersa (trickle-bed reactor) el líquido puede estar como como.
 - Columna de gotas
 - Columna de lluvia
 - Columna de riachuelos.
 - ✓ Gas fase dispersa (bubble reactor) el gas se dispersa en forma de burbujas.

Tipos de contactor o de difusor

El contactor es el elemento del reactor que pone en contacto las fases del reactor pudiendo haber muchos tipos de formas y estrategias a la hora de diseñar el contactor. Es frecuente que el tipo de contactor de nombre al reactor. Un resumen de los distintos tipos de contactores es:

- Tanque agitado.

Trabaja régimen discontinuo, y se utiliza ampliamente en la industria con líquidos de alta viscosidad. Existen agitadores mecánicos o magnéticos encontrándose una amplia gama de tipos de agitador (en cuanto a forma disposición y tamaño de las paletas) siendo los más comunes los de tipo hélice turbina o los de paletas con hojas verticales o inclinadas (Tamajón Álvarez, 2015 p. 3.8.1).

- Columna de Relleno.

Trabaja en régimen continuo, en el interior de la columna se mete un sólido inerte llamado relleno cuyo objetivo es proporcionar una mayor superficie de contacto entre el gas y el líquido (Tamajón Álvarez, 2015 p. 3.8.2). Los rellenos más utilizados son los conocidos como anillos Rasching⁹ que fuerzan un flujo en zig-zag.

- Columna de platos.

Trabaja en régimen continuo e intercala platos de contacto a intervalos regulares entre el gas y el líquido en la columna de reacción formando distintas etapas (Tamajón Álvarez, 2015 p. 3.8.3).

- Columna de burbujas.

Las burbujas de gas se encuentran dispersas en la fase líquida que como se ha comentado anteriormente, pueden tener algún componente disuelto o suspendido en ella para aumentar la reacción. Se ha demostrado que un contactor de tipo columna de burbujeo es muy eficaz por su elevada velocidad de transferencia de materia y bajos costos de mantenimiento sin necesidad de agitadores o rellenos (Tamajón Álvarez, 2015 p. 3.8.4). En las columnas de burbujeo la alimentación de la fase gaseosa trabaja en régimen continuo y la fase líquida puede ser proporcionada en régimen continuo o discontinuo y a contracorriente. En los trabajos (Camacho Soto, et al., 1994) y Reyes Fonseca (Reyes Fonseca, et al., 2013) podemos encontrar más información sobre las columnas de burbujeo.

- Otros tipos de contactores:

⁹Cilindros de igual altura que diámetro. https://es.wikipedia.org/wiki/Anillo_de_Raschig

- ✓ Pulverización o inyección. El líquido es atomizado en una corriente gaseosa. Se utilizan cuando la resistencia a la transferencia de materia se encuentra principalmente en el líquido.
- ✓ Centrífugos. Este contactor aprovecha la fuerza centrífuga para aumentar la reacción.
- ✓ Capas o paredes mojadas. Este tipo de contactor permite controlar la superficie interfacial de contacto de forma muy precisa. Es muy utilizado en laboratorios.

Tipo de reactor utilizado este proyecto

Hemos echado un pequeño vistazo a los tipos de reactores existentes y a los equipos de contacto gas-líquido que existen. Tenemos claras las partes de un reactor químico y cuáles son las características principales de cada uno de ellos, etc.

Nos toca decidir qué tipo de reactor vamos a diseñar en el presente proyecto. La respuesta es:

Vamos a diseñar un reactor químico bifásico de columna de burbujeo en régimen de alimentación de gas continuo sin flujos forzados, sin presurizar y sin control de temperatura.

Porqué:

- Tipo de reactor. Reactor químico bifásico. Pese a que podríamos disolver en el vino algún tipo de componente para aumentar la transferencia de masa del gas al vino y por lo tanto la eficiencia, no vamos a hacerlo porque estaríamos alterando sobremanera la composición química del vino añadiendo otra variable al sabor que no nos interesa. También podríamos meter en el vino un catalizador inocuo para aumentar la absorción física (estaríamos hablando entonces de un reactor trifásico) pero tampoco vamos a plantearlo ya que introduciría en el vino unos residuos sólidos en forma de posos no muy agradables.
- Tipo de contactor. Columna de burbujeo. La columna de burbujeo es un tipo de contactor altamente eficaz y barato, de fácil construcción, que encaja perfectamente con lo deseado en este proyecto. La relación altura diámetro de la columna de burbujeo, entre 3 y 6 según (Tamajón Álvarez, 2015 p. 3.8.4) pudiendo llegar incluso a 10, encaja con las medidas estándar de una botella de vino Bordelesa por lo que podremos utilizar el propio recipiente del vino como columna del reactor.
- Régimen de funcionamiento. La fase gaseosa va a trabajar en régimen continuo durante todo el tiempo de operación, mientras que la fase líquida va a ser preciso renovarla para efectuar otro ciclo.
- Tipo de flujo. Sin flujo forzado. El régimen de flujo va a ser natural no forzado, intrínseco a la puesta en contacto de un gas y un líquido. El gas va a ascender en forma de burbuja por la diferencia de presiones entre el gas y el líquido.
- Condiciones atmosféricas:

- ✓ Presión. Sin presurizar. La botella va a estar a presión ambiente con una abertura en la parte superior por la que escapará de forma no recuperable el gas no disuelto durante el proceso. No queremos que la botella de vino estalle.
- ✓ Temperatura. Sin control de temperatura. No vamos a poder controlar la temperatura dentro de la columna de burbujeo. Podría diseñarse una funda que controlase la temperatura a la que se realiza la gasificación del vino, pero queda fuera el alcance de este proyecto.

2.3. Análisis de Mercado¹⁰

Antes de empezar con el desarrollo del proyecto, es interesante realizar un pequeño trabajo de investigación a través de Internet para ver si existe un instrumento igual o parecido al que queremos diseñar, ver como se ha realizado y hasta donde se ha llegado a este respecto.

Así lo primero que llama la atención es la inexistencia de un equipo portátil con las características del que pretendemos diseñar. Lo más parecido que he encontrado es este aireador eléctrico de VinoMax.

Aireadores

Se trata de un aireador de vino eléctrico que produce una oxigenación del vino mediante circulación forzada del aire del entorno ambiental.

Producto: VinoMax	Tipo: Aireador
	<p>url: link_01</p>
	<p>Descripción:</p> <p>Este dispositivo acelera la oxigenación del vino mediante circulación forzada del aire ambiental.</p> <p>Es una mejora de los decantadores de vino tradicionales.</p>
	<p>Precio: 39€</p>
	<p>Notas:</p> <p>Este producto se limita a la oxigenación del vino con el aire ambiental, por lo que no dispone de botellas de gas comprimido.</p> <p>El flujo en la reacción no está controlado.</p>

Tabla 2.3.1. Tabla de producto VinoMax. Fuente: fabsoluciones.es

La principal diferencia entre este dispositivo y el que tratamos en este proyecto es que nuestro dispositivo va a poder mezclar el vino con diversos tipos de gases con una composición conocida y precisa y en una proporción controlada con un alto grado de repetibilidad.

Conservación de vinos

Investigando un poco más el mercado actual, aparecen una serie de dispositivos portátiles en su mayoría orientados a la conservación o para evitar el deterioro del vino una vez abierto o descorchada la botella.

Pese a que su funcionalidad es distinta a la que queremos dar nosotros a nuestro dispositivo, nos sirven de referencia a nivel de diseño ya que muchos de ellos utilizan elementos que son comunes a nuestro inyector, como las bombonas de gas, la fijación a la botella, etc.

¹⁰ El directorio de referencia en el repositorio del proyecto es:
https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_sales/marketing/market_study

Existen varias estrategias para conservar el vino:

- ✓ Sacar el aire de la botella haciendo el vacío de forma mecánica o manual. Al sacar el aire evitamos la oxidación del vino.
- ✓ Inyectar un gas inerte como Argón o Nitrógeno de mayor densidad que el aire de manera que se genera una capa protectora en la superficie del vino que impide que este entre en contacto con el aire y por lo tanto la degradación del vino por oxidación.

A continuación, muestro alguno de estos equipos.

Equipos de conservación de vino por vacío

Producto: Vacuvin	Tipo: Conservador de vino por vacío
url: link_01	
Descripción: Equipo portátil para conservación de vinos no espumosos mediante vacío por bombeo manual o eléctrico.	
Precio: 15€	
Notas: Este producto está diseñado únicamente para conservación del vino una vez abierto sin añadir modificar o ensalzar el sabor o el aroma original del vino. Mantener el vacío durante largos períodos de tiempo es difícil por lo que hay que hacer un mantenimiento del vacío cada cierto tiempo.	
	
Vaciado manual: link_02	Vaciado eléctrico: link_03

Tabla 2.3.2. Tabla de producto Vacuvin. Fuente: vacuvin.com

Producto: Presovac	Tipo: Conservador de vino por vacío y escanciador
	<p>url: link_01</p> <p>Descripción: Equipo portátil para conservación de vinos mediante vacío bombeo eléctrico.</p> <p>Precio: 297€</p> <p>Notas: Este equipo además de preservar el vino por vacío mediante bombeo eléctrico, permite servir las copas. Para ello han diseñado unos tapones especiales que hay que adquirir para cada botella. Mantener el vacío durante largos períodos de tiempo es difícil por lo que hay que hacer un mantenimiento del vacío cada cierto tiempo. Con este dispositivo aseguran que el vacío se mantiene sin pérdidas durante dos semanas.</p>

Tabla 2.3.3. Tabla de producto Presovac. Fuente: fabsoluciones.es

Equipos de conservación de vino por inyección de gas inerte

Producto: Inyector	Tipo: Inyector de sobremesa tipo columna
	<p>url: link_01, link_video</p> <p>Descripción: Maquina industrial para la inyección de gases inertes en las botellas de vino.</p> <p>Precio: 1270€</p> <p>Notas: Se trata de un dispositivo industrial de aspecto tosco pero que incluye activación mediante electroválvulas y control de flujo como el que pretendemos desarrollar. No es un equipo portátil ni bonito.</p>

Tabla 2.3.4. Tabla de producto Inyector. Fuente: tiendainvia.com

Producto: Coravin®	Tipo: Conservador de vino por inyección de argón y escanciador.
url: link_01 , link_vídeo	
Descripción: Protege el vino de la oxidación conservando el corcho original en su sitio. Además, permite servir el vino sin abrir la botella.	
Precio: 200€ - 1000€ según modelo.	
Notas: En este producto podemos ver que utilizan capsulas de gas argón presurizado con un 99,9% de pureza como las que queremos utilizar en nuestro proyecto. El sistema inyecta gas después de servir la copa para preservar el vino. Una botella de argón permite servir hasta 15 copas.	
 The image shows the Coravin® model two kit. It includes a black handheld device with a digital display and a small screen, a black carrying case with a red strap, two black argon canisters with white labels, and three black needles of varying sizes.	
Coravin® model two: link_02	

Tabla 2.3.5. Tabla de producto Coravin®. Fuente: coravin.com

A nivel industrial, nos encontramos con las soluciones portátiles de algunos de los mayores distribuidores de gases a presión a nivel mundial.

En la página siguiente podemos ver una pistola de inyección de gases de Abello Linde. A esta pistola debemos acoplarle el reactor con el vino y la botella de gas comprimido que deseamos inyectar.

Producto: Linde - Pistola inyectora	Tipo: Inyector portátil industrial
	url: link_01
	Descripción: Pistola industrial inyectora de gases.
	Precio: - €
	Notas: Esta es una solución típica de inyección de gases a nivel industrial. Nuestra misión es hacerla más portátil y con una estética más cuidada.

Tabla 2.3.6. Tabla de producto Pistola Inyectora. Fuente: abellolinde.es

Tanto en los dispositivos Coravin® como en el dispensador CV1T (ver la siguiente tabla de producto) que trabajan a presión, se han dado casos de estallido de la botella de vino por exceso de presión. En nuestro diseño vamos trabajar a presión ambiente.

Producto: Dispensador CV1T	Tipo: Conservador de vino por inyección de nitrógeno y dispensador de vino
	url: link_01 , link_02
	Descripción: Este sencillo dispositivo inyecta nitrógeno en la botella haciendo de conservante y a la vez de impulsor del vino a través del sifón.
	Precio: 99€
	Notas: Este sencillo dispositivo evita la oxidación introduciendo nitrógeno en la botella (a diferencia de los anteriores dispositivos que utilizaban argón como gas inerte). Utiliza mini bombonas a presión de nitrógeno. A diferencia de nuestro proyecto, este dispensador trabaja a presión, es decir, no hay salida de para el gas inyectado. Esto hace que la presión del gas impulse el vino hacia la copa por el sifón pudiendo utilizarse este dispositivo como dispensador de vino. Este aumento de presión en la botella puede ser peligroso por lo que nosotros diseñaremos un dispositivo que trabaje a presión ambiente.

Tabla 2.3.7. Tabla de producto Dispensador CV1T. Fuente: vinoteca.es

Tipos de gases para la industria enológica.

Este proyecto pretende hacer uso de determinados gases para inyectar en el vino por lo que he realizado una pequeña búsqueda en Internet de posibles suministradores de los gases de uso alimentario. Como es lógico, es importantísimo que los gases que vayamos a utilizar sean de calidad alimentaria y de una pureza determinada.

Las primeras búsquedas dan como resultado dos de los mayores distribuidores de gases a nivel global y que trataremos a continuación:

- Soluciones Freashline® para el sector Enológico

La multinacional “[Air Products](#)¹¹ cuyo distribuidor en el estado es “[Carburos Metálicos](#)¹² nos proporcionan una surtida gama de gases de calidad alimenticia y en concreto tienen una gama para la industria enológica.

No voy a entrar en detalles de cómo se aplican y como afectan determinados gases al sabor y aroma del vino porque queda fuera del ámbito del máster pero sí que voy a recomendar la lectura de catálogo de gases para usos enológicos que podemos encontrar en este [link](#)¹³ para quien esté interesado en profundizar en este tema.

Si que me parece interesante echar un vistazo a los equipos de inyección de gases en la industria vinícola que nos ofrece esta multinacional. Hay que tener en cuenta que este proyecto no es más que uno de estos inyectores industriales llevado al ámbito doméstico, más pequeño y nada peligroso.

- Tenemos la instalación fija de inertización en continuo.

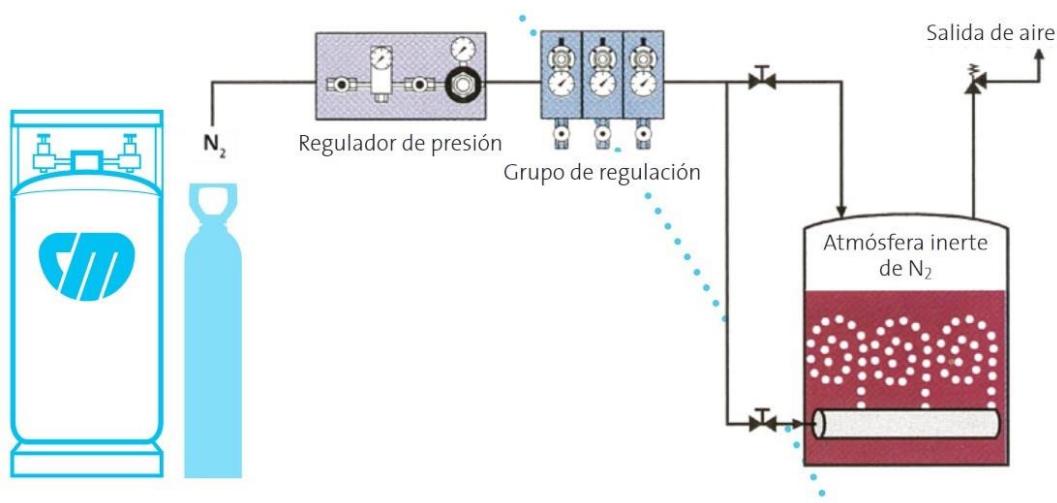


Figura 2.3.2. Instalación de inertización fija en continuo. Fuente (Metálicos, 2019).

¹¹ Dirección url: <http://www.airproducts.com/Products/Gases.aspx>

¹² Dirección url: <http://www.carburos.com/microsite/es/enologia/>

¹³ Alternativamente, también se puede consultar el catálogo en el repositorio del proyecto:
https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/blob/dev/M40001_vimo_sales/marketing/market_study/docs/

Esto no es más que la versión industrial de los dispositivos de conservación de vino que hemos visto en apartados anteriores.

Durante todo el proceso productivo del vino es normal trabajar en tanques presurizados con una atmósfera inerte para proteger el vino durante todo el proceso. En este caso el equipo propuesto por Carburos Metálicos inyecta nitrógeno.

El nombre comercial del sistema es iyecvin, para más información sobre este tema se puede acudir a la página del distribuidor (Metálicos, 2019).

- Tenemos también la instalación fija de gasificación en continuo.

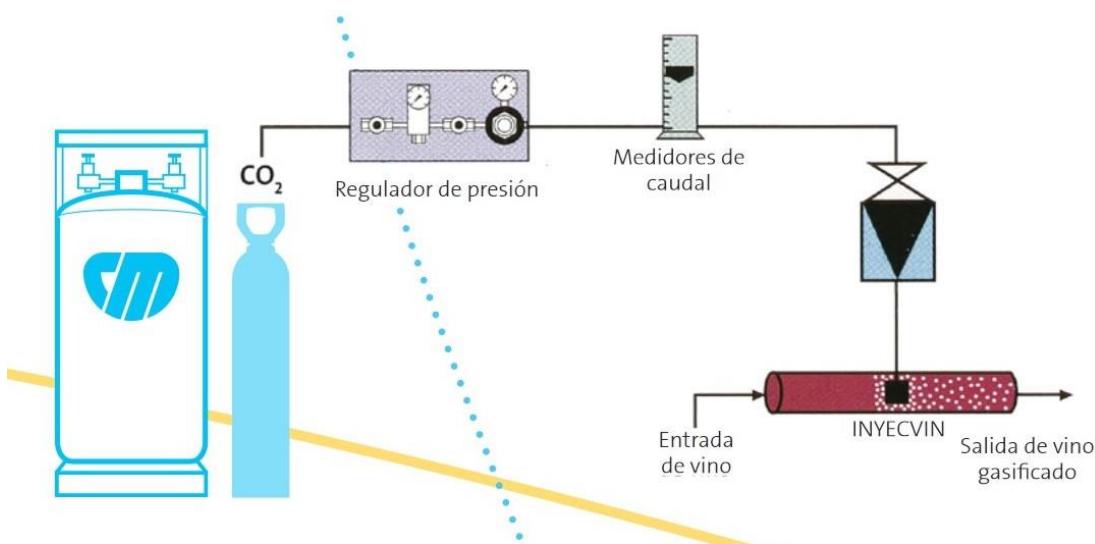


Figura 2.3.3. Instalación de gasificación fija en continuo. Fuente (Metálicos, 2019).

Que no es ni más ni menos que un reactor bifásico de columna de burbujeo muy parecido al que pretendemos diseñar en este proyecto. Si nos fijamos en la columna de burbujeo, vemos que este equipo industrial trabaja en régimen continuo (el vino es continuamente alimentado por la entrada) mientras que en nuestro equipo el régimen del flujo del vino va a ser discontinuo. Ver el tipo de reactor elegido en el punto 2.2 más atrás.

- Gases con calidad alimentaria de “[Abelló Linde](#)”¹⁴

Otra de las grandes empresas de fabricación y distribución de gases a nivel nacional, es la empresa catalana Abelló Linde. En su gama de productos con calidad alimentaria podemos encontrar un surtido número de gases con sus detalladas fichas de datos y hojas técnicas de producto. Ver referencia (Linde, 2019).

¹⁴ Dirección url: <http://www.abellolinde.es>

2.4. Posibles Soluciones

Hemos dado un repaso a los fundamentos teóricos (ver punto 2.1 y el modelo teórico adoptado) y constructivos (ver punto 2.2) sobre los que se basa nuestro dispositivo. También hemos visto hasta donde se ha llegado en el mercado actual en lo referente al ámbito de acción de este proyecto (ver punto 2.3). Hemos fijado el cliente final y la clase del producto a diseñar (ver los Objetivos en el punto 1 y Alcance del Proyecto en el apartado 1.3).

Sabemos que vamos a diseñar un Reactor Químico Bifásico de Columna de Burbujeo y que vamos a necesitar:

- ✓ Un tanque de reacción. En nuestro caso es la columna de burbujeo que va a ser la propia botella de vino Bordelesa donde viene el vino. Asumiremos que siempre vamos a utilizar vinos embotellados en este tipo de botella. Ver simplificaciones y suposiciones hechas sobre el modelo teórico adoptado (punto 2.1).
- ✓ Una bombona con la fase gaseosa comprimida.

Según la Tabla 2.1.4, donde establecemos los parámetros que vamos a controlar en nuestro reactor, vamos a necesitar:

- ✓ Un contactor microperforado. Nuestro contactor va a ser un difusor microperforado por donde va a salir el gas desde el fondo de la botella.
- ✓ Velocidad de flujo del gas en la salida del difusor. Para controlar el flujo del gas vamos a necesitar idealmente dos válvulas. Una de regulación de presión para estabilizar la presión proveniente de la bombona de gas y otra válvula de control de flujo (válvula de aguja) que nos va a proporcionar una regulación precisa en el rango de flujos en los que va a operar nuestro reactor. Adicionalmente, se va a añadir una válvula de pérdida de carga por estrangulación a la salida de la bombona de gas para acoplar la presión a la entrada de la electroválvula de vías que pone en marcha el reactor.

Para cada una de las piezas que se ha comentado anteriormente, se ha hecho una búsqueda intensiva en Internet para dar con la solución correcta. El directorio del repositorio del proyecto que recoge este trabajo es “*raw_parts*”¹⁵.

La pieza seleccionada para nuestro reactor se detalla durante el desarrollo del proyecto en el punto 3.

Teniendo en cuenta las piezas que vamos a necesitar y los conocimientos adquiridos propongo las siguientes soluciones, cada una con sus pros y contras.

¹⁵ Directorio del repositorio que recoge la búsqueda de materia prima:
https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts

2.4.1. Actuador electromecánico o meramente mecánico

Existen dos opciones atendiendo al sistema de funcionamiento del actuador. El actuador es el elemento que pone en marcha el reactor químico.

La opción más sencilla sería utilizar un actuador meramente mecánico utilizando una válvula de vías de tipo gatillo o de tipo botón que permitiera el paso todo o nada del flujo.

Lo otra opción es una electroválvula de vías eléctricamente controlada por un temporizador electrónico.

	Actuador Electromecánico	Actuador Mecánico
Pros	Control de tiempo preciso. Existen micro válvulas muy pequeñas.	Mas baratas. Menor volumen.
Contras	Mas caro. Mayor volumen para igual presión. Requiere electrónica, alimentación.	No tiene o es muy difícil temporizar, requiere control humano. No existen o no he encontrado micro válvulas mecánicas.

Tabla 2.4.1. Tabla de comparativa. Tipo de actuador.

Todas las opciones barajadas se encuentran en el repositorio del proyecto:

- ✓ Para las “micro válvulas”¹⁶. Electroválvulas y mecánicas.
- ✓ Para los “componentes electrónicos”¹⁷. Batería, micro, pulsador, conectores, etc.

Una vez elegido el tipo de sistema actuador tendremos que decidir entre si vamos a utilizar piezas de catálogo, piezas hechas a medida (diseñadas por nosotros o no) o la opción salomónica de utilizar de hacer un híbrido utilizando unas piezas de catálogo y otras piezas hechas a medida. Los siguientes puntos recogen estas opciones.

2.4.2. Fabricación con Piezas de Catálogo

La explicación está clara, esta opción contempla la realización del reactor utilizando sólo piezas de catálogo en el mercado, esto significa que compraríamos y elegiríamos las piezas en función de nuestras necesidades y las uniríamos entre sí para dar forma al reactor como si de un “mecano” se tratase.

Esta opción resulta muy interesante desde el punto de vista economizador (tanto en tiempo como en dinero) pero puede ser nefasta, casi con total seguridad, a nivel estético y dimensional.

La siguiente tabla recoge los pros y contras de esta opción:

¹⁶ Directorio del repositorio de micro válvulas:

github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/micro_valvulas

¹⁷ Directorio del repositorio de componentes electrónicos:

github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/bateria

github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/modulo_ble

github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/pulsador

Fabricación con Piezas de Catálogo	
Pros	Rápida fabricación. Barato. Fiabilidad (calidad según fabricante).
Contras	Mala estética y diseño. Grandes dimensiones.

Tabla 2.4.2. Características de una fabricación con piezas de catálogo.

Las principales piezas de catálogo en mercado barajadas para el diseño del reactor están en:

- ✓ Para la “Mini botella de gas”¹⁸.
- ✓ Para las “distintas válvulas”¹⁶. Válvula de vías para el actuador, Válvula de estrangulación para el acoplamiento al actuador. Válvula de regulación de presión. Válvula de regulación de flujo. Canalización (“tubing”) y Conectorización (“racoring”).
- ✓ Para los “tubos de acero”¹⁹. Para el agitador.

2.4.3. Fabricación A Medida

La fabricación a medida consiste en realizar el reactor con piezas diseñadas *ex profeso* para nuestro dispositivo. Es decir, nada de piezas de catálogo salvo las estrictamente necesarias.

La siguiente tabla resume las características de este tipo de fabricación.

Fabricación con Piezas A Medida	
Pros	Estética y diseño cuidados. Dimensiones minimizadas.
Contras	Fabricación lenta. Muy caro. Baja fiabilidad (piezas prototipo).

Tabla 2.4.3. Características de una fabricación con piezas A Medida.

Diretorio del repositorio de componentes de catálogo:

https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/

¹⁸ Para la mini botella de gas: ./botella_gas

¹⁹ Para los tubos de acero: ./tubo_acero

Las únicas piezas de catálogo que se utilizarían en este caso serían:

- ✓ Para las “juntas tóricas y planas”²⁰. Para acoplamientos varios.
- ✓ Para las “bolas de acero”²¹. Para el diseño a medida de válvulas.
- ✓ Para los “muelles”²². Para el diseño a medida de válvulas
- ✓ Para los “tornillos”²³. Para fijación y sujeción de las distintas piezas.

2.4.4. Fabricación Híbrida

La fabricación híbrida sería la resolución salomónica en la que unas piezas se cogerían de catálogo y otras las fabricaríamos a medida.

Como es lógico las características de este tipo de fabricación se encontrarían entre las dos anteriores:

Fabricación con Híbrida	
Pros	Tiempo de fabricación razonable. Precio razonable. Fiabilidad Buena.
Contras	Estética y diseño reguleros. Dimensiones medias.

Tabla 2.4.4. Características de una fabricación Híbrida.

Una buena estrategia sería comprar de catálogo las piezas más importantes a fabricantes con buena reputación para asegurarnos un buen funcionamiento. Estas piezas podrían ser las válvulas, por ejemplo.

Podríamos diseñar y fabricar las piezas de canalización, por ejemplo, un “main flow” o distribuidor de flujo principal entre las válvulas. Estas piezas son más sencillas, requieren menor precisión, y por lo tanto hay menos posibilidades de errar en el diseño.

Lo malo de esta técnica de fabricación es que no siempre es posible una transición directa que en el conjunto sea estéticamente bonita. Es decir, no siempre la pieza de catálogo (por ejemplo, una válvula) nos permite unirla a nuestra pieza diseñada (por ejemplo, un distribuidor de flujo) sin tener que hacer una modificación o adaptación sobre la pieza de catálogo.

Pese a que la estética mejora no es ni mucho menos tan compacta como lo puede ser en un diseño a medida.

²⁰ Para las juntas: ./juntas
²¹ Para las bolas de acero: ./bolas_acero
²² Para los muelles: ./muelles
²³ Para la tornillería: ./tornillos

2.5. Solución Adoptada

En la siguiente tabla recopilo los tres tipos de soluciones comentados anteriormente y comparo algunos de los aspectos más importantes:

Tipo de Actuador y Fuente de las Piezas		Estética y Diseño	Tamaño	Tiempo	Fiabilidad	Precio
Eléctrico	Catálogo	Mala	Muy Grande	Poco	Alta	Barato
	A Medida	Buena	Compacto	Muchísimo	Baja	Muy Caro
	Híbrida	Mala	Medio	Medio	Alta	Medio
Mecánico	Catálogo	Mala	Grande	Poco	Muy Alta	Mas Barato
	A Medida	Muy Buena	Mínimo	Mucho	Poca	Caro
	Híbrida	Mala	Medio	Medio	Alta	Medio

Tabla 2.5.1. Tabla resumen de las posibles soluciones.

En la siguiente tabla recojo las principales características de cada una de las posibles soluciones con una valoración objetiva de las mismas.

Tras valorar las posibles soluciones y poniéndolas en el contexto en que se van a tratar (un proyecto fin de master donde lo que prima no es tanto la fabricación, eficiencia y fiabilidad del dispositivo, sino el aprendizaje y desempeño de las materias que se han tratado a lo largo de los estudios), he decidido aplicar la solución de diseño completamente a medida con actuador electromecánico, resaltado en la tabla anterior.

En otro contexto, por ejemplo, en un ámbito profesional, donde el principal objetivo sería (casi sin duda) la fabricación del inyector, no elegiríamos nunca la fabricación a medida desde un principio, sino que realizaríamos primeramente un prototipo funcional de validación del concepto (o de pruebas) con piezas de catálogo de forma rápida y barata.

Tanto la fabricación con piezas de catálogo como la fabricación híbrida quedan fuera del contexto de este proyecto y por eso se han descartado. A mi entender, el único tipo de fabricación que tiene sentido en este trabajo es una fabricación a medida.

Esta decisión anula inmediatamente el objetivo general número 4 indicado en la página 11 (punto 1, Objeto y Objetivos) que pretendía la fabricación de un prototipo. La fabricación resultaría carísima debido al gran número de piezas a fabricar. La fiabilidad del equipo sería muy baja debido a que estaríamos trabajando en la primera iteración de piezas de prototipo.

El tipo de actuador, se ha elegido de forma ideal en función del Alcance del Proyecto indicado en el apartado 1.3 de la página 12, donde establecemos que la interface con el usuario debe ser lo más sencilla posible, (en este caso solo hay que pulsar un botón). También atiende a los requisitos de precisión y repetibilidad del inyector, con una electroválvula podemos controlar de forma muy precisa el tiempo de reacción mientras que mecánicamente no o el control es mucho más complejo.

3. Desarrollo

Comenzamos con una presentación general del aspecto final de nuestro reactor. A lo largo del desarrollo veremos en detalle sus piezas. Este es el aspecto final:

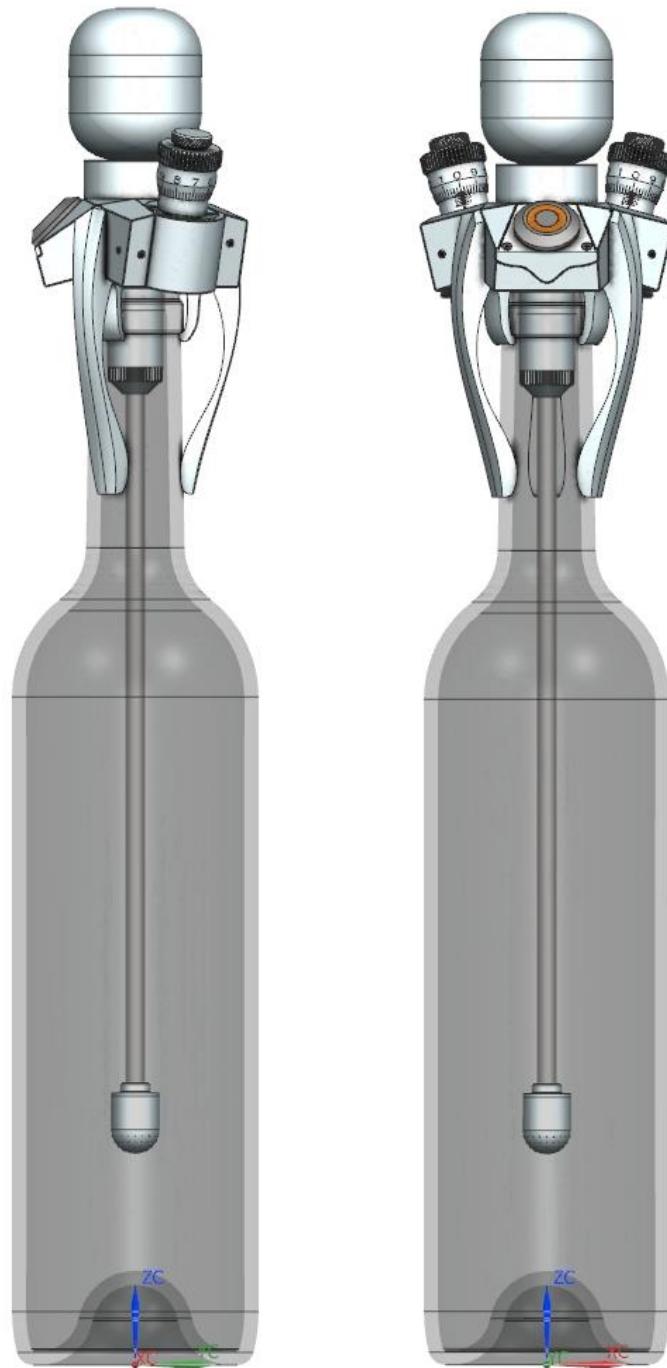


Figura 3.1.1. Reactor bifásico. Vista general del dispositivo montado.

Se aprecia claramente la columna de burbujeo que es la propia botella de vino a la que se le ha acoplado en su cuello nuestro dispositivo inyector. Se aprecian las dos válvulas de

regulación y la bombona con el gas. También podemos ver la varilla del agitador por burbujeo con el difusor en el fondo de la botella.

Cómo usar el equipo

En las siguientes imágenes podemos ver cómo sería una secuencia típica de funcionamiento del dispositivo.

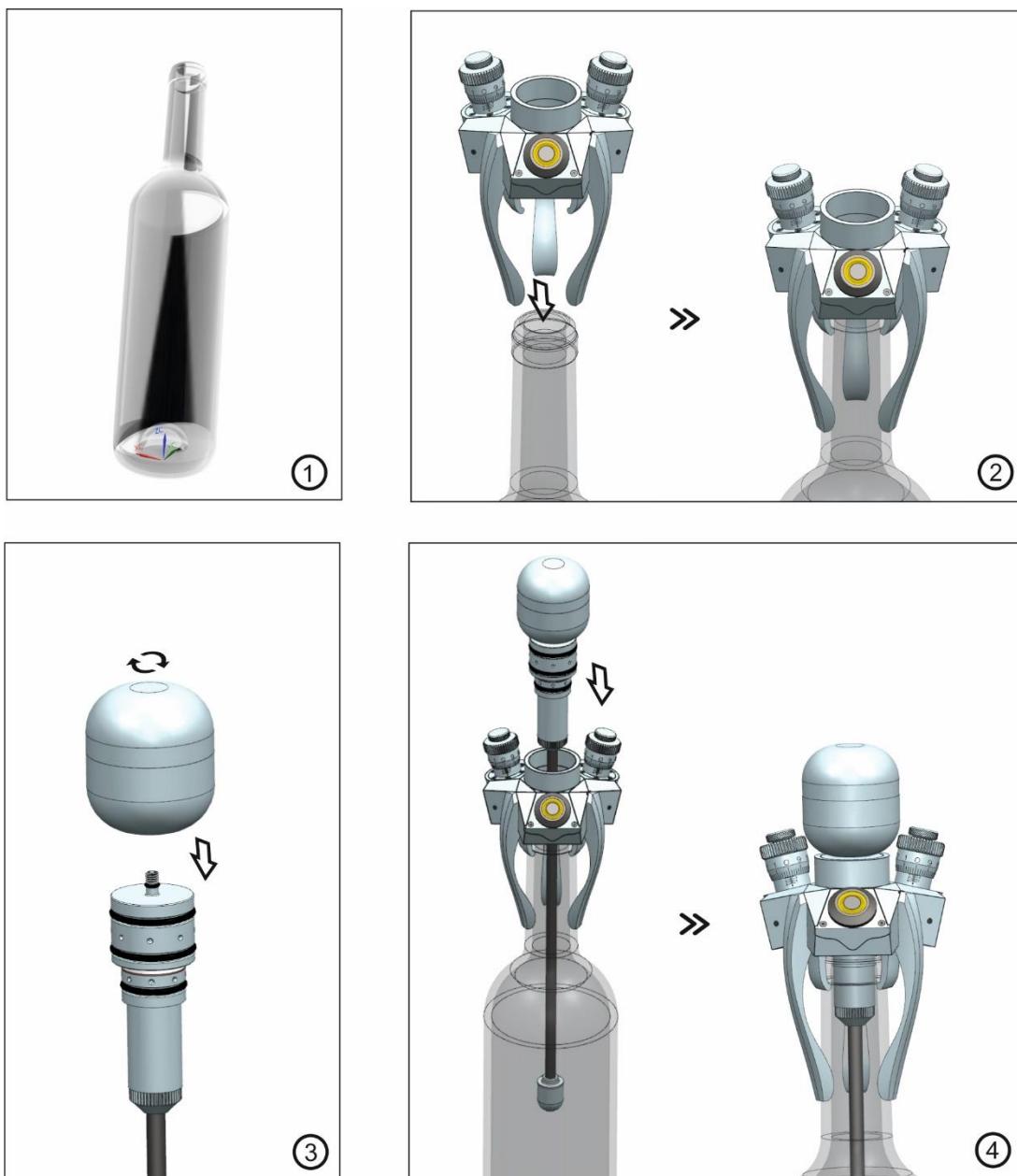


Figura 3.1.2. Cómo se utiliza el reactor bifásico. Montaje.

En primer lugar (paso 1), hay que descorchar la botella vino.

Con la botella abierta, fijamos la base del inyector en la boca de la botella presionándola ligeramente (paso 2), se ha diseñado una cánula de centrado que se apoya en propio cuello de la botella.

El siguiente paso es roscar la botella con el gas a inyectar en el vino como se muestra en el paso 3 y seguidamente se introduce el agitador en la base, paso 4. Cuando el inyector está completamente y correctamente montado, el led del botón de activación lucirá en color verde.

Con el agitador montado y listo, solo tenemos que ajustarlo y pulsar el botón:

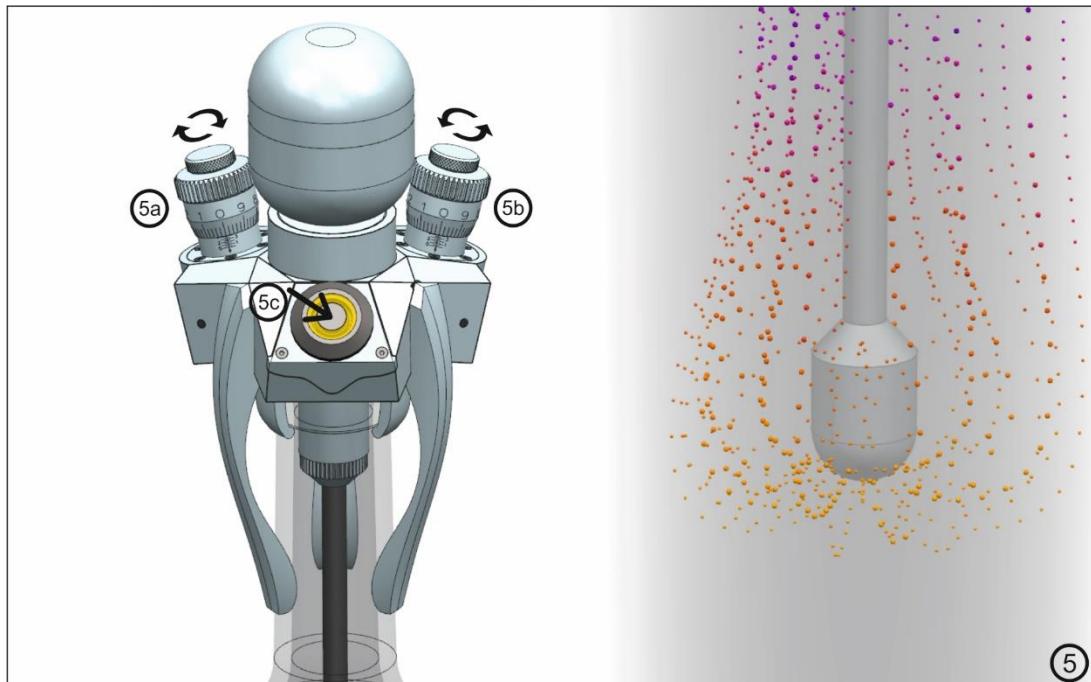


Figura 3.1.3. Cómo se utiliza el reactor bifásico. Ajuste y activación.

Ajustamos la válvula de regulación de presión (paso 5a) y la válvula de regulación de caudal (paso 5b) según la mezcla que queramos obtener en el vino y a continuación presionamos el botón de inicio para activar el reactor químico (paso 5c).

Durante el tiempo programado el gas saldrá por el difusor y podremos ver como ascienden las burbujas. El led del botón parpadeará en color amarillo.

El inyector termina cuando el led vuelve a color verde fijo y no salen más burbujas por el difusor. Ya podemos, desmontar el dispositivo y servir el vino con la cantidad y el tipo de gas deseado en la mezcla.

Se puede apreciar que el inyector se ha dividido en dos piezas principales (la base y el agitador). La razón principal, es simplificar y facilitar el manejo del dispositivo aumentando la seguridad al realizar el proceso de inyección.

- ✓ Al poner primero la base, bajamos el centro de gravedad del conjunto botella-base a la vez que lo hacemos más estable.
- ✓ Al insertar la base dejamos centrada la guía para la inserción del agitador. Por lo que resultará más fácil posicionar el agitador en su sitio.

3.2. Esquema general

Como hemos comentado en el párrafo anterior, el dispositivo inyector está físicamente dividido en dos partes principales:

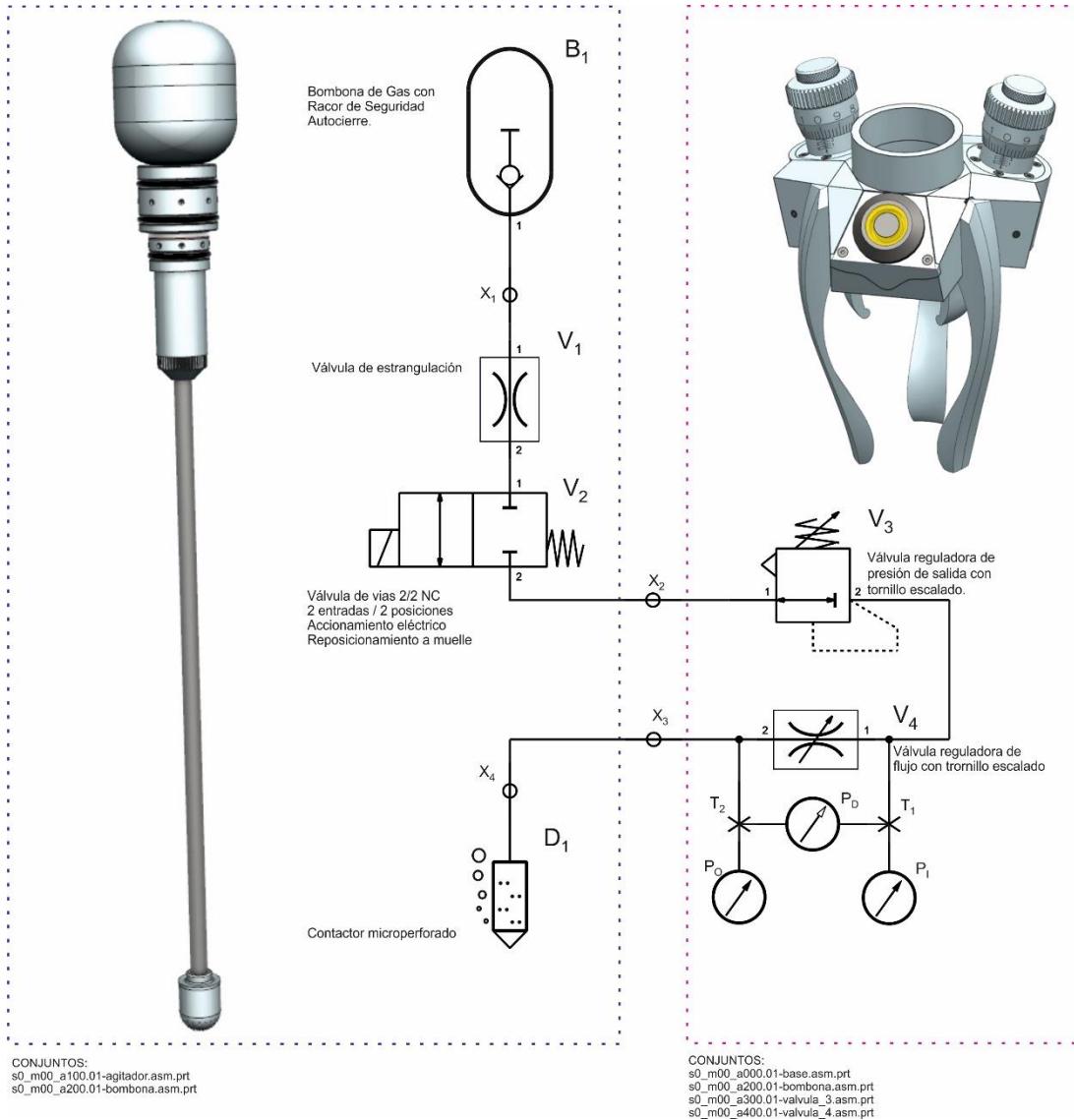


Figura 3.2.1. Reactor bifásico, esquema neumático general.

- El agitador. Lo podemos ver a la izquierda en la Figura 3.2.1. Formado por la bombona con el gas a inyectar (B_1), la válvula de estrangulación (V_1) que acopla la presión de la bombona a la entrada de la válvula de vías, la propia válvula de vías (V_2) de dos contactos y dos posiciones con activación eléctrica y reposicionamiento a muelle y la varilla de acero con el difusor microporoso en su extremo (D_1) por donde sale el gas en forma de burbujas.
- La base. Que podemos ver a la derecha en la Figura 3.2.1. Está formada por la base en sí misma dentro de la cual se encuentran las tuberías que unen el agitador con las válvulas y estas entre sí, la válvula de regulación de caudal de salida (V_3) y la válvula de regulación

de flujo (V_4) con las que fijamos mezcla de gas que deseamos en el vino. La base, también sirve de estructura para la electrónica de control y su botón y la cánula de centrado y fijación al cuello de la botella.

En el siguiente punto explicaremos con un poco más de detalle el funcionamiento de nuestro inyector.

3.2.2. Funcionamiento

Tenemos una bombona de con el gas a presión B_1 , que se enrosca de forma segura al cuerpo del agitador a través del punto de conexión X_1 . Ver explicación detallada en el punto 3.3.2. Nótese que en el interior de la bombona hay una válvula de seguridad con auto cierre que permite quitar la bombona sin que haya venteo a presión de su contenido. Esta es una medida de seguridad aplicada teniendo en cuenta las consideraciones de diseño indicadas en el apartado 1.3 más atrás.

La presión en la bombona B_1 , es muy alta (entre 55 y 60 atm) por lo que debemos reducirla para que la válvula de activación V_2 , pueda funcionar. Según las características de la electroválvula, debemos reducir esta presión hasta las 20 atm para que el muelle sea capaz de cerrar la válvula en ausencia de excitación de la bobina de activación. Ver punto 3.3.1 donde se explica el diseño de la electroválvula.

La manera de reducir esta presión es por medio de una válvula de pérdida de carga por estrangulación V_1 , que consiste en hacer pasar el flujo por un pequeño orificio. Se puede decir que la válvula V_1 acopla la presión en la bombona a la entrada de la electroválvula. Ver punto 3.3.3.

Con la presión por debajo de las 20 atm llegamos a la válvula de regulación de presión de salida V_3 , pasando el flujo del agitador a la base por el sistema de canalización diseñado para el inyector, puntos de conexión X_2 y X_3 . Ver puntos los 3.4.2 y 3.4.2 donde se explica el diseño de la válvula y del Mainflow respectivamente.

La válvula V_3 , es sin duda, el elemento más complejo del inyector ya que tiene una gran cantidad de piezas que explicaremos en detalle en el punto 3.4.2 más adelante. A grandes rasgos, esta válvula mantiene constante la presión a la salida independientemente de las variaciones en presión de entrada debidas principalmente a la descompresión del gas en la bombona B_1 . Para que esta regulación sea efectiva, la presión a la entrada deberá ser ligeramente superior a la de salida. Podemos controlar la presión de salida de forma precisa gracias a un tornillo escalado que modifica la consigna. Para presiones de entrada inferiores a la requerida, la válvula permanece cerrada.

Con la presión estabilizada a la salida de la válvula V_3 podemos controlar de forma muy precisa el flujo en la siguiente etapa por medio de la válvula de regulación de caudal V_4 . Se trata de una válvula de aguja especialmente diseñada para flujos o caudales bajos, entre 0,1 y 0,5 litros por minuto, que es el rango en el que nos vamos a mover en nuestro inyector. En el punto 3.4.5 explicamos en detalle el diseño de esta válvula. El mecanismo de regulación de la consigna mediante tornillo escalado, es el mismo que el diseñado para la válvula V_3 y permite un control muy preciso del caudal.

Podemos acceder exteriormente a los puntos de test T_1 y T_2 para realizar medidas de presiones de entrada (P_i) salida (P_o) o diferenciales (P_d) como se muestra en la Figura 3.2.1.

El flujo a la salida de la válvula de regulación de caudal V₄, es reinyectado al agitador a través de X₃ para salir de nuevo a través de X₄ hacia el contactor. El punto de conexión X₄, es un sistema in inserción rápido que permite intercambiar el tipo de contactor de forma rápida si fuera necesario. Ver detalles del diseño en el punto 3.3.2.

El contactor está formado por un tubo de acero inoxidable de 6 mm de diámetro y 250 mm de longitud en cuyo extremo se rosca el difusor microperforado D₁ que inyecta el gas en forma de burbujas con el caudal requerido en el fondo de la botella.

3.3. Diseño del Agitador

En la siguiente ilustración, podemos ver las piezas que componen el agitador:

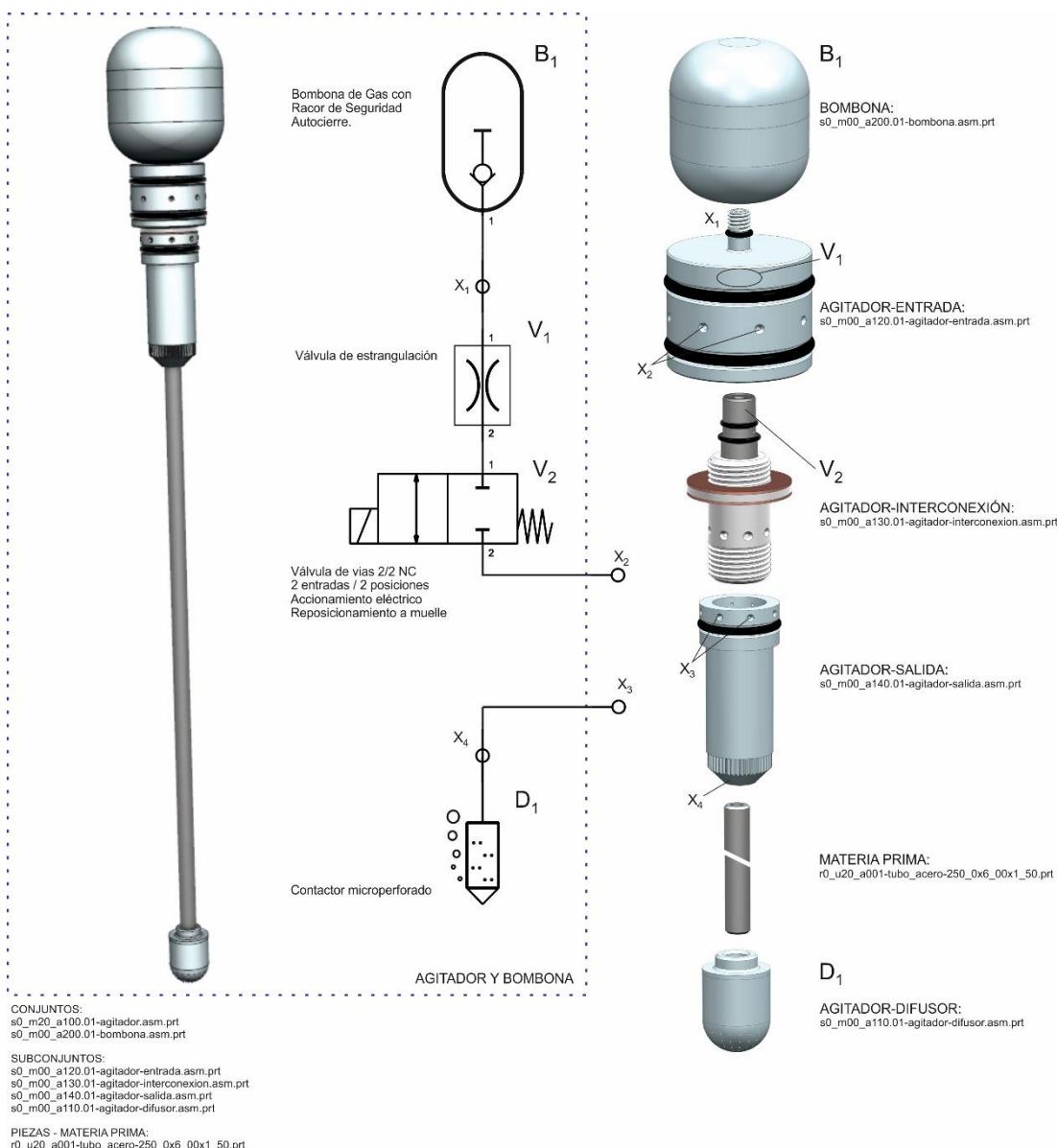


Figura 3.3.1. Agitador, vista de conjunto.

Debido a la gran cantidad de piezas del inyector, he realizado un diseño fuertemente estructurado en conjuntos, subconjuntos, piezas y materia prima. Todos los archivos CAD del proyecto se encuentran en el repositorio del proyecto²⁴ que por claridad está estructurado en directorios.

En el anexo A-1 “Codificación del proyecto”, muestro en detalle el formato ideado para la codificación de los archivos explicando los campos que componen la referencia.

Como podemos observar en la Figura 3.3.1, el agitador está compuesto por dos conjuntos principales:

- ✓ El conjunto bombona con el gas
- ✓ El conjunto agitador

A su vez, estos conjuntos están divididos en subconjuntos y alguna materia prima que se relacionan de manera jerárquica como podemos ver en detalle en el navegador de ensamblaje del agitador:

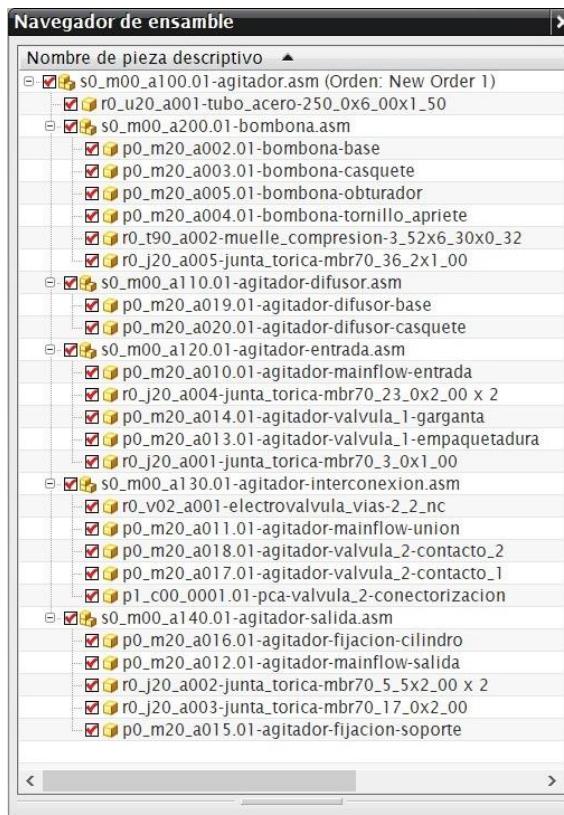


Figura 3.3.2. Agitador, piezas del ensamblaje.

Por claridad, he eliminado del navegador las restricciones y las secciones. Pero téngase en cuenta que todas y cada una de las piezas y sus bocetos están totalmente restringidos y posicionados.

En los siguientes puntos estudiaremos los distintos subconjuntos del agitador.

²⁴ Ficheros CAD: github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_cad/3d_device

3.3.2. Bombona

Existen gran cantidad de botellas de pequeñas dimensiones en el mercado. En el directorio de documentación de materia prima en el repositorio del proyecto¹⁸, se pueden encontrar una gran cantidad de referencias a botellas comerciales que he ido recogiendo.

Calidades a parte (acero inoxidable en la fabricación), a grandes rasgos hay dos tipos de botellas:

- Bombonas no recargables. Este tipo de botellas son las más económicas y permiten un alto grado de customización. Este tipo de botellas tienen un diafragma metálico que es perforado en el momento de la inserción. Por lo que una vez insertadas no se pueden quitar sin que su contenido se pierda. Tratar de quitar una botella de este tipo con presión puede resultar peligroso. Una vez gastadas, no se pueden llenar.



Figura 3.3.3. Bombona no recargable. Cortesía de SEFIC.

- Bombonas recargables. Este tipo de botellas son más caras, pero permiten limpieza y recarga. Suelen disponer de válvula de seguridad que permite la desconexión con presión en la botella.



Figura 3.3.4. Bombona recargable. Cortesía de SEFIC.

Respecto a los tamaños, existe una gran cantidad estando las capacidades estandarizadas. Hay que tener en cuenta que este tipo de botellas son muy utilizadas en multitud de aplicaciones. Algunas de aplicaciones en las que he visto que utilizan este tipo de bombonas son: chalecos salvavidas, infladores de neumáticos, pistolas de perdigones, paintball, insufladores para asmáticos, cilindros de toma de pruebas de gases, etc.

En la siguiente imagen podemos ver la gran cantidad de tamaños existentes:



Type (filling weight)	Water Capacity Minimum	Outside Diameter Nominal	Height [mm.]	Weight [Kg.]	Inside pressure	Bursting Pressure	Thread
8g	11cc	18.5mm	65mm	35g	5.5mpa	54-56MPA	Unthreaded and (1/2 3/8 5/8 thread) According to the client request
12g	17cc	18.5mm	83mm	42g	5.5mpa	54-56MPA	
16g	21cc	21.8mm	88.6mm	56g	5.5mpa	54-56MPA	
17g	29cc	25.6mm	98mm	87g	5.5mpa	54-56MPA	
18g	29cc	25.6mm	98mm	88g	5.5mpa	54-56MPA	
22g	29cc	25.6mm	98mm	88g	5.5mpa	54-56MPA	
24g	34cc+	25.6mm	108mm	97g	5.5mpa	54-56MPA	
25g	34cc	25.6mm	108mm	102g	5.5mpa	54-56MPA	
28g	45cc	25.6mm	138.5mm	135g	5.5mpa	54-56MPA	
33g	45cc	25.6mm	138.5mm	145g	5.5mpa	54-56MPA	

Figura 3.3.5. Bombona, tamaños. Cortesía de SEFIC.

Elección de la bombona de referencia

Como en muchas otras piezas de este proyecto, mi referencia de diseño va a ser la prestigiosa empresa Swagelok cuyos productos y catálogos han sido de gran utilidad. La calidad de sus productos no es cuestionable, siendo referente a nivel mundial.

En concreto me he basado en los cilindros de toma de muestras en miniatura que podemos consultar en (Swagelok, 2019) o alternativamente en el repositorio²⁵.

²⁵ Cilindros para toma de muestras de Swagelok:

https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/botella_gas/swagelok.com

En la siguiente figura podemos ver una imagen de los cilindros de toma de muestras de Swagelok:



Figura 3.3.6. Cilindros de toma de muestras. Fuente Swagelok.

Nuestra bombona va a ser recargable y con válvula de seguridad para evitar cualquier tipo de incidente en su manipulación por lo que tendremos dos piezas con una junta tórica y una válvula antirretorno de seguridad como la que podemos ver en la Figura 3.3.4.

El tamaño elegido es el de 12g con las características de presión y volumen que podemos ver en la Figura 3.3.5.

3.3.2.2. Cálculos

Para una bombona de 12g, la presión interna es de 5,5 MPa (ver Figura 3.3.5.) esta presión equivale a:

Presión interna
5,5 MPa = 55 bar = 56 at ²⁶ = 797 psi ²⁷

Tabla 3.3.1. Equivalencia de presiones en la bombona.

Calculamos el peso molecular del dióxido de carbono como suma de los pesos moleculares de los átomos que lo componen utilizando la tabla periódica del apéndice A-2.6.

$$Masa_Molar = \sum q \cdot P \quad (3.3.1)$$

donde:

q: numero de átomos del componente.

P: masa molecular del componente.

²⁶ Una atmósfera es igual a un kilogramo de fuerza por centímetro cuadrado: at = kg / cm²

²⁷ Un psi (pound square inch) es una libra por pulgada cuadrada: psi = p / in²

Para el caso del dióxido de carbono, aplicando la ecuación (3.3.1):

$$CO_2 = 12 \text{ g/mol} + 2 \cdot 16 \text{ g/mol} = 44 \text{ g/mol} \quad (3.3.2)$$

Para el caso del oxígeno:

$$O_2 = 2 \cdot 16 \text{ g/mol} = 32 \text{ g/mol} \quad (3.3.3)$$

La Tabla 2.1.2 en la página 22 recoge distintas densidades y masas molares de los gases que podríamos utilizar para inyectar en el vino.

Según el Principio de Avogadro, ecuación (2.1.5) más atrás, un mol de cualquier gas tiene el mismo volumen bajo las mismas condiciones. El número de partículas que contiene un mol se denomina Número de Avogadro (N_A) y equivale a:

$$1 \text{ mol} = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ partículas} = N_A \quad (3.3.4)$$

El volumen de un gas ideal que contiene 1 mol de partículas se llama volumen molar y en condiciones normales equivale a:

$$\text{Volumen Molar [gas ideal]} = 22,4136 \text{ l/mol a } 0^\circ\text{C y 1 atm} \quad (3.3.5)$$

$$\text{Volumen Molar [real] del } CO_2 = 22,3 \text{ l/mol a } 0^\circ\text{C y 1 atm}$$

Por lo tanto (aplicando la ley de los gases ideales, ecuación (2.1.6) más atrás), una botella de 12 g de CO_2 tiene un volumen a presión y temperatura normales de:

$$\text{Volumen [12 g de } CO_2] = \frac{12}{44} \text{ mol} \cdot 22,3 \text{ l/mol} = 6,082 \text{ l a } 0^\circ\text{C y 1 atm} \quad (3.3.6)$$

$$\text{Volumen [12 g de } O_2] = \frac{12}{32} \text{ mol} \cdot 22,4 \text{ l/mol} = 8,400 \text{ l a } 0^\circ\text{C y 1 atm}$$

Por lo que en una botellita de oxígeno 17 cm³ o 17 ml a 55 bar tenemos un volumen de 8,4 litros a presión y temperaturas normales. Este dato es importante para calcular el número de usos que podemos dar de una botella dependiendo del caudal que programemos en nuestro inyector. Lo veremos más adelante.

Ver la Tabla 2.1.2 para calcular los volúmenes de otros gases. Nosotros nos centraremos en el uso de CO_2 u O_2 .

3.3.2.3. Diseño

En la siguiente figura, podemos ver la solución adoptada para el diseño de la bombona:

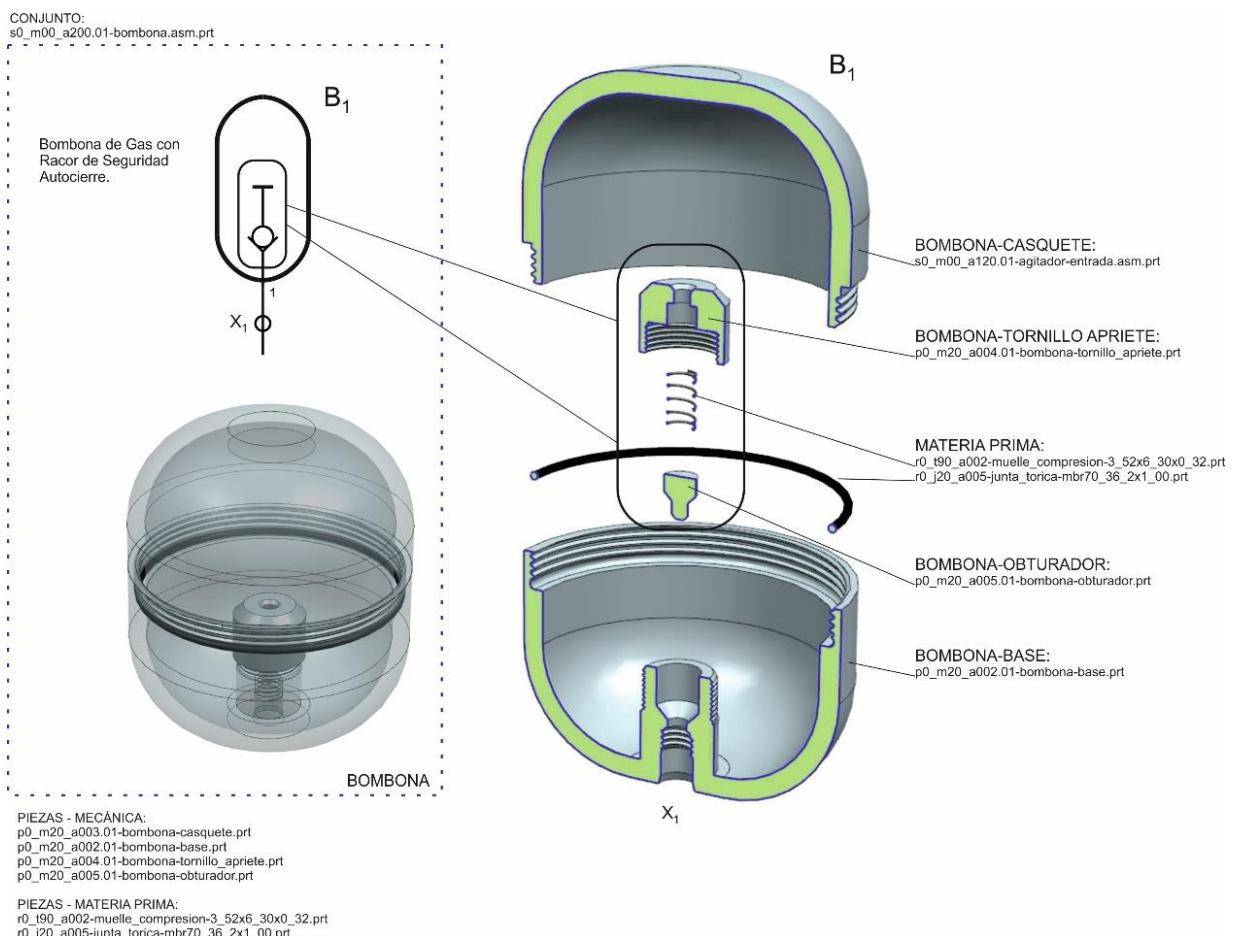


Figura 3.3.7. Conjunto bombona, vista de conjunto.

Se trata de una bombona desmontable en dos piezas principales. La base y el casquete que se unen mediante una rosca. La estanquidad se consigue por medio de una junta tórica de material MBR 70 con un diámetro interno de 36,2mm y un diámetro de hilo de 1mm.

Nuestro diseño, también incorpora una válvula de seguridad con auto cierre que permite el desmontaje de la bombona, aunque no se haya consumido todo el gas de su interior y por lo tanto con presión. Los elementos que forman esta válvula de seguridad son el obturador, el muelle de compresión y la empaquetadura o tornillo de apriete del conjunto. Podemos ver los elementos recuadrados en la figura anterior.

El funcionamiento es sencillo, cuando roscamos la bombona en el cuerpo del agitador, el obturador es desplazado hacia arriba y permite el paso de gas a través del punto de conexión X1. Al desenroscar la bombona, la fuerza impulsora del muelle comprimido y la propia presión dentro de la botella, desplazan el obturador hacia abajo cerrando el paso de gas en el punto X1.

A continuación, podemos ver un detalle de cómo funciona esta válvula:

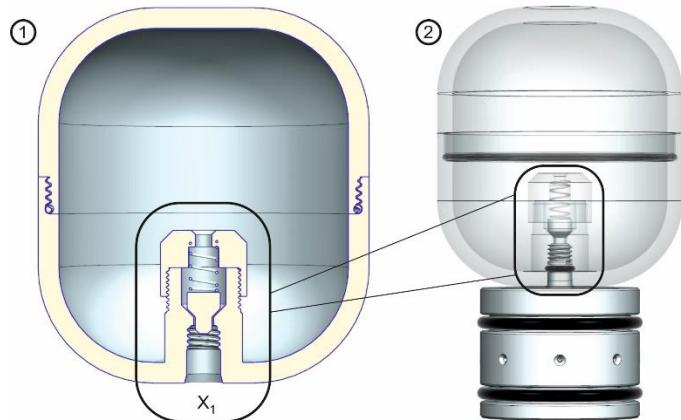


Figura 3.3.8. Bombona, válvula de seguridad. Vista de detalle.

En la imagen 1, la válvula está cerrada impulsada por el resorte de compresión y la propia presión del interior de la bombona de gas.

En la imagen 2, podemos ver la bombona roscada en el cuerpo del agitador y cómo la válvula está abierta permitiendo el paso de gas a través del punto de conexión X₁.

Dimensionado del muelle

En el diseño de la bombona se han utilizado dos componentes que son materia prima o componentes de catálogo, uno de ellos es el resorte de compresión:

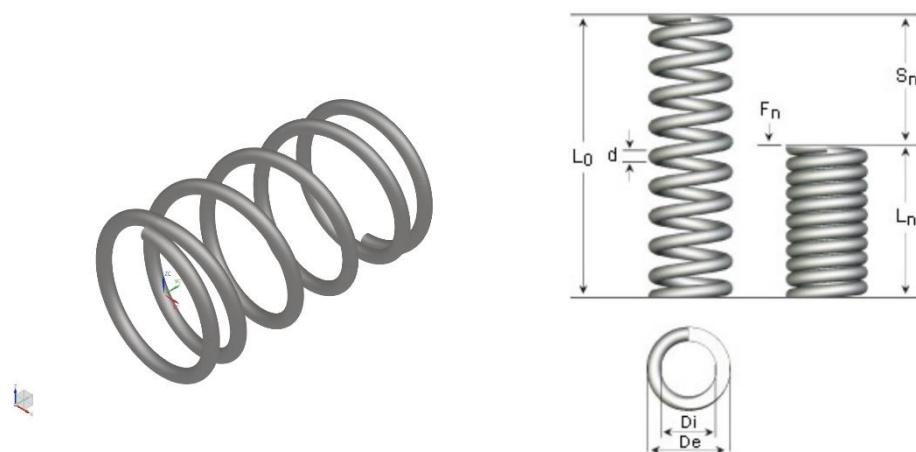


Figura 3.3.9. Muelle de compresión.

Podemos encontrar el estudio hecho sobre fabricantes de resortes en el directorio del proyecto de resortes²². Todos los resortes que he utilizado en este proyecto son comerciales y se pueden comprar a sus respectivos fabricantes. Os remito al anexo donde expongo la lista de

materiales BOP con una hoja de cálculo que resume todas las materias primas utilizadas en el proyecto y que también se puede consultar el repositorio del proyecto²⁸

El muelle cuyo código de proyecto es “r0_t90_a002-muelle_compresion-3_52x6_30x0_32.prt” puede ser comprado a [Sodemann](#) con la referencia A20750²⁹. En la siguiente tabla podemos ver las características de este muelle.

Product Attribute	Value
Material	DIN 17224 AISI 302 W. nr. 1.4310 EN10270-3
d Wire	0.32
De External diameter	3.52
Di Internal diameter	2.88
L0 Free Length	6.30
Ln Max Loaded length	2.50
sn Max Travel	3.80
Dd Max Shaft	2.40
Dh Min Hole	4.00
n Elastic coils	3.50
Fn Max Force	3.16
R Constant N/mm	0.81
Configuration of ends	Closed but unground

Tabla 3.3.2. Muelle de compresión modelo A20750. Tabla de Sodemann.

Con estos datos, podemos modelar las piezas de la válvula y tenemos que asegurarnos que el muelle no se comprima más de S_n mm cuando la bobina está insertada y que en vacío, cuando la bombona está desenroscada, la fuerza que ejerce el muelle sea suficiente para desplazar el obturador.

- ✓ Del diseño vemos que el desplazamiento del obturador cuando la bombona está insertada es de 2 mm < 3,80 mm.

$$d < S_n \rightarrow 2 \text{ mm} < 3,8 \text{ mm} \quad (3.3.7) \text{ OK}$$

donde:

d : *distancia de compresión.*

S_n : *desplazamiento máximo.*

- ✓ Del diseño vemos que cuando la bombona está desenroscada el muelle está comprimido 1,5mm, lo que implica que la fuerza que ejerce el muelle es:

$$F = R \cdot d = 0,81 \text{ N/mm} \cdot 1,5 \text{ mm} = 1,215 \text{ N} \quad (3.3.8) \text{ OK}$$

donde:

d : *distancia de compresión.*

R : *constante de compresión del muelle.*

F *fuerza de compresión ejercida por el muelle*

²⁸ Materia prima utilizada en el proyecto:
https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/blob/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_cad/3d_device/3d_mec_raw/codigos-fabricantes-distribuidores.xlsx

²⁹ Datasheet de un posible fabricante del muelle r0_t90_a002-muelle_compresion-3_52x6_30x0_32.prt:
https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/blob/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/muelles/sodemann.com/20750-sodemann-muelle-3_52x6_30x0_32.pdf

Elección de la junta tórica

Otra materia prima muy utilizada para el diseño de la bombona es la junta tórica que asegura la estanqueidad del conjunto una vez montado. Este tipo de juntas forman parte de muchas otras piezas de este proyecto por lo que su conocimiento y tratamiento es necesario asimilar.

A este respecto podemos encontrar el directorio del repositorio²⁰ y en el anexo 0 toda la información necesaria.

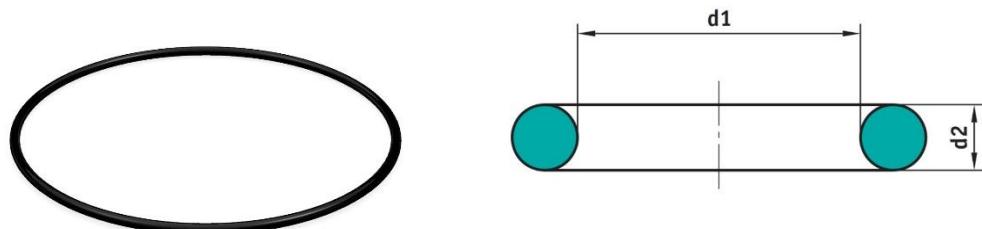


Figura 3.3.10. Junta tórica.

Las juntas tóricas, por normativa se designan por el diámetro interior d_1 y espesor d_2 . En nuestro caso el código interino “r0_j20_a005-junta_torica-mbr70_36_2x1_00.prt”, hace referencia a una materia prima mecánica (r0) de tipo junta tórica (j20), cuyo diámetro interno es de 36,2mm y espesor de 1mm. El material es MBR de dureza 70.

3.3.3. Agitador Entrada - Válvula 1, de estrangulación

Esta es la pieza del agitador a la que roscamos la bombona y que tiene embebida la válvula V₁ de restricción de flujo por estrangulación o pérdida de carga.

Este tipo de válvulas de restricción son ampliamente utilizadas en instalaciones hidráulicas o neumáticas, debido a su simplicidad y bajo precio de fabricación.

Comercialmente existen a la venta en formato miniaturizado en fabricantes como "The Lee Company"³⁰. En concreto, en la serie que me he basado para el diseño de esta válvula es "Lee Jet"³¹

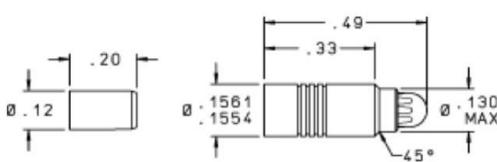
156 Lee Jet

JETA1562130H

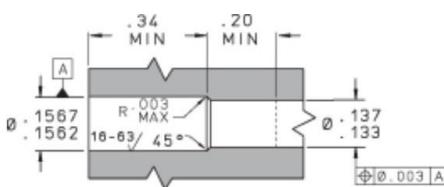
Forward



Insert



Installation



SPECIFICATIONS	
Type	Single Orifice
Lohm Rate	13000
Lohm Rate Tolerance	±2%
Nominal System Pressure (psi)	3000
Nominal Weight (grams)	0.7
Nominal Screen Hole Size (inches)	.004
MATERIALS	
Body Material (Specification)	304 Cres (AMS 5639)
Pin Material (Specification) (Heat Treat)	15-5PH Cres (AMS 5659)
Screens Materials (Specification) (Heat Treat)	304L Cres (ASTM A 666)
Braze Materials (Specification)	(AMS 4774)
Note	Finish: All Cres parts passivated. Pins are prewaxed. Do not degrease. Do not lubricate.
INSTALLATION / EXTRACTION	
Tool Set Part Number	CUTA1560104C
Replacement Pin Part Number	JETA1560003B

Figura 3.3.11. Válvula de restricción "Lee Jet". Fuente "The Lee Co".

La selección de este tipo de válvulas se hace en función de una resistencia equivalente al paso del flujo basada en la ecuación de Bernulli³² y que "The Lee Co" denomina "Lohm". Hay disponible un selector con calculadora³¹, como podemos ver en las siguientes figuras.

Temperatura	Presión
273,15K = 0°C = 32°F	101 325 Pa = 1 atm

Tabla 3.3.3. Condiciones Normalizadas TPN. Fuente Wikipedia³³.

³⁰ Válvulas miniatura de The Lee Company: <https://www.theleeco.com/>

³¹ Válvulas de estrangulación de orificio simple:

<https://www.theleeco.com/products/precision-microhydraulics/restrictors/>

³² Ecuación o principio de Bernoulli: https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli

³³ Condiciones normalizadas:

https://es.wikipedia.org/wiki/Condiciones_normalizadas_de_pres%C3%B3n_y_temperatura

Podemos ver como para unas condiciones iniciales normalizadas (ver tabla anterior), para reducir una presión en la entrada de 55 bares a 20 bares de CO₂ circulando en las peores condiciones de flujo (mínimo flujo 0,1 l/min):

$$\text{Volumen [1 g de } \text{CO}_2] = \frac{1 \text{ g}}{44} \text{ mol} \cdot 22,3 \text{ l/mol} = 0,506 \text{ l/g} \quad (3.3.9)$$

$$\text{Un flujo de } 0,1 \text{ l/min} = \frac{0,1 \text{ l/min}}{0,506 \text{ l/g}} = 0,197 \text{ g/min}$$

Instructions: enter temperature, upstream absolute pressure, downstream absolute pressure, flow rate, and gas (default Air) and click the Calc button. The Lohm rate, Temperature Correction Factor, and Units Constant are calculated.

Restrictors Lohm range: 1000 to 995

Temperature (°F) <input type="text" value="32"/>	<i>Sonic Flow - $P_1/P_2 \geq 1.9$</i> $Lohms = \frac{K f_T P_1}{Q}$ <i>Subsonic Flow - $P_1/P_2 < 1.9$</i> $Lohms = \frac{2 K f_T \sqrt{\Delta P P_2}}{Q}$	Gas <input type="text" value="CO2"/> Flow Rate (Q) <input type="text" value="0.02"/> * <input type="radio"/> SLPM <input type="radio"/> PPH <input type="radio"/> SCFM <input type="radio"/> lb _m /s <input type="radio"/> in ³ /min <input checked="" type="radio"/> kg/min <input type="radio"/> mL/min <input type="radio"/> gm/min
Upstream Abs. Pressure(P ₁) <input type="text" value="55"/>	Calc	Constant (K) <input type="text" value="5.74"/>
Downstream Abs. Pressure(P ₂) <input type="text" value="20"/> * <input type="radio"/> psia <input checked="" type="radio"/> bar <input type="radio"/> kPa <input type="radio"/> mm.Hg	Lohms $= 16416.4$	
Temperature Correction Factor (f _T) $= 1.04$		

- SELECT** - view all products on the Product Selector page having a Lohm rate 10% above or below the calculated value
- CANCEL** - return to the Product Selector page
- RESET** - clear calculator values

*Always verify flow calculations by experiment. The Lee Company expects the users of this calculator to be responsible for proper design and fabrication of their systems.

Figura 3.3.12. Calculadora para la válvula de restricción "Lee Jet". Fuente "The Lee Co".

Si metemos los datos en la calculadora nos dará una resistencia equivalente de: 1641,64 Lohms. Metiendo este dato en el buscador, nos dará la referencia de la válvula que debemos utilizar. En nuestro caso sería [JETA1872180D](#) es la más próxima.

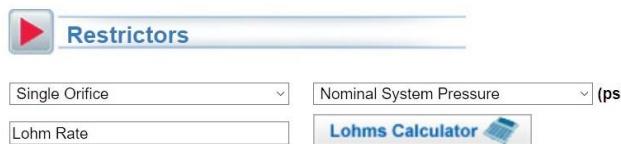


Figura 3.3.13. Selector de la válvula de restricción "Lee Jet". Fuente "The Lee Co".

3.3.3.2. Cálculos

Para calcular la pérdida de carga al hacer pasar el gas por un agujero muy pequeño, podemos aplicar las fórmulas (tvl, 2019). O las indicadas en calculadora de la serie “Lee Jet” vistas en el apartado anterior teniendo en cuenta que vamos a trabajar a velocidades sónicas.

La lectura de (Pazmiño Mayorga, et al., 2017), ha sido de gran ayuda para comprender en detalle el diseño de esta válvula.

$$\text{Conservación de la masa (Venturi)} \rightarrow v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (3.3.10)$$

$$\text{Por Bernouilli} \rightarrow p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \rightarrow \\ v_1^2 - v_2^2 = \frac{2 \cdot (p_2 - p_1)}{\rho}$$
(3.3.11)

sustituyendo en (3.3.10):

(3.3.12)

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2 \cdot (p_2 - p_1)}{\rho \cdot (A_1^2 - A_2^2)}} \rightarrow v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2 \cdot (p_2 - p_1)}{\rho \cdot (A_1^2 - A_2^2)}} \quad (3.3.13)$$

y el flujo volumétrico:

(3.3.14)

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = A_1 \cdot A_2 \sqrt{\frac{2 \cdot (p_2 - p_1)}{\rho \cdot (A_1^2 - A_2^2)}} \quad (3.3.15)$$

donde:

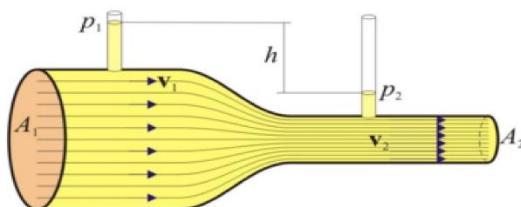


Figura 3.3.14. Efecto Venturi. Fuente (Pazmiño Mayorga, et al., 2017).

p: presión en un punto determinado.

A: área en un punto determinado.

v: velocidad en un punto determinado.

ρ: densidad del gas.

El caudal real no es igual al calculado a partir de la ecuación de Bernouilli, caudal teórico (3.3.15), ya que no se consideran perdidas energéticas en el propio tubo.

Para obtener el caudal real, aplicamos el coeficiente de descarga C_d , como factor corrector:

$$Q_{real} = C_d \cdot Q_{teórico} \quad (3.3.16)$$

donde:

C_d : *coeficiente de descarga.*

Q_{real} : *caudal real.*

$Q_{teórico}$: *caudal teórico calculado según principio de Bernouilli, ecuación (3.3.15).*

Considerando que debemos calcular el diámetro de la garganta A_2 y que A_1 va a ser fija y conocida tendremos que:

$$A_2 = \pi \cdot \left(\frac{d_o}{2}\right)^2 \quad (3.3.17)$$

donde:

A_2 : *sección del estrechamiento.*

d_o : *diámetro del estrechamiento.*

Sustituyendo (3.3.17) y (3.3.15) en (3.3.16), tenemos:

$$Q_{real} = C_d \cdot Q_{teórico} = C_d \cdot A_1 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_o}{2}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_2 - p_1)}{\rho \cdot \left(A_1^2 - \left(\pi \cdot \left(\frac{d_o}{2}\right)^2\right)^2\right)}} \quad (3.3.18)$$

teniendo en cuenta que:

$A_1 = 3,14 \text{ mm}^2$ *sección de entrada para un tubo de 2 mm de diámetro.*

$p_1 = 56 \text{ atm}$ *presión de entrada.*

$p_2 = 20 \text{ atm}$ *presión de salida.*

$\rho = 1,98 \text{ g/mm}^3$ *densidad del dióxido de carbono.*

$d_o = 0,2 \text{ mm}$: *diámetro del estrechamiento.* $A_2 = 0,0314 \text{ mm}^2$

Remplazando los datos y aplicando un coeficiente de descarga típico de 0,7 tenemos que:

$$Q_{real} = 0,7 \cdot 3,14 \cdot 0,0314 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (56 - 20)}{1,98 \cdot (9,86 - 0,001)}} = 0,132 \text{ g/min} \quad 3.3.1$$

$$Q_{real} = 0,075 \text{ l/min} < Q_{min} = 0,1 \text{ l/min}$$

Analizando el resultado anterior, vemos que una garganta de 0,2 mm nos asegura una presión a la salida de 20 atm en unas condiciones de caudal de 0,075 l/min que son más restrictivas que las máximas que vamos a exigir al sistema, 0,1 l/min. Por lo tanto, el dimensionado de la garganta es correcto y con un margen de seguridad de:

$$\vartheta = \left(\frac{Q_{min}}{Q_{seguridad}} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{0,1}{0,075} - 1 \right) \cdot 100 = 33\% \quad (3.3.20)$$

donde:

ϑ : factor de seguridad.

Q_{min} : caudal mínimo que vamos a exigir al dispositivo.

$Q_{seguridad}$: caudal por debajo del cual hay fallo.

Todos estos cálculos resultan muy interesantes, pero como veremos en el punto 3.3.3.4 "Simulación CFD", podemos utilizar la simulación CFD para dimensionar la garganta de esta válvula. Antes vamos a ver nuestro diseño en el siguiente punto.

3.3.3.3. Diseño

En la siguiente figura podemos ver las partes de esta pieza del agitador:

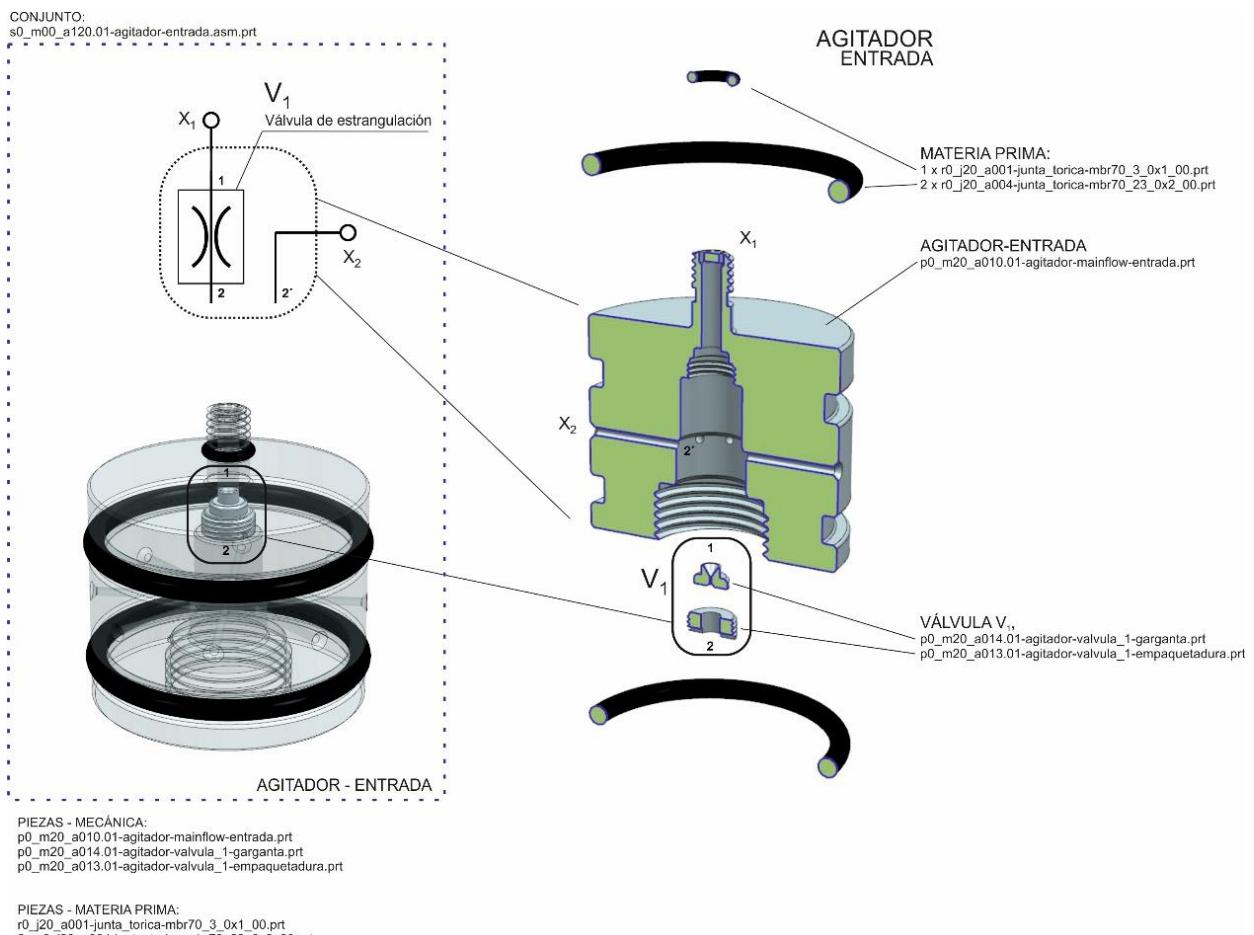


Figura 3.3.15. Agitador-Entrada, válvula 1 de restricción de flujo. Vista de conjunto.

Como hemos visto en el diseño del agitador (punto 3.3), éste está compuesto por varias piezas y la que tratamos aquí es la pieza de entrada o “Mainflow de Entrada”. Se ha realizado un diseño lo más compacto posible teniendo en cuenta las dimensiones de la electroválvula que veremos en el apartado 3.3.1.

Dentro del propio cuerpo, he insertado la válvula V₁, a cuya entrada (punto 1), le llega el gas procedente de la bombona por un “tubo” de 2 mm de diámetro, en este caso el “tubo” está mecanizado en propio tocho de metal que forma el cuerpo de esta pieza. Cuando la canalización se realiza de esta manera (en lugar de utilizar las clásicas tuberías), la pieza se suele denominar Mainflow.

A la salida de la válvula V₁, punto 2, se encuentra la entrada la electroválvula elegida que estudiaremos en el punto 3.3.1. El gas sale de la electroválvula por X₂.

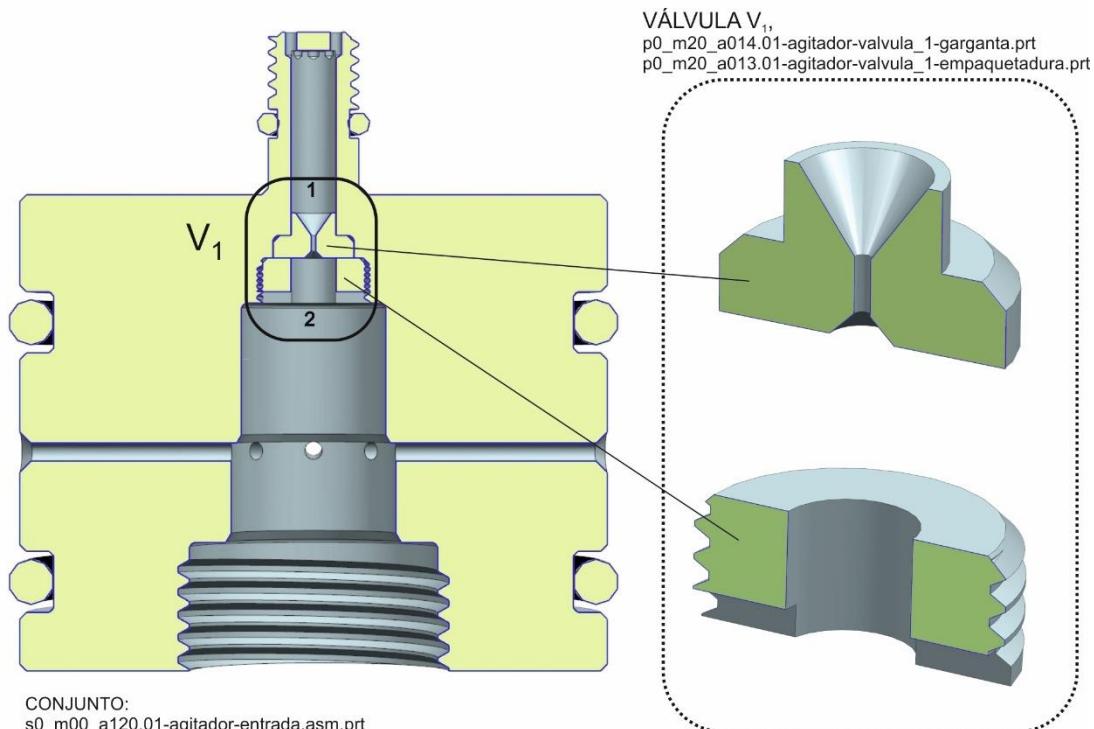


Figura 3.3.16. Agitador-Entrada, válvula 1 de restricción de flujo.
Detalle de la válvula.

La garganta de la válvula (pieza “p0_m20_a014.01[.]”) se fija mediante un espárrago taladrado con ranura que hace de empaquetadura (pieza “p0_m20_a013.01[.]”).

En la sección de la pieza que podemos ver en la figura anterior, apreciamos que se han utilizado tres juntas de materia prima (ver anexo A-2.5 Juntas tóricas):

- ✓ 1 x r0_j20_a001-junta_torica-mbr70_3_0x1_00.prt
- ✓ 2 x r0_j20_a004-junta_torica-mbr70_23_0x2_00.prt

El dimensionado de la válvula V₁, lo he realizado con la ayuda de la simulación de dinámica de fluidos por ordenador, “Computational Fluid Dynamics” (CFD) en inglés, como veremos en el siguiente punto.

3.3.3.4. Simulación CFD

Para el dimensionado de la válvula de restricción V_1 , ha sido muy útil la utilización de las potentes herramientas de Simulación de Dinámica de Fluidos en el entorno de PLM NX. En concreto he utilizado la simulación avanzada para flujos de NX, y una versión de evaluación de FloEFD por su rápida curva de aprendizaje en comparación con otras herramientas que también he valorado como ANSYS Fluent, Blue CFD u Open Foam. En este sentido quiero agradecer la ayuda que me ha proporcionado Antonio Gómez de Nabladot (cuyo trabajo conocí a través de un seminario de SEAS) que me ha ayudado a enfocar en el camino correcto las simulaciones CFD.

En el directorio de software específico en el repositorio del proyecto³⁴, se pueden ver los programas y los videos utilizados como referencia. En la carpeta de simulaciones³⁵, se encuentran todos los archivos e informes completos de los resultados.

Podría decirse que software CDF es un software de análisis por elementos finitos solo que en lugar (o, además) de mallar el sólido, modela el espacio entre los sólidos a los que aplica métodos numéricos y algoritmos para resolver problemas de flujo.

El primer paso para la simulación es simplificar el modelo como vemos en la siguiente imagen.

Simplificación del modelo

He reducido el modelo a la esencia, eliminando roscas, holguras para la inserción, etc. El nuevo modelo es más sencillo por lo tanto las simulaciones se realizarán más rápido.

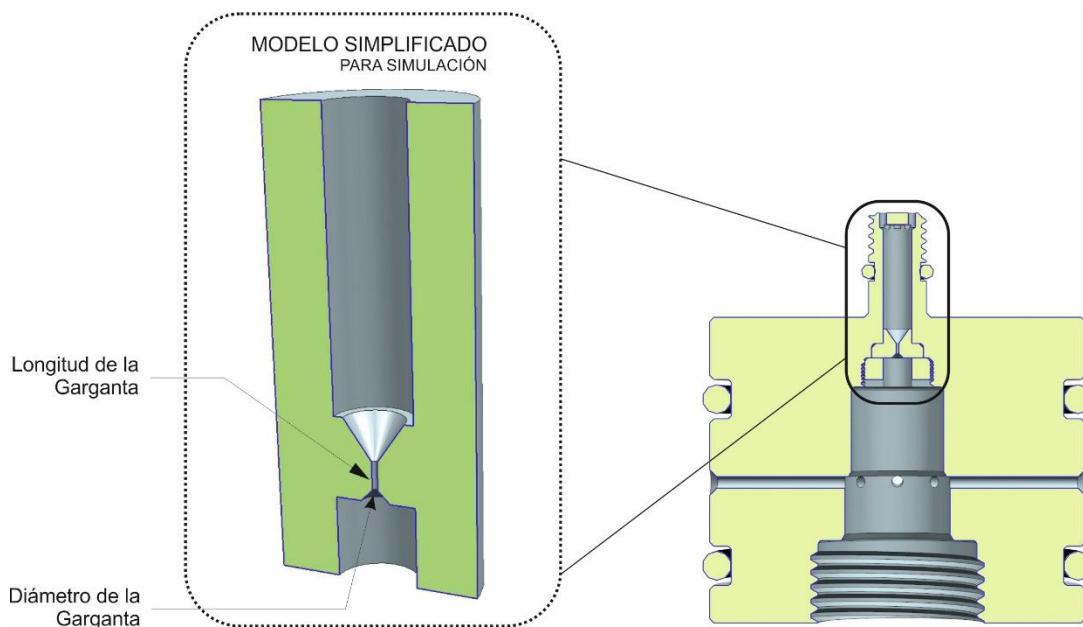


Figura 3.3.17. Válvula 1 de restricción de flujo. Modelo simplificado.

³⁴ Software FEA-CFD: https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_sw

³⁵ Simulaciones CFD:
https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_cad/3d_simulaciones

El modelo es paramétrico, permitiendo la modificación del diámetro de la garganta y la longitud de esta. Lo utilizaremos para realizar estudios paramétricos y ver cómo afecta la modificación de estas variables en nuestras necesidades.

Configuración general

Realizaremos un análisis del interior de la pieza por lo debemos cerrar el espacio interior para generar un dominio computacional finito. Ver imagen siguiente a la izquierda.

Utilizaremos dióxido de carbono (gas real) como elemento del fluido en un régimen de flujo laminar y turbulento.

Para simplificar, consideraremos paredes adiabáticas, no hay intercambio de calor entre el dióxido de carbono y el exterior y despreciaremos la rugosidad en el acabado superficial de estas paredes.

Estableceremos las condiciones iniciales de presión y temperatura, según el estándar NIST para la definición de condiciones normalizadas de uso en termodinámica³³, a 1 atm y 20,05°C respectivamente.

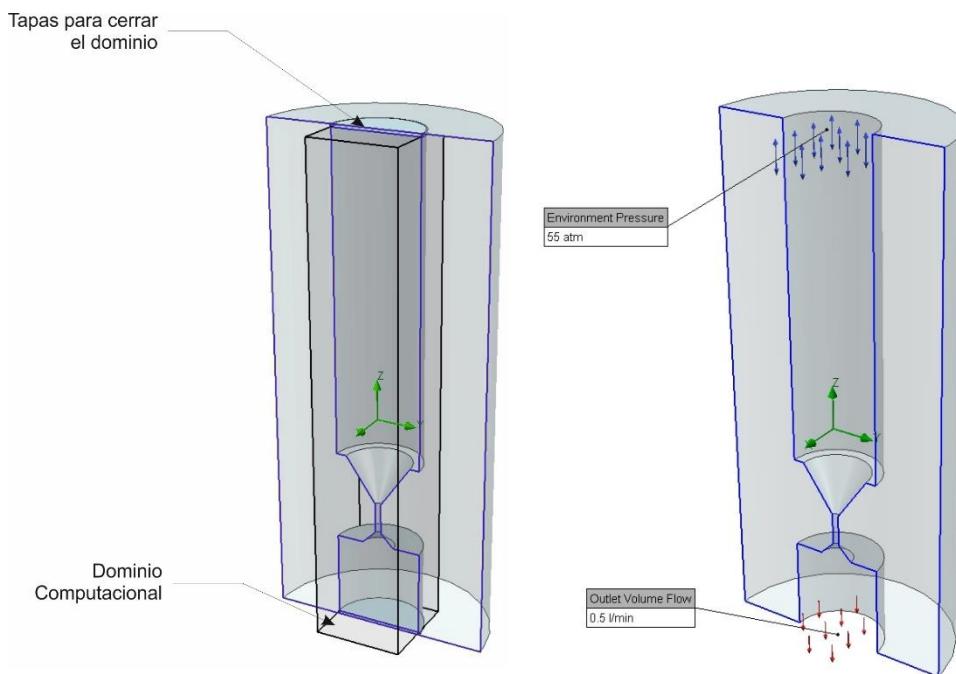


Figura 3.3.18. Válvula 1. Simulación. Dominio computacional y condiciones de contorno.

Condiciones de contorno y objetivos

Indicaremos al sistema las condiciones de contorno como vemos en la imagen anterior a la derecha:

- ✓ Presión ambiente a la entrada de 56 atm que es la presión de la bombona de gas.
- ✓ A la salida indicaremos un flujo de entre 0,1 l/min a 0,5 l/min. Que es el rango de flujo que gas que ajustaremos a la salida del inyector.

También estableceremos los objetivos de convergencia de la simulación:

- ✓ En la salida, estableceremos que la simulación ha terminado cuando en régimen estacionario la presión en el volumen de salida es estable.

Con estos datos, ya podemos lanzar la simulación y obtener los resultados para las condiciones de contorno indicadas.

Estudio paramétrico del diámetro de garganta

En nuestro caso, que vamos a tener distintos flujos circulando por la garganta, es de gran utilidad realizar un estudio paramétrico en el que podamos variar el diámetro de la garganta y observar la distribución de presiones y velocidades en el dominio del análisis para distintos flujos de gas.

Para ello realizamos un estudio paramétrico de dos variables que nos proporciona el siguiente escenario:

Puntos de Diseño										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
diámetro [mm]	0,1	0,1	0,14	0,14	0,16	0,16	0,18	0,18	0,20	0,20
flujo [l/min]	0,10	0,50	0,10	0,50	0,10	0,50	0,10	0,50	0,10	0,50
presión [atm]	8,89	0,08	27,39	2,28	39,71	4,70	44,12	6,31	47,52	12,75

Tabla 3.3.4. Tabla de resultados. Escenario del diseño paramétrico de la garganta.

Vemos que he discretizado a cinco valores de entrada el diámetro de la garganta [0,1; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20] mm y el flujo lo he discretizado en dos valores [0,10; 0,50] l/min, lo que nos da un escenario con 10 puntos de diseño.

La presión estática media obtenida al lanzar la simulación del escenario, la podemos ver en la última fila de la tabla anterior y en las gráficas siguientes.

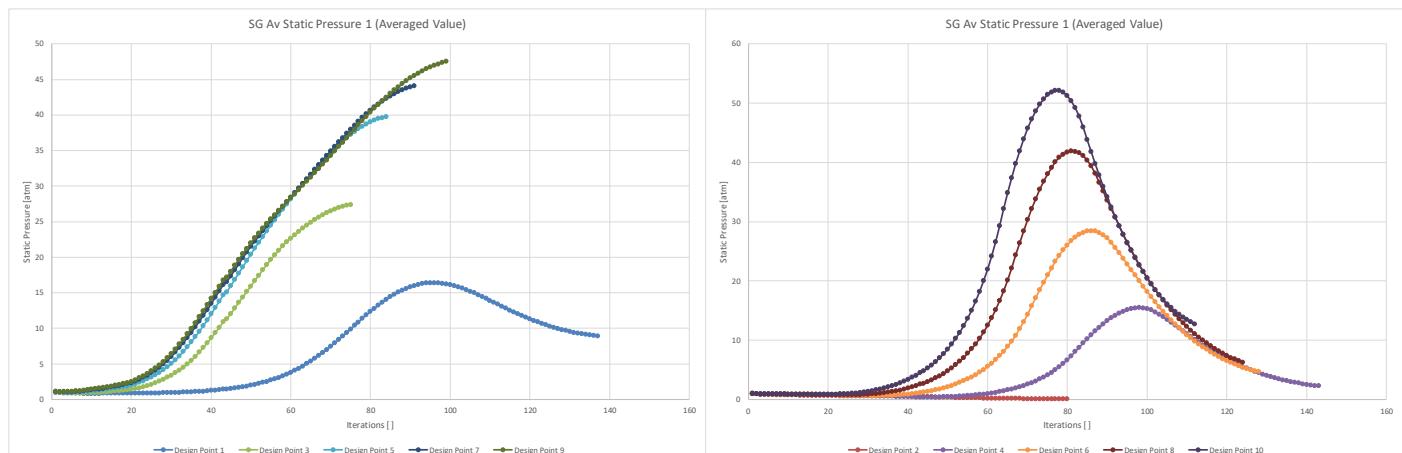


Figura 3.3.19. Graficas de resultados. Flujo de 0,1 l/min (izquierda) y 0,5 l/min (derecha).

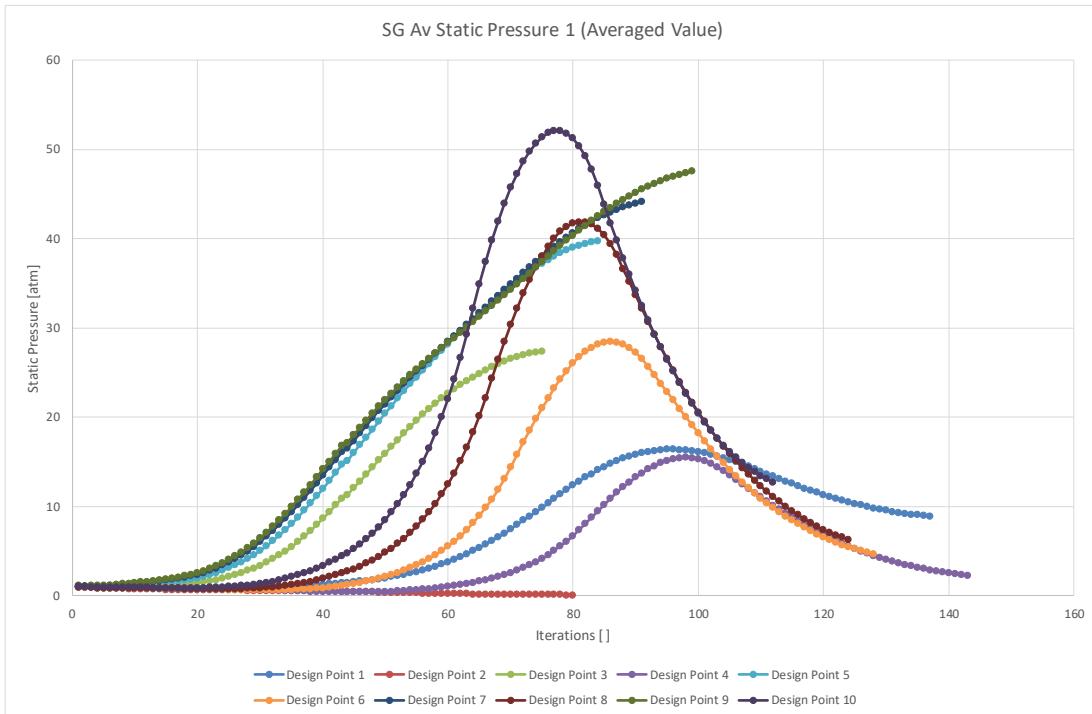


Figura 3.3.20. **Graficas de resultados. Escenario completo.**

Analizando los datos de este estudio podemos ver que el punto de diseño que más se aproxima a lo que necesitamos se da para un diámetro de garganta de 0,14 mm en el que con el flujo más bajo 0,1 l/min obtenemos una presión estática a la salida de la válvula de 27,39 atm.

Los resultados detallados de este estudio paramétrico se pueden consultar en el Excel del repositorio del proyecto³⁵.

Resultados para una garganta de 0,14 mm

Una vez seleccionado el diámetro de la garganta nos centramos en ver cómo se comporta ante las distintas solicitudes de flujo de flujo.

En las siguientes páginas veremos los resultados para:

- ✓ Presión estática a la salida de la válvula. Que nos indicará la caída de presión en régimen estacionario que tememos a la salida.
- ✓ Velocidad del flujo. Este resultado nos permite analizar posibles bloqueos de la garganta y evaluar el ruido que esta pueda producir.
- ✓ Líneas de flujo. Nos da una idea visual de la tendencia del flujo.

En cada apartado he realizado una comparativa a máximo y mínimo flujo de funcionamiento. En cada gráfica, he ploteado a lo largo del eje longitudinal los valores de presión y velocidad para el flujo requerido.

Presión estática

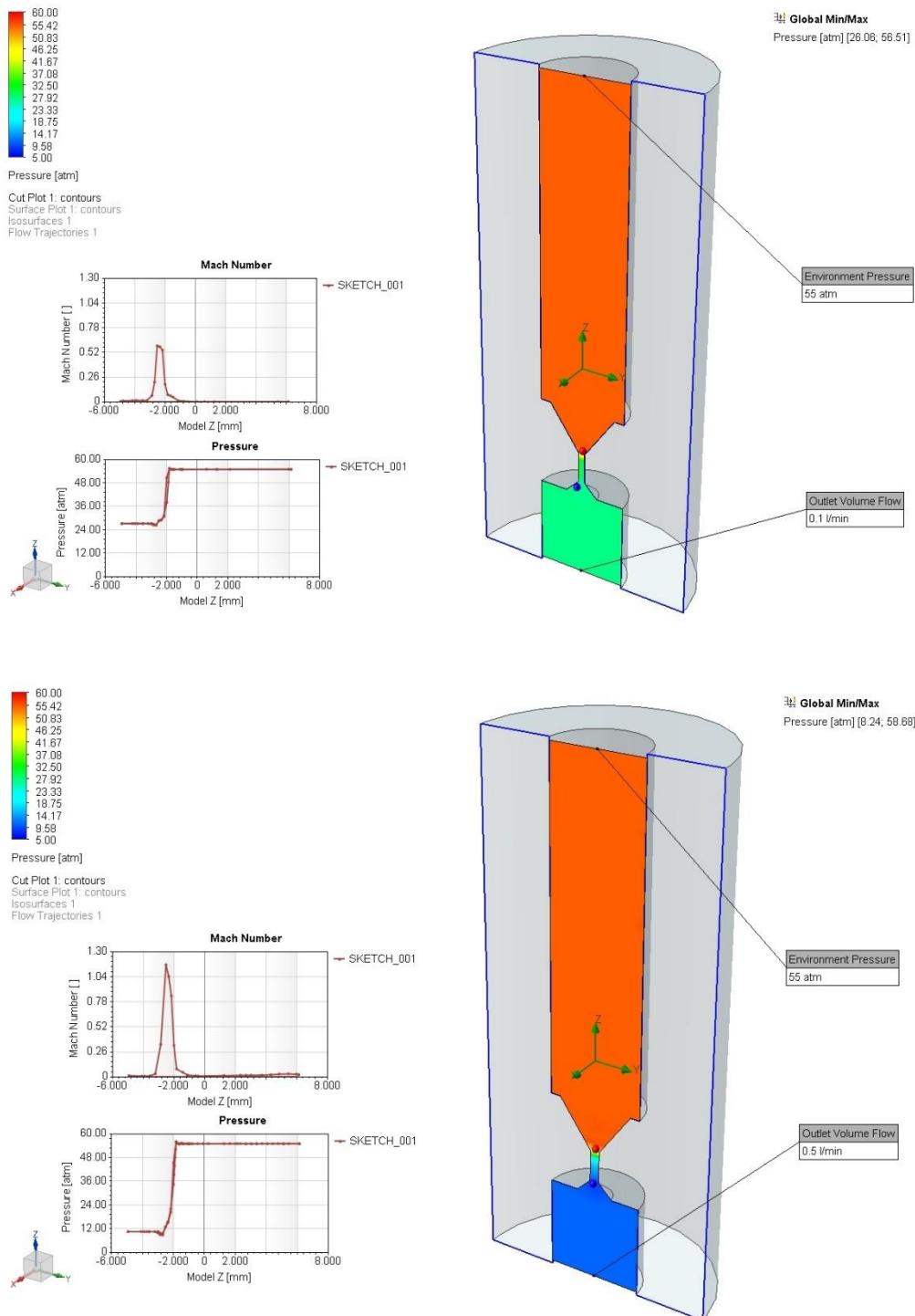


Figura 3.3.21. Resultados de presión estática.
Para flujos de 0,1 l/min y 0,5 l/min.

Velocidad de flujo, número Mach

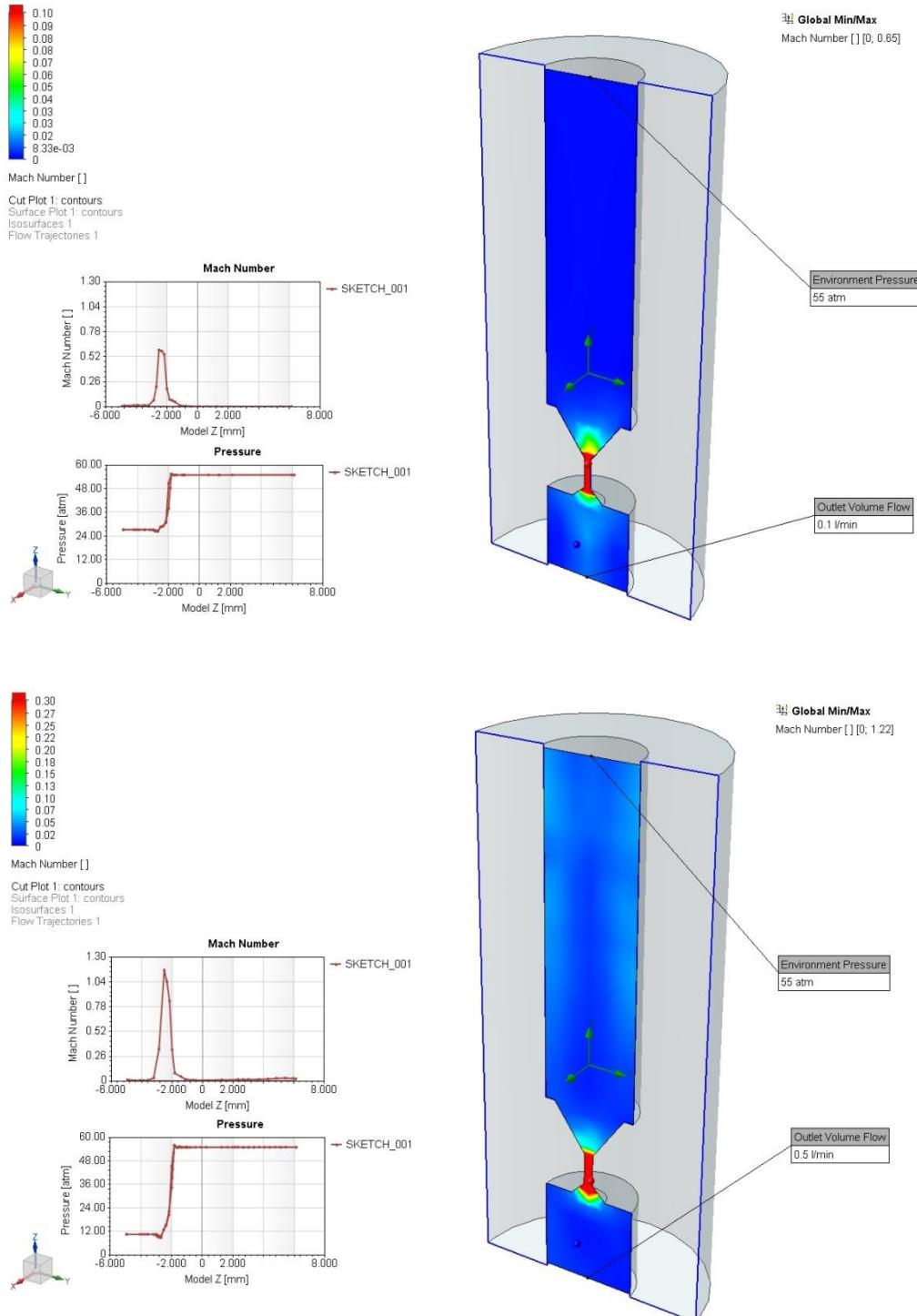


Figura 3.3.22. Resultados de velocidad, número de Mach.
Para flujos de 0,1 l/min y 0,5 l/min.

Líneas de flujo

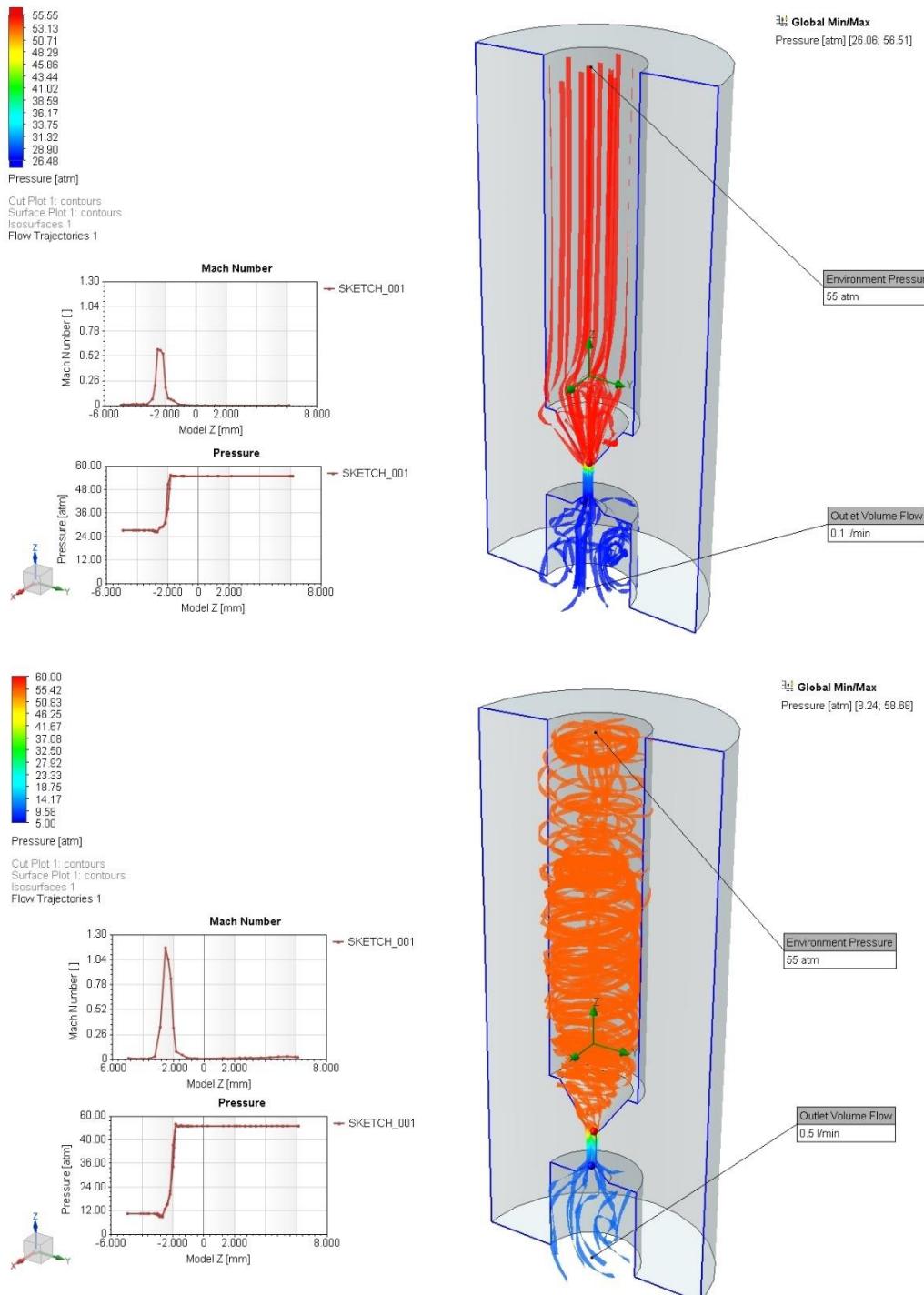


Figura 3.3.23. Resultados, líneas de flujo.
Para flujos de 0,1 l/min y 0,5 l/min.

Análisis de los resultados

Para entender estos resultados, he hecho uso de las referencias para el diseño de válvulas de algunos importantes fabricantes (Valtek, 2019), (Cashco, 2019).

Para relacionar el número Mach con el ruido he utilizado el trabajo de (Shahda, 2010), que relaciona el ruido con el número Mach. Pero especialmente he utilizado el libro de M. White, Frank (M. White, 1979), o los apuntes de mecánica de fluidos de (Cruz, et al., 2017) basados en el libro de Frank.

Estamos trabajando con gases compresibles, con paredes adiabáticas de fricción despreciable. La compresibilidad del gas la podemos apreciar en la curva de presión temporal de la simulación en la Figura 3.3.20 más atrás, donde la diferencia de presión entre la entrada y la salida comprime el gas hasta que este empieza a circular por el estrechamiento de la garganta, en régimen estacionario, a la salida se alcanza una determinada presión que depende del requerimiento de flujo y el diámetro de la garganta y de la viscosidad del fluido. Ver (M. White, 1979 pp. 579, 596) Flujos compresibles.

- Presión

Cuanto mayor es el flujo requerido, mayor es la caída de presión a la salida de la válvula como se pude apreciar en la Figura 3.3.21. Nuestra máxima presión a la salida, la determina la siguiente válvula.

- Velocidad

A mayor requerimiento de flujo, para el mismo diámetro de garganta la velocidad aumenta en la zona de estrechamiento por conservación de la energía, como se aprecia en la Figura 3.3.22. Podemos considerar la válvula de estrangulación como una tobera convergente-divergente (M. White, 1979 p. 609). Para medir la velocidad del gas utilizamos el número Mach.

Con números Mach superiores a 0,3 empieza ser importante la compresibilidad del gas. El coeficiente de resistencia está en función de la velocidad (número de Mach, Ma) y de la viscosidad (número de Reynolds, Re). Para velocidades superiores a $Ma = 1$, la viscosidad se hace despreciable frente a la velocidad (M. White, 1979 p. 476).. Ver ámbito de velocidad en función del número Mach en capítulo de gases compresibles (M. White, 1979).

- Ruido

El número de Mach nos va a dar una idea del ruido que va a emitir nuestra válvula siendo proporcional al flujo requerido e intensificándose cuando nos acercamos a la velocidad del sonido en el gas $Ma = 1$. En nuestro caso se trata de una válvula muy pequeña con requerimientos de flujo muy bajos por lo que no consideraremos necesaria una actuación a este respecto. Existen técnicas para reducir el ruido en grandes fabricantes (Valtek, 2019), (Cashco, 2019).

- Bloqueo de la válvula

Flujos compresibles en conductos con fricción pueden provocar el bloqueo de la válvula (M. White, 1979 p. 617). Cuando el flujo adiabático con fricción en la entrada de la válvula de sección constante (la garganta de nuestra válvula) es subsónico, el flujo aguas abajo tiende hacia $Ma = 1$ independientemente de la velocidad a la entrada Ma_1 .

Existe una cierta longitud de conducto máxima L_{\max} , para una determinada velocidad de entrada Ma_1 a la que $Ma_2 = 1$. Se dice entonces que la garganta está bloqueada (M. White, 1979 p. 617).

En nuestras simulaciones estamos despreciando la fricción por lo que los cálculos no contemplan el bloqueo de la garganta. Nuestra válvula es de muy pequeñas dimensiones por lo que las ondas de choque son mínimas y es difícil que se bloquee la garganta por la fricción. Es normal que trabajemos a velocidades sónicas con este tamaño de conducto.

Para corregir el posible bloqueo introduje en el diseño 3d un segundo parámetro que controla la longitud de la garganta ver la Figura 3.3.17. Modificando este valor podríamos hacer que la onda de choque quedara fuera de la garganta y por lo tanto liberase el bloqueo.

- Tobera de salida

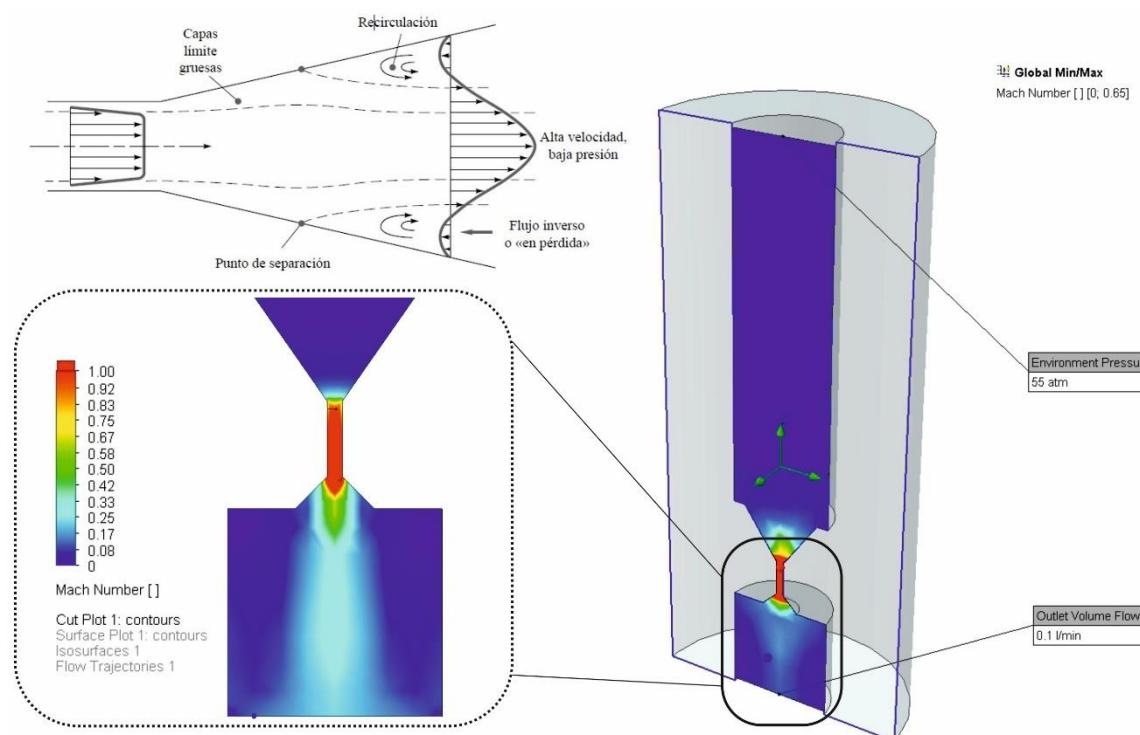


Figura 3.3.24. Detalle de velocidad de salida.

Me ha parecido interesante poner este detalle de la tobera de salida donde se aprecia la acción de difusión de gas no ideal a la salida de la válvula (M. White, 1979 p. 392).

También he añadido las líneas de flujo que nos dan una idea del régimen en el que está trabajando la válvula. En la Figura 3.3.23 se puede apreciar como para flujos bajos (imagen superior) el régimen de funcionamiento es laminar. Mientras que para flujos altos (imagen inferior), se aprecian una gran cantidad de remolinos propios de un régimen de funcionamiento turbulento.

3.3.1. Agitador Interconexión - Válvula 2, electroválvula

Entre la entrada y la salida del agitador se encuentra esta pieza en la que se inserta la mini electroválvula de vías que permite o bloquea el paso de gas en el reactor.

En el directorio del repositorio de micro válvulas³⁶, recojo la búsqueda realizada en internet a este respecto.

Cuando hablamos de miniaturización, el referente es “The Lee Co”³⁰ que, como ya vimos en el punto anterior, tiene una gran cantidad de válvulas y electroválvulas de pequeñas dimensiones³⁷.

Algunas electro válvulas de “The Lee Co” que he barajado son:



Figura 3.3.25. Electroválvulas de Lee Co. Serie INK (izquierda) y LGV (derecha). Fuente The Lee.

Staiger³⁸ es otro de los fabricantes de mini electroválvulas de gran renombre y calidad cuyo catálogo³⁹ es impresionante:



Figura 3.3.26. Electroválvulas de Staiger. Serie Spider. Fuente Stiger.

³⁶ Mini electroválvulas:

github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/micro_valvulas

³⁷ Ver catálogo de Lee Co en:

http://www.leeproducts.co.uk/press_release_archive_1.htm#prettyPhoto

<https://www.theleeco.com/products/electro-fluidic-systems/solenoid-valves/>

³⁸ Electroválvulas de Staiger: <https://www.staiger.de/en-us/products/micro-proportional-valves>

³⁹ Catálogo de Staiger en el repositorio:

[./micro_valvulas/staiger.de/staiger-complete_catalogue.pdf](#)

Pero finalmente la que mejor se ajusta a las necesidades del proyecto es la válvula miniatura de Schultz⁴⁰ modelo VPKM007 que admite una precisión estática máxima de 40 bares (más que suficiente para nuestras necesidades según los cálculos del punto anterior):

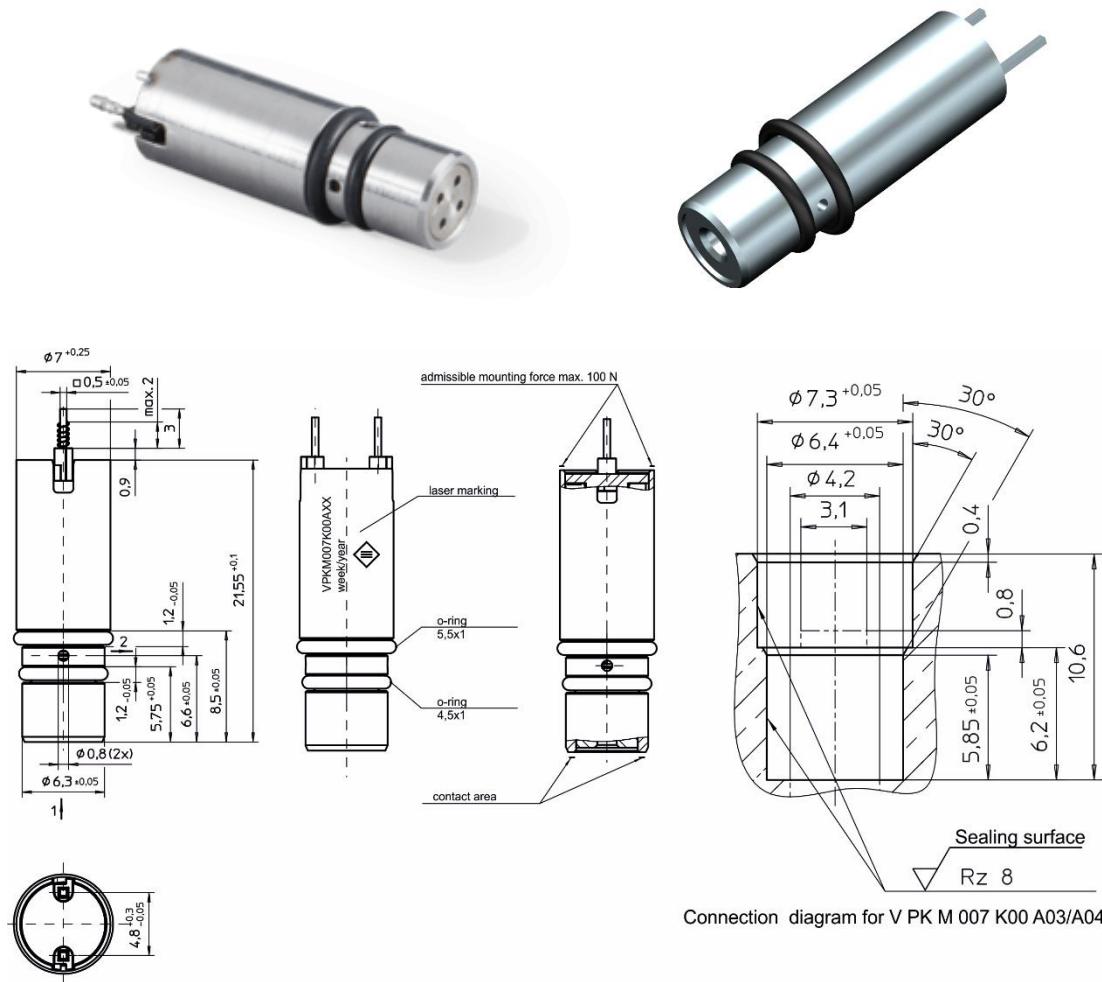


Figura 3.3.27. Electroválvula de Schult, serie VPKM007.

Fuente Schultz.

En la figura anterior, podemos ver el modelo real arriba a la izquierda, el modelado 3d realizado arriba a la derecha y medidas utilizadas para el modelado en la parte inferior.

Las medidas han sido obtenidas del [datasheet](#) del fabricante también disponible en el repositorio del proyecto.

⁴⁰ Válvula miniatura de Schlutz: <https://www.magnet-schultz.com/en valve-solenoids-for-pneumatics/>

3.3.1.2. Diseño

En la siguiente figura podemos ver las piezas que componen el conjunto agitador-interconexión:

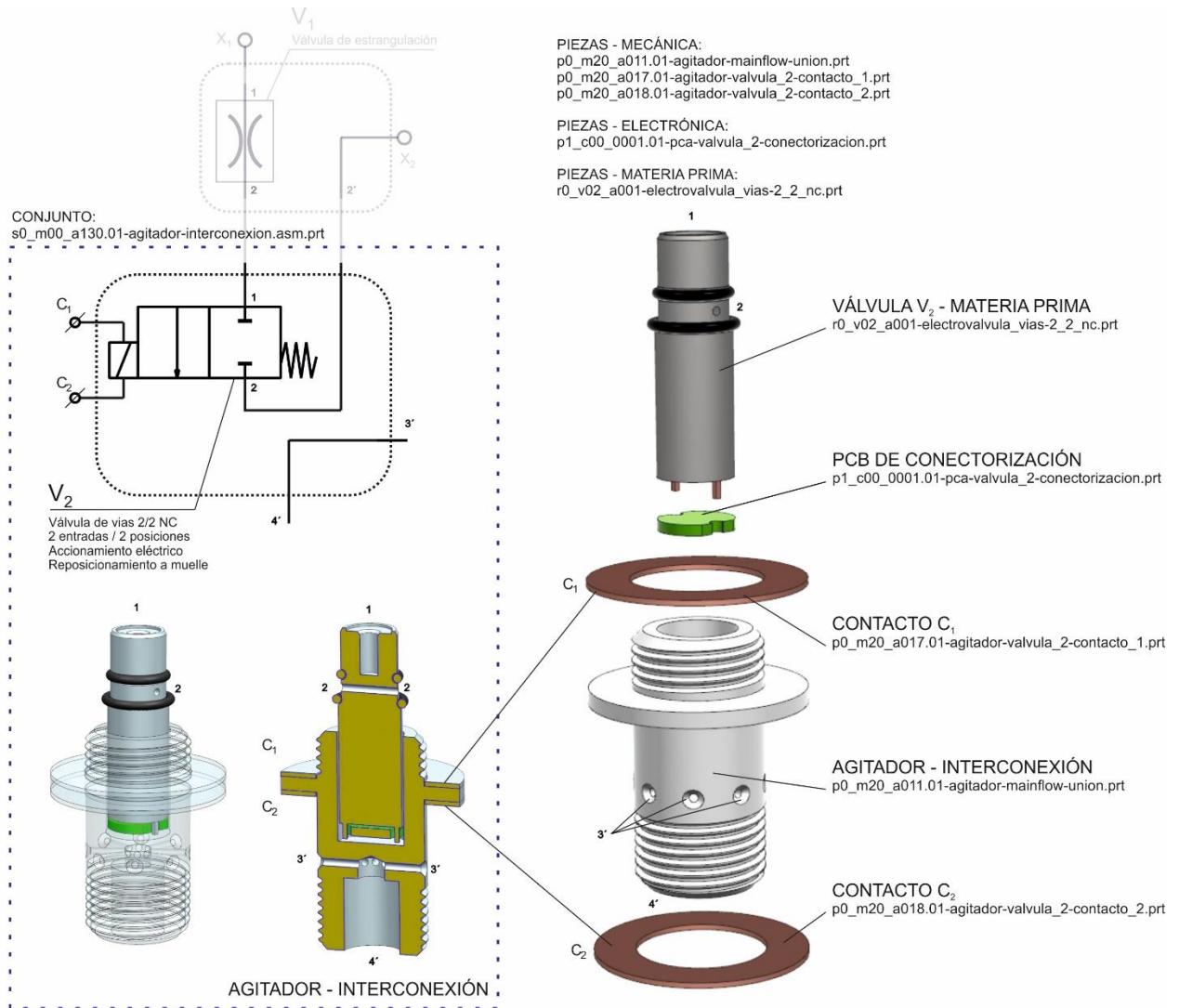


Figura 3.3.28. Agitador-Interconexión, válvula 2 de conmutación de vías. Vista de conjunto.

La pieza de interconexión une la entrada y la salida del agitador haciendo además de socket par la electro válvula de control de vías que hace de interruptor neumático permitiendo el paso o cierre del flujo de nuestro inyector.

A la rosca superior de la pieza de agitador-interconexión se conecta el conjunto agitador-entrada que contiene la válvula de estrangulación V₁ como vimos en el apartado anterior. La salida 2 de la válvula V₁ queda directamente enfrente a la entrada 1 de la válvula V₂. La salida 2 de la válvula V₂ entra de nuevo al conjunto agitador-entrada para salir por x₁. En la figura anterior, he dibujado difuminada la válvula V₁ para poder apreciar la interconexión entre ambos subconjuntos.

A la rosca inferior del conjunto agitador-interconexión, se conecta el conjunto agitador-salida como veremos en el punto 3.3.2.

3.3.1.3. Conectorización

Un punto aparte merece la conectorización de la válvula V_2 , como podemos ver en el despiece, la válvula viene sin conectorizar por lo que debemos aportar una solución para hacer accesibles los electrodos de la bobina desde el exterior.

La solución adoptada es utilizar las piezas metálicas agitador-entrada y agitador-salida como ánodo (terminal positivo) y cátodo (terminal negativo) respectivamente, ver siguiente figura:

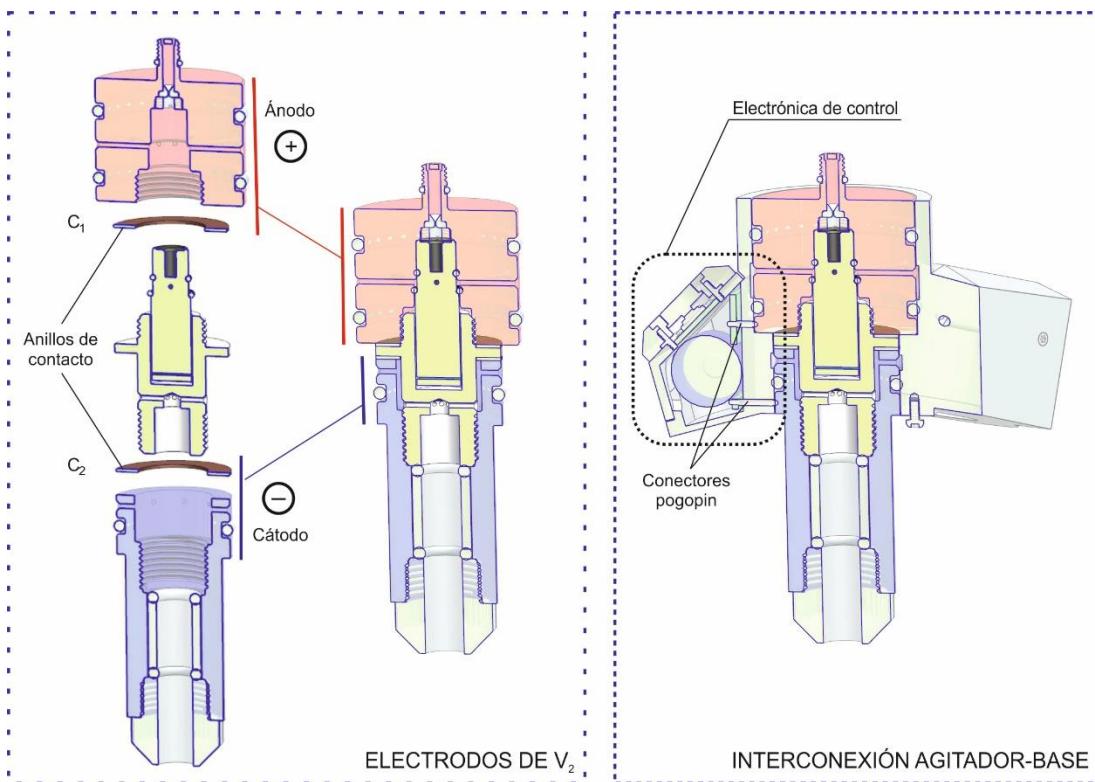


Figura 3.3.29. Agitador, electrodos de la válvula 2.

Esta solución permite establecer conexión eléctrica entre la base y el agitador sin utilizar un conector polarizado, es decir, no tendremos que insertar el agitador en una posición determinada dentro de la base para que se establezca conexión entre la electrónica de control en la base y la electroválvula de activación V_2 en el agitador. Solamente hay que insertar el agitador en la base para que el sistema funcione.

Este sistema de Conectorización ha sido ideado teniendo en cuenta los requisitos de diseño enunciados en el apartado 1.3, donde estableciamos una interface lo más sencilla posible teniendo en cuenta que la idea es que el dispositivo lo pueda utilizar cualquier persona en un entorno doméstico.

Para llevar a cabo esta conectorización, es necesario que la pieza agitador-interconexión esté fabricada con un material aislante. He elegido por sus propiedades:

PEEK Polieteretercetona

“Rango de temperatura de trabajo -60°C $+250^{\circ}\text{C}$. Muy alta resistencia mecánica, rigidez y dureza. Resistencia sobresaliente a la corrosión química y a la hidrólisis. Buena resistencia a la fluencia, incluso a temperaturas elevadas. Alto límite de fatiga. Alta tenacidad. Muy buena

resistencia al desgaste. Muy buena estabilidad dimensional. Resistencia intrínseca a la llama. Muy bajo nivel de humo durante la combustión. Buenas propiedades dieléctricas y de aislamiento eléctrico. Resistencia excepcional a los rayos de alta energía. Está aprobado por la FDA para contacto con alimentos". Fuente, (Erica, 2019).

Asimismo, son necesarios unos anillos de contacto (c_1 y c_2) para garantizar la conexión con la entrada y la salida del agitador. La placa de conectorización "p1_c00_0001.01-[.].prt", es la encargada de llevar los terminales de la electroválvula hasta los anillos de conexión.

La electrónica principal que se encuentra dentro de la base del dispositivo, efectúa el contacto con los electrodos de la bobina en el agitador a través de conectores "pogo pin":



Figura 3.3.30. Conectores "pogo pin". Tipos y estructura.

3.3.1. Agitador Salida – Conexión de difusor rápida.

Esta es la pieza que se rosca a la parte inferior de la piza vista en el punto anterior. También es el electrodo negativo de la electroválvula. Se trata de una pieza de paso desde la base hacia el difusor en la que se ha implementado un sistema conexionado rápido. En el siguiente punto se explica en detalle el diseño.

3.3.1.1. Diseño

En el esquema general de la Figura 3.3.1 más atrás, se puede ver como el gas ya estabilizado y regulado que viene de la base, entra de forma radial por el punto de conexión lateral X_3 , para salir por el punto de conexión rápida X_4 hacia el difusor o contactor.

En este punto (X_4) la presión de salida es baja (con flujos de entre 0,1 y 0,5 l/min) por lo que los requerimientos de estanqueidad no son tan elevados como en la parte de alta presión a la entrada (punto X_1). Esto nos ha permitido implementar este sencillo sistema de inserción rápida.

La inserción rápida confiere al diseño una mayor maniobrabilidad y agilidad a la hora de cambiar el tipo de difusor haciendo que sea extremadamente fácil cambiar el tipo de contactor en caso de ser necesario. Simplemente habría que introducirlo por el punto de conexión rápida ejerciendo una pequeña presión axial.

En cualquier caso, se puede asegurar fijación del difusor apretando manualmente el tornillo moleteado en la parte baja de este conjunto.

En la siguiente página, podemos ver el despiece donde se aprecia el sistema de conexionado rápido.

Como referencia muestro en marca de agua el conjunto agitador-interconexión visto en el punto anterior donde se aprecia como esta canalizado el gas. Del punto de conexión de baja presión X₃, al punto 3' y de la salida 4' del agitador-interconexión al sistema de conexión rápido X₄:

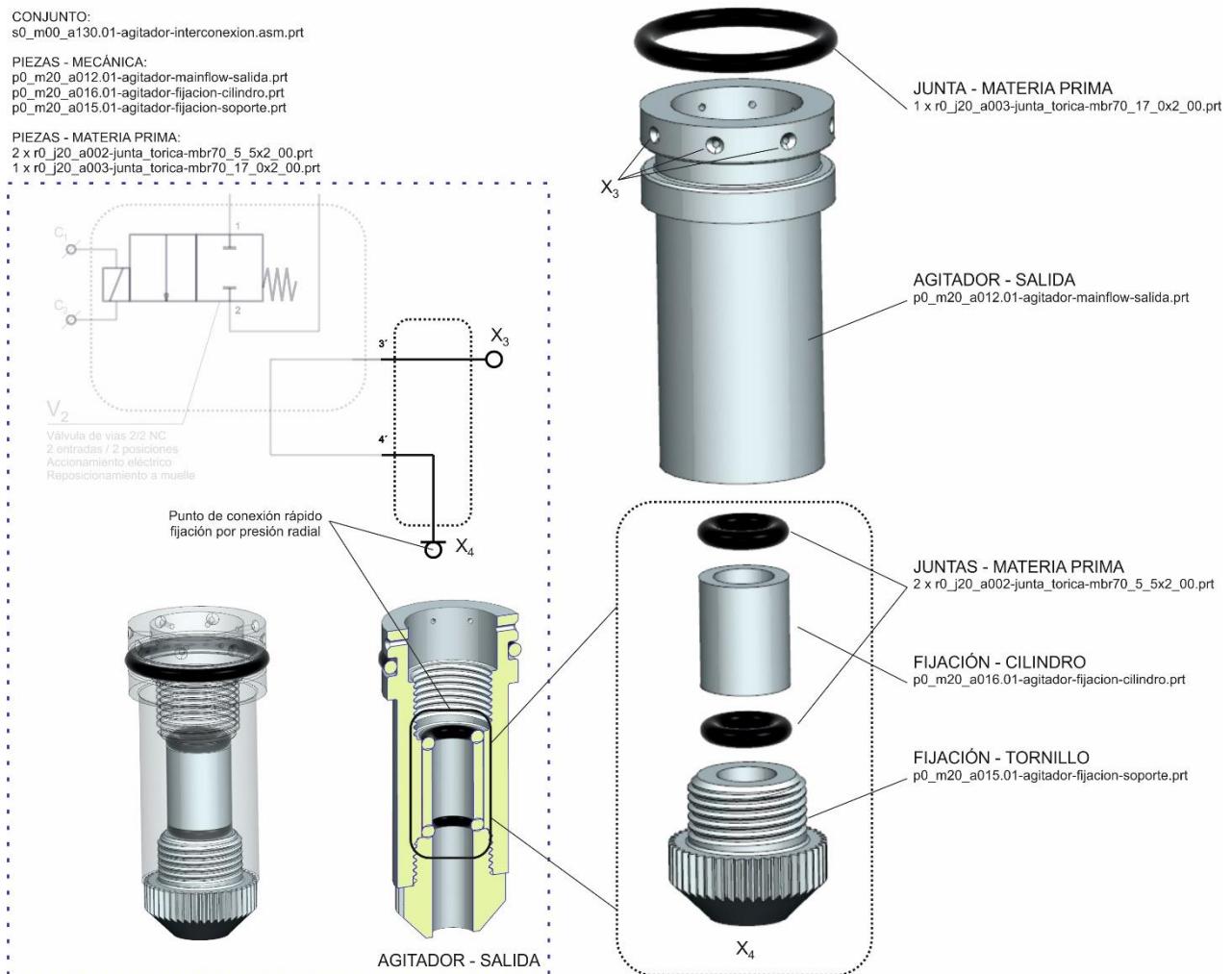


Figura 3.3.31. Agitador-Salida con punto de conexión rápido. Vista de conjunto.

Sistema de conexiónado rápido

En la siguiente ilustración muestro el funcionamiento del sistema de conexión rápida. A la izquierda, punto 1, podemos ver el sistema completo sin el contactor insertado. Muestro la pieza “p0_m20_a011.01-agitador-mainflow-union.prt” vista en el apartado anterior ya que sirve de tope para la inserción del contactor o difusor. A la derecha, en el punto 2 de la imagen siguiente, podemos ver el tubo del difusor completamente insertado en el punto de conexión rápida X₄.

El funcionamiento es sencillo, el tornillo de apriete “p0_m20_a015.01-[..].prt” y su extensión el cilindro de fijación “p0_m20_a016.01-[..].prt”, presionan las juntas tóricas “r0_j20_a002-[..].prt” que tienden a expandirse axialmente.

En esta expansión se encuentran con el tubo del difusor (ver punto 2 en la siguiente imagen) que genera un apriete radial en dos puntos de manera que el tubo queda fijado por fricción con una fuerza y estanqueidad controlada por el tornillo de apriete moleteado que podemos encontrar en la parte inferior de esta pieza.

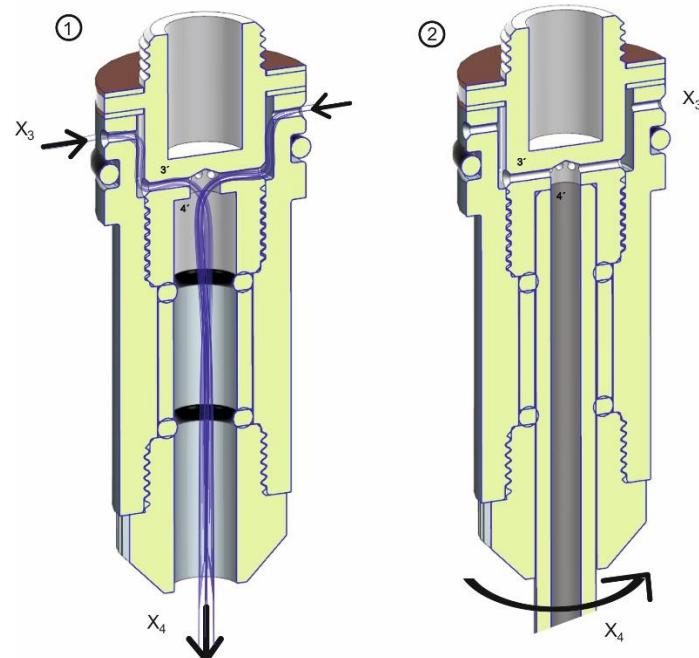


Figura 3.3.32. Agitador-Salida. Conexiónado rápido.

El apriete del tornillo moleteado y por lo tanto la fijación del tubo del contactor se puede realizar a mano sin ningún tipo de herramienta.

En la imagen anterior, he dibujado en líneas azules (punto 1) el recorrido del flujo a través del conjunto agitador-interconexión y agitador-salida.

3.3.2. Contactor – Difusor

Esta es una de las piezas más importantes del inyector, de ella depende que la disolución del gas en el vino sea buena o mala.

Existen varios tipos de difusores o contactores como se explicó en el apartado de fundamentos teóricos de los reactores químicos bifásicos en el 2.1 más atrás. Del difusor depende el tamaño inicial de la burbuja y la distribución de la fase gaseosa en el volumen de reacción. El trabajo de (Li, et al., 2009) explica la importancia de una distribución espacial de la fase gaseosa homogénea en todo el volumen de reacción.

Hay gran cantidad de literatura respecto al diseño de columnas de burbujeo y caracterización del tamaño de la burbuja (Martín del Campo, 2015). Recordemos que el tamaño de la burbuja es determinante en la reacción ya que éste afecta directamente al tiempo de reacción (cuanto más grande la burbuja, más rápido asciende dentro de la botella y por lo tanto menor es el tiempo de reacción) y tiempo de contacto entre interfases (cuanto mayor es la burbuja, menor renovación de área interfase por lo tanto menor transferencia de masa). Ver la explicación de

los parámetros controlables en la página 25 y los factores que influyen en la disolución en la Tabla 2.1.4.

Par el diseño del difusor, se ha utilizado un tubo de 6 mm de diámetro (1,5 mm de pared) por 250 mm de longitud del conocido fabricante Swagelok⁴¹. Este fabricante dispone de distintas calidades y materiales pudiendo cortar avellanar y roscar los extremos según exigencias. El que mejor se ajusta a nuestro diseño es el tubo:

Tubo de instrumentación sin soldadura de 304/304L y 316/316L

Referencia
SS-T6M-S-1.5M-6ME
Descripción del producto
Tubo sin soldadura de Acero inox. 316/316L, 6 mm OD x 1.5 mm de pared x 6 Metros (Precio y pedido por metro; los pedidos son en múltiplos de 6 metros)

Especificaciones

General	
eClass (6.0)	37029000
Material del cuerpo	Acero Inoxidable
Tube OD	6 mm
Tube Wall Thickness	1.5 mm
UNSPSC (11.0501)	31231319
UNSPSC (17.1001)	40182406
UNSPSC (4.03)	40141818
UNSPSC (PGE)	401716AI

Figura 3.3.33. Tubo de acero para el difusor. Fuente Swagelok.

Otra cuestión importantísima es el micro taladrado de los orificios del difusor. La solución elegida ha sido Rofin⁴²

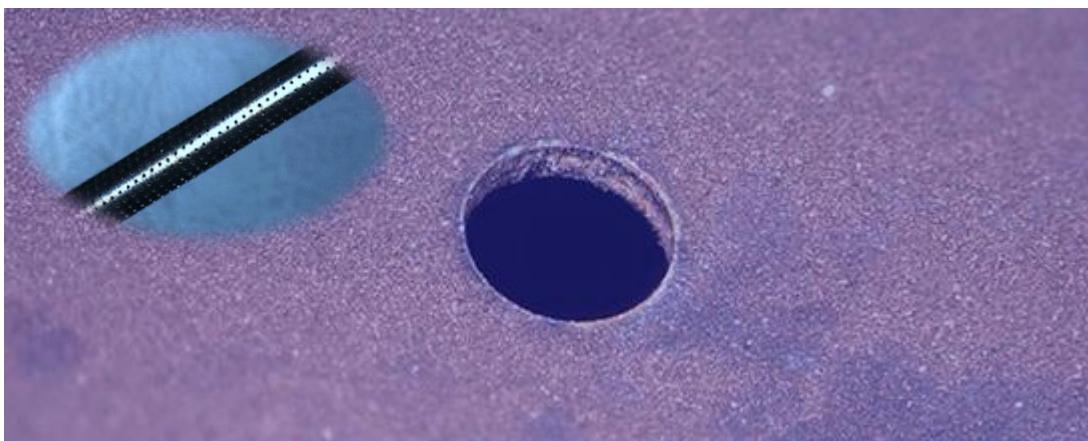


Figura 3.3.34. Micro taladrado láser de hasta 30 µm. Fuente Rofin.

La tecnología láser de Rofin permite taladrado de aceros de hasta 30 µm de diámetro.

⁴¹ Swagelok tubos de acero: <https://www.swagelok.com/es-ES/catalog/Tubing-and-Tube-Accessories/Tubing>

⁴² Micro taladrado láser: <http://www.rofin.es/es/aplicaciones-laser/microperforado-laser/#>

3.3.2.2. Cálculos

En muchas de las consultas que he realizado para comprender como se caracteriza un reactor bifásico de columna de burbujeo hacen referencia al trabajo de (Akita, et al., 1974), donde relaciona las dimensiones de la burbuja inicial del gas (recordemos que a medida que se va produciendo transferencia de masa de la burbuja al líquido, las dimensiones de esta se van reduciendo), el área de la interfase y el coeficiente de transferencia de masa. Para los cálculos, me he basado en este trabajo.

Según los datos obtenidos experimentalmente por (Akita, et al., 1974 p. 86), el tamaño inicial de las burbujas no depende de las propiedades del sistema, como la tensión superficial, viscosidad del líquido o la densidad del gas. Los únicos factores que afectan al diámetro inicial de la burbuja (y en consecuencia al volumen y la superficie de esta) son el diámetro del orificio d_o , y la velocidad del gas a través del orificio u_o . cómo se indica en la siguiente ecuación:

$$\frac{d_{vs}^*}{d_o} = 1.88 \cdot \left(\frac{u_o}{\sqrt{g \cdot d_o}} \right)^{1/3} \quad (3.3.21)$$

donde:

d_{vs}^* : diámetro inicial de la burbuja.

d_o : diámetro del orificio.

u_o : velocidad a la salida del orificio.

g : aceleración de la gravedad.

Para controlar el tamaño inicial de la burbuja, los parámetros de diseño que afectan a la disolución y que vamos a poder modificar son el flujo a la salida del difusor (que afecta directamente a u_o) y el diámetro d_o , cantidad y distribución de los orificios microperforados en el difusor.

3.3.2.3. Diseño

El contactor – difusor está dividido en tres piezas principales:

- ✓ El tubo de acero de 250 mm de longitud y 6 mm de diámetro, que lleva el gas hasta el fondo de la botella.
- ✓ La base del difusor. Esta pieza sirve para unir el tubo de acero por un extremo y por el otro roscaremos el casquete.
- ✓ El casquete del difusor. Esta es la pieza por la que sale el gas en forma de burbujas. Para ello se han practicado una serie de micro taladros por láser cuyo diámetro hemos calculado en base a las simulaciones de dinámica de fluidos que veremos en el siguiente punto.

El difusor está diseñado en dos piezas para permitir el intercambio fácil y rápido del casquete por otro con otras dimensiones o distribución de taladros. Esto nos da mucha flexibilidad a la hora de hacer pruebas con distintos difusores y nos facilita la labor de limpieza del casquete. Al tratarse de orificios muy pequeños, es posible ha haya que hacer una limpieza regular de esta pieza.

En la siguiente imagen, se puede observar las piezas que forman el conjunto contactor – difusor:

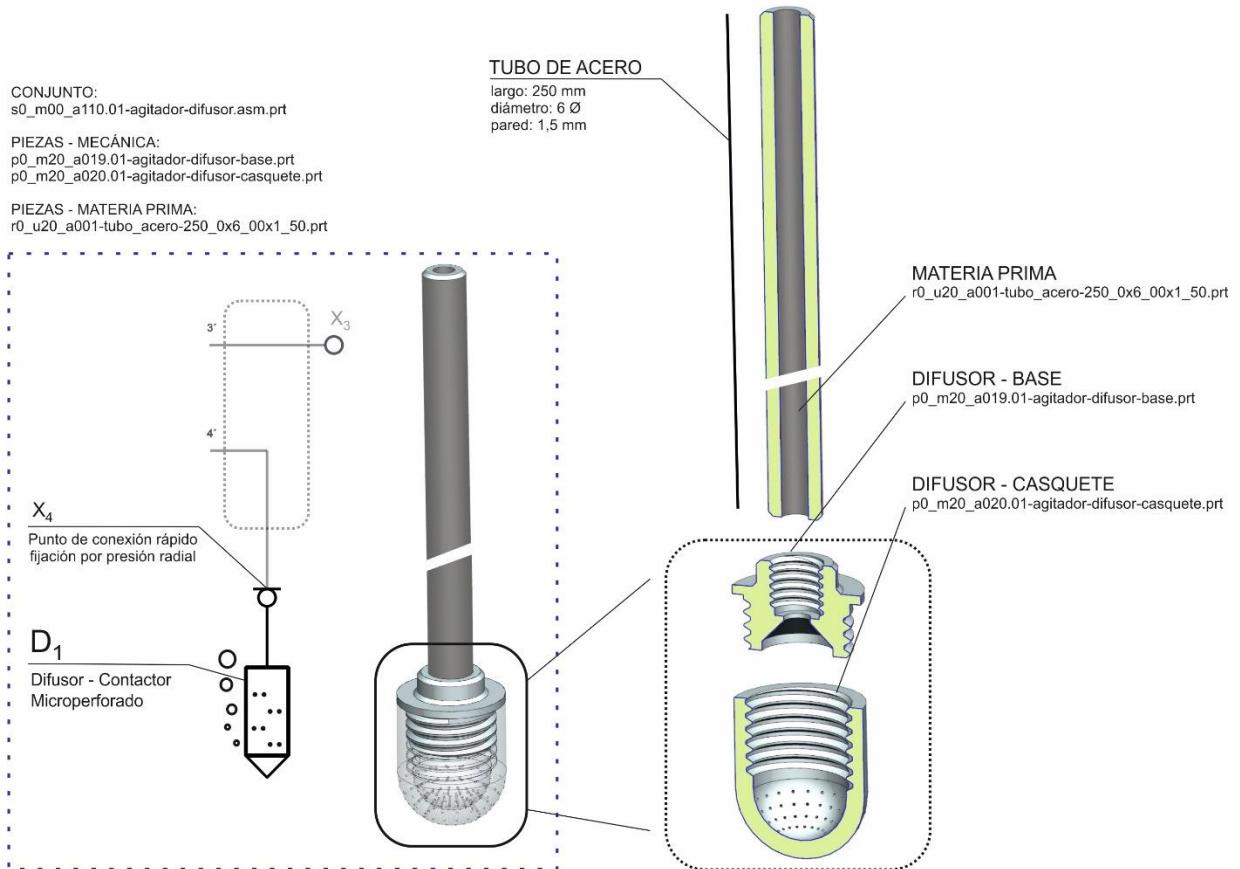


Figura 3.3.35. Contactor - Difusor. Despiece.

En la figura anterior, se puede apreciar como los taladros del casquete son radiales y con un ángulo sobre la horizontal negativo entre los -15° y -80° . Este ángulo de salida negativo impulsa el gas hacia el fondo de la botella obteniéndose una curva parabólica en la trayectoria de la burbuja que consigue dos cosas:

- El gas llega al vino situado por debajo del difusor hasta el fondo (proporcional al flujo de salida) y acentuándose para orificios con módulo de ángulo grandes.
- Conseguimos una distribución axial más homogénea del gas en todo el volumen de la botella. Es decir, tendremos burbujas más cerca de eje central (las que salgan por los orificios de mayor módulo de inclinación) y burbujas que se alejarán hacia las paredes de la botella (para las burbujas que salgan por los taladros de menor módulo de inclinación).
- El tiempo de reacción aumenta. Al ser una trayectoria parabólica el tiempo que está en contacto el gas y el vino es mayor que si las burbujas salen con un vector velocidad horizontal o positivo.

3.3.2.4. Simulación CDF

Tenemos que dimensionar los micro taladros en el difusor, para ello tenemos que modelar la columna de burbujeo y el difusor y aplicar un modelo de simulación de fluidos computacional válido para sistema.

Algunos de los trabajos que he utilizado como referencia y que podemos encontrar en el repositorio del proyecto, en la carpeta de documentos de referencia³, son (Buwa, et al., 2002), (Sanyal, et al., 1999) o (D. Giavendoni, et al., 1997). En todos ellos se caracterizan y simulan columnas de burbujeo clásicas por medio de técnicas de simulación de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Gracias a la ayuda de Antonio Gómez de Nabladot orienté la simulación hacia el análisis discretizado en el modelo Lagrangiano para la resolución de esta simulación.

Existen dos formas básicas de realizar un análisis de forma discreta (a intervalos) en un campo de flujo⁴³:

- Utilizar el modelo Euleriano, la observación del movimiento se centra en lugares del espacio a través del cual fluye. Es como ver la corriente de un río sentado a la orilla.
- Utilizar el modelo Lagrangiano, en el que la observación del movimiento se centra en la trayectoria de una parcela del campo fluido. Es como ver la corriente de un río desde un bote a la deriva.

Para poder aplicar el modelo discreto a nuestra simulación, el volumen de gas con respecto al líquido no puede ser superior al 10-12% (Fluent, 2001 págs. 19-3). Como sabemos que el volumen de vino en una botella Bordelesa es de 75 cl y nuestro flujo máximo va a ser de 0,5 l/min:

$$v_{gas} = q_{max} \cdot t_{max} = 0,833 \text{ cl/seg} \cdot 9 \text{ seg} = 7,5 \text{ cl} \quad (3.3.22)$$

$$\frac{v_{gas}}{v_{líquido}} * 100 \leq 12 \rightarrow \frac{7,5}{75} \cdot 100 = 10\% < 12\%$$

donde:

v_{gas} : volumen del gas.

q_{max} : caudal máximo. $q_{max} = 0,5 \text{ l/min} = 0,833 \text{ cl/seg}$

t_{max} : Tiempo máximo que está el gas en el líquido. $t_{max} = 9 \text{ seg}$

$v_{líquido}$: volumen del líquido.

Por lo que podemos concluir que en las peores condiciones nuestro sistema cumple con la limitación y por lo tanto se puede aplicar el modelo discreto.

Este modelo nos permite obtener las líneas de flujo dentro del campo de simulación computacional por lo que podremos inyectar partículas de gas en este domino y ver cómo se

⁴³ Modelo Lagrangiano o Euleriano:

https://es.wikipedia.org/wiki/Especificaci%C3%B3n_lagrangiana_y_euleriana_del_campo_de_flujo

comportan. Como veremos más adelante, inyectaremos burbujas de distintos tamaños y analizaremos sus trayectorias a lo largo del tipo.

El ejemplo en el que me he basado para esta simulación es el tutorial C7 del manual (FloEFD, 2018 pág. 241)

En la carpeta de simulaciones³⁵, se encuentran todos los archivos e informes completos de los resultados.

Simplificación del modelo

El primer paso para la simulación es simplificar el modelo como vemos en la siguiente imagen.

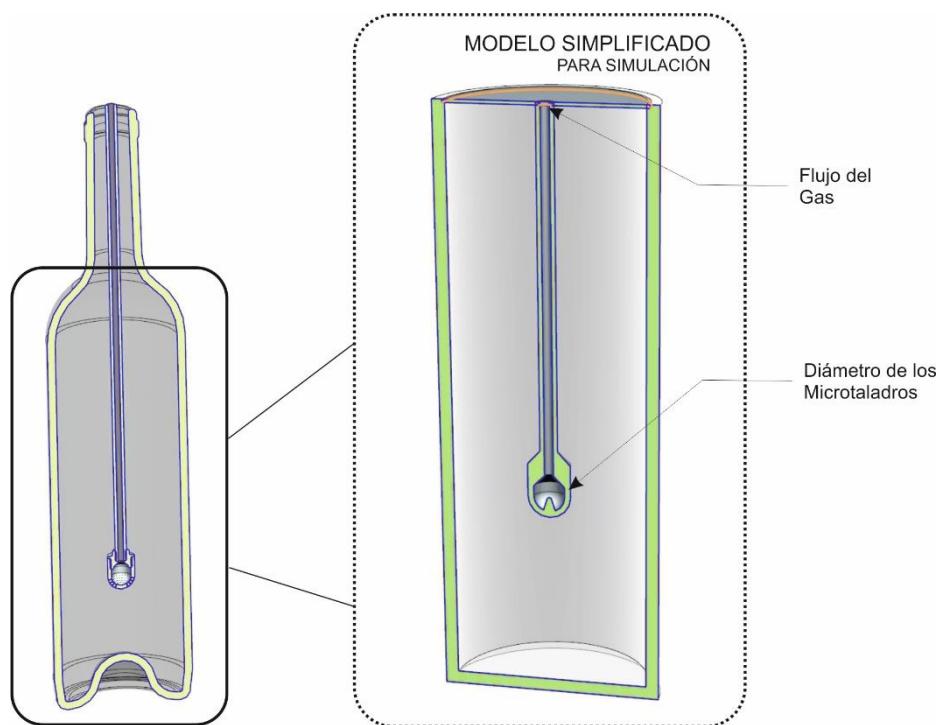


Figura 3.3.36. Difusor. Simulación. Modelo simplificado.

En este caso, vamos a simular cómo se comportan las partículas de gas (las burbujas) en función del flujo de entrada y el diámetro de los micro taladros (muestro las dos variables de entrada en la figura anterior). Para ello deberemos modelar el espacio entre el difusor y las paredes de la columna de burbujeo (la botella).

Configuración general

Realizaremos un análisis de tipo interior por lo debemos cerrar la parte superior de la botella para generar un dominio computacional finito. Ver imagen siguiente a la izquierda.

Tendremos en cuenta la gravedad y excluiremos el análisis las cavidades son condiciones de flujo como el interior del difusor.

Utilizaremos dióxido de carbono (gas real) como elemento gaseoso y agua como fase líquida en un régimen de flujo laminar y turbulento. No contemplaremos posible cavitación en nuestra simulación.

Para simplificar, consideraremos paredes adiabáticas, no hay intercambio de calor entre la mezcla y el exterior y consideraremos que la reacción es isotérmica. Ver simplificaciones adoptadas en el punto 2.5 más atrás.

Haremos uso de la tabla de rugosidades del anexo A2.2. y estableceremos una rugosidad $1\mu\text{m}$ en el acabado superficial de las paredes de la botella. Esta baja rugosidad es típica de los cristales pulidos.

Las condiciones iniciales de presión y temperatura, según el estándar NIST para la definición de condiciones normalizadas de uso en termodinámica³³, a 1 atm y $20,05^\circ\text{C}$ respectivamente.

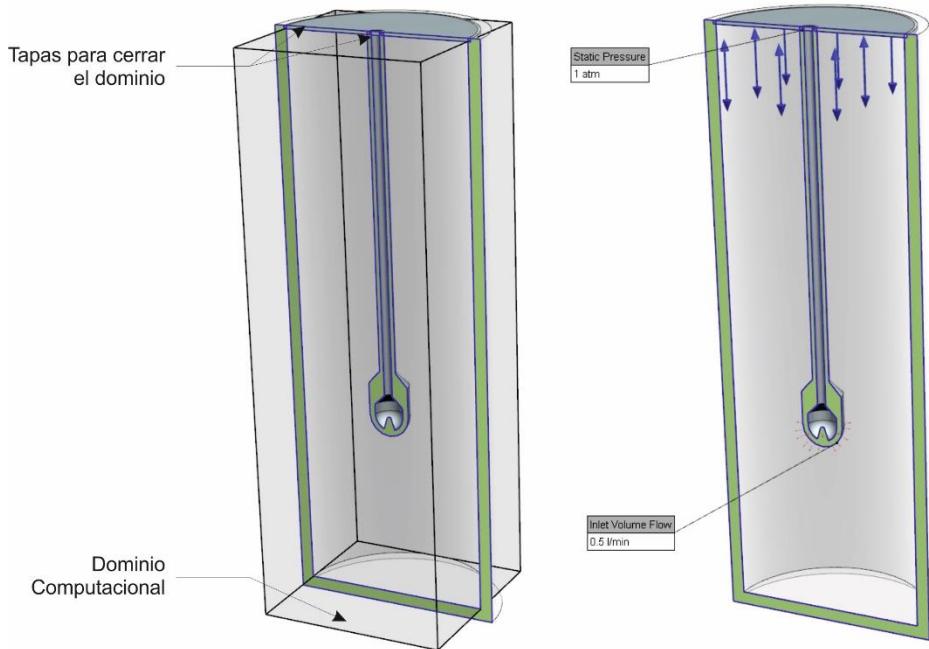


Figura 3.3.37. Difusor. Simulación. Dominio computacional y condiciones de contorno.

Condiciones de contorno y objetivos

Indicaremos al sistema las condiciones de contorno como vemos en la imagen anterior a la derecha:

- ✓ Presión ambiente de 1 atm, recordemos que la botella no queda cerrada por arriba cuando introducimos el agitador.
- ✓ A la salida del difusor indicaremos un flujo de entre 0,1 l/min a 0,5 l/min. Que es el rango de flujo que gas que ajustaremos a la salida del inyector.

También estableceremos los objetivos de convergencia de la simulación:

- ✓ La velocidad y la presión de entrada al dominio computacional. Es lo mismo que la presión y velocidad a la salida por los taladros del difusor.
- ✓ La velocidad a la salida del dominio. Esto es cuando acaba el líquido y el gas sobrante (no diluido) escapa al ambiente.

Con estos datos, ya podemos lanzar la simulación y obtener los resultados para las condiciones de contorno indicadas.

Estudio paramétrico de velocidad a la salida del difusor

Queremos ver como varia la trayectoria de la burbuja al variar el flujo y el diámetro del orificio, pero si nos fijamos en la fórmula (3.3.21) de la página 84, tenemos que calcular la velocidad a la salida del difusor.

La forma que he elegido es hacer el cálculo por métodos numéricos con un estudio paramétrico de nuestro difusor utilizando una sola variable de entrada (el flujo), discretizada en 5 valores y observar el valor de velocidad convergente a la salida.

El escenario y los resultados obtenidos se pueden apreciar en la siguiente tabla y figura:

	Puntos de Diseño				
	1	2	3	4	5
flujo [l/min]	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
velocidad [mm/s]	5,45	10,91	16,36	21,81	27,27

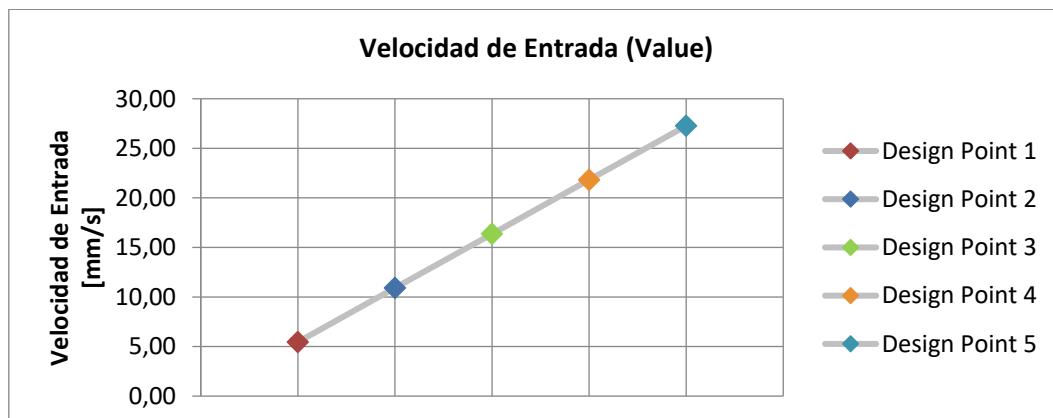


Figura 3.3.38. Difusor. Simulación. Velocidad de salida del difusor.

En la gráfica se aprecia claramente como la velocidad de salida del difusor (entrada al dominio de computación) es lineal y proporcional al flujo.

En las siguientes figuras podemos ver los resultados.

Velocidad de flujo

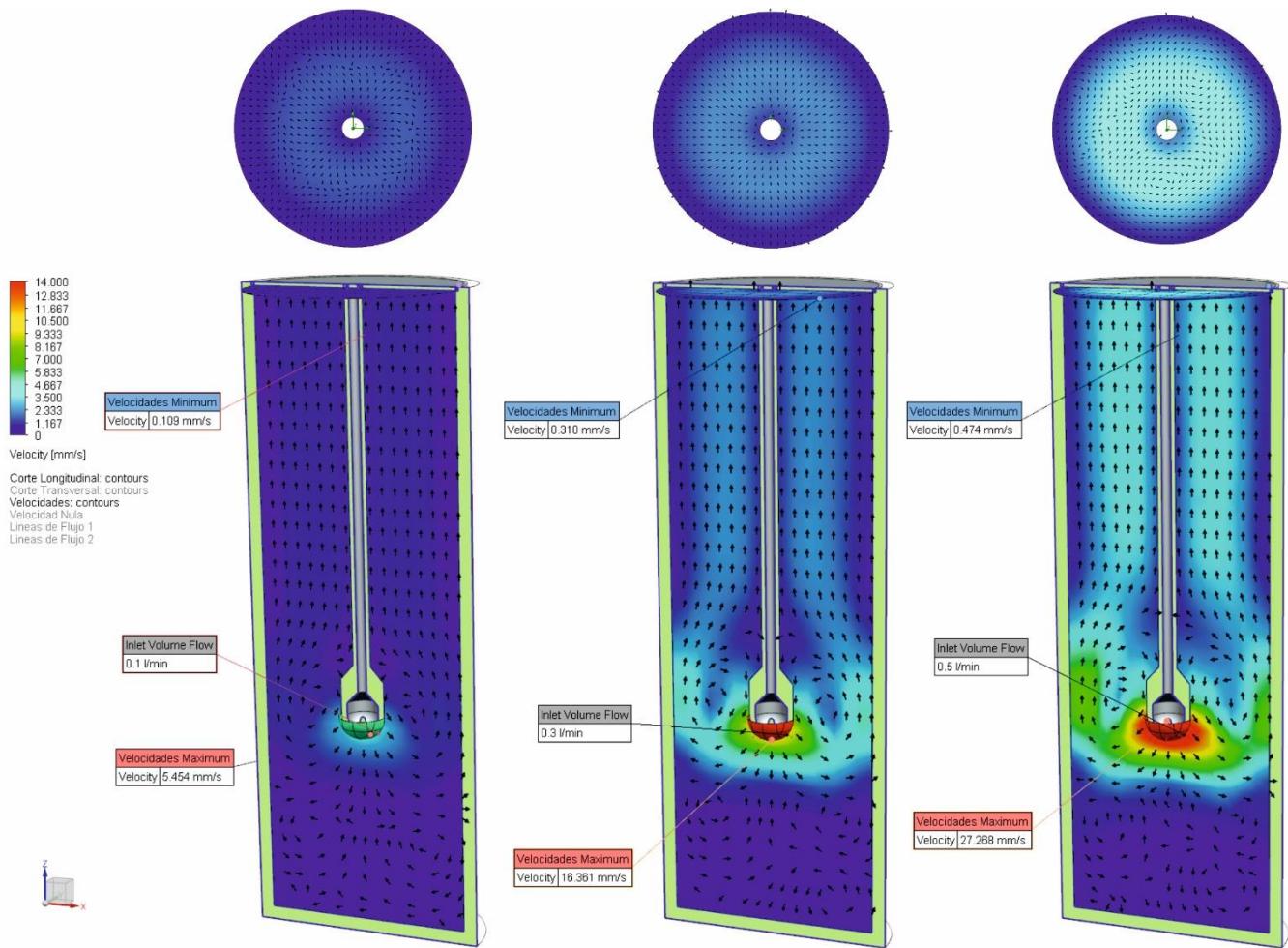


Figura 3.3.39. Resultados de velocidad.

Para un flujo de 0,1, 0,3 y 0,5 l/min.

En esta gráfica, podemos ver los resultados de velocidad dentro del dominio computacional para tres flujos distintos.

Podemos ver un corte longitudinal (parte inferior) y otro transversal (parte superior) conservando la misma escala para las tres simulaciones. Me ha parecido interesante mostrar sobre la velocidad (magnitud coloreada) la dirección de esta por medio de unos pequeños vectores que nos indican la dirección del flujo.

En el corte transversal se observa claramente como la velocidad es menor en las paredes de la botella y en el tubo del difusor debido al rozamiento con estas.

En el corte transversal observamos una zona de rebufo o recirculación en los laterales del difusor que se acentúa con el aumento de flujo. Esta zona de “lavadora” puede resultar interesante para intensificar la reacción química en el vino

Líneas de flujo

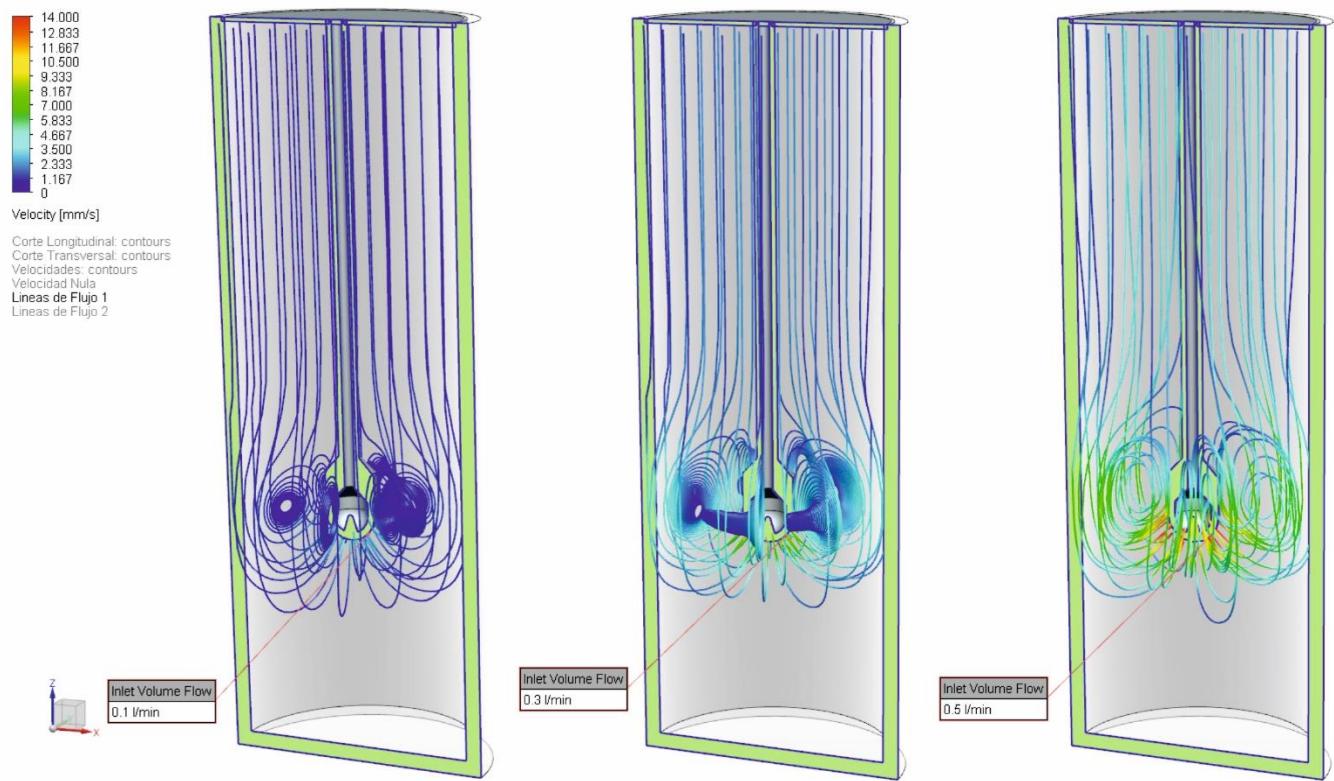
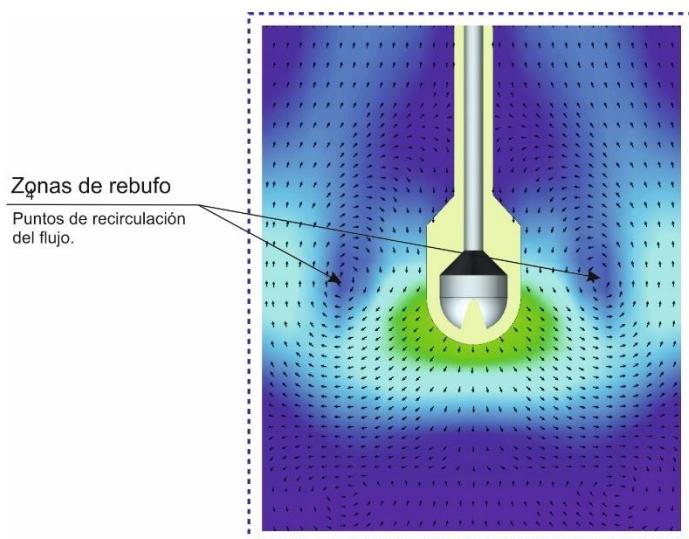


Figura 3.3.40. Líneas de flujo. Para un flujo de 0,1, 0,3 y 0,5 l/min.

En estas gráficas, muestro las líneas de flujo en el dominio computacional para 3 requerimientos de flujo a la salida del difusor.



Me ha parecido interesante mostrar este detalle donde se observa claramente como aparece un anillo de recirculación alrededor del difusor.

Esta circunstancia se aprecia con mayor claridad en la Figura 3.3.40 donde se ve como las líneas de flujo dan vueltas en espiral alrededor del difusor para escapar finalmente hacia el exterior.

Es curioso como esta recirculación se acentúa a bajas y medias velocidades mientras que en el caso de requerimiento de flujo de 0,5 l/min los rebufos disminuyen considerablemente. Esto se debe a que el flujo entra en régimen turbulento al chocar con fuerza contra las paredes.

Figura 3.3.41. Detalle, recirculación de flujo.

Cálculo del diámetro inicial de las burbujas

Con la velocidad a la salida de los orificios del difusor calculada en el apartado anterior y basándome en el estudio de (Akita, et al., 1974) y la fórmula (3.3.21) de la página 84, podemos calcular el diámetro inicial de las burbujas.

Para ello he confeccionado la siguiente tabla Excel disponible en el directorio⁴⁴ del repositorio del proyecto en la carpeta de simulaciones:

	Puntos de Diseño				
	1	2	3	4	5
Flujo [l/min]:	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
Velocidad, u_o [mm/s]:	5,45	10,91	16,36	21,81	27,27
Diámetro agujero, d_o [mm]	Diámetro inicial de la burbuja, d_{vs}^* [mm]				
0,05	0,19	0,23	0,27	0,30	0,32
0,10	0,33	0,42	0,48	0,53	0,57
0,15	0,47	0,59	0,67	0,74	0,80
0,20	0,59	0,75	0,85	0,94	1,01
0,25	0,71	0,90	1,03	1,13	1,22
0,30	0,83	1,05	1,20	1,32	1,42
0,35	0,94	1,19	1,36	1,50	1,61
0,40	1,05	1,33	1,52	1,67	1,80
0,45	1,16	1,47	1,68	1,85	1,99
0,50	1,27	1,60	1,83	2,02	2,17

Tabla 3.3.5. Tabla de resultados. Diámetro inicial de la burbuja en función del flujo y taladro.

De la fórmula (3.3.21) deducimos el diámetro inicial de la burbuja despejando d_o :

$$\frac{d_{vs}^*}{d_o} = 1.88 \cdot \left(\frac{u_o}{\sqrt{g \cdot d_o}} \right)^{1/3} \rightarrow d_{vs}^* = 1.88 \cdot d_o \cdot \left(\frac{u_o}{\sqrt{g \cdot d_o}} \right)^{1/3} \quad (3.3.23)$$

donde:

d_{vs}^* : diámetro inicial de la burbuja.

d_o : diámetro del orificio.

u_o : velocidad a la salida del orificio.

g : aceleración de la gravedad.

⁴⁴ Tamaño de la burbuja:

https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_cad/3d_simulaciones/cfd_04-difusor_1/estudio_parametrico-flujos_entrada

He hecho los cálculos para 10 diámetros de micro taladrados distintos, de 50 a 500 μm , siendo el tamaño de burbuja resaltado en la tabla el que nos ofrece la mejor distribución superficial de gas en volumen de computación.

El procedimiento para determinar el diámetro de micro taladro que nos ofrece mejor distribución del gas en la botella lo explico detalladamente en el siguiente punto.

Estudio de partículas

Tenemos los diámetros iniciales de las burbujas y el flujo (y velocidad) a la salida de los micro taladrados. Para decidir el diámetro que nos proporciona la mejor distribución de gas, he realizado un estudio de partículas.

En el campo computacional, he inyectado a la salida de los micro taladros partículas de dióxido de carbono con tres diámetros distintos (300, 500 y 1000 μm)

Hay que aclarar que el estudio de (Akita, et al., 1974) nos ofrece una fórmula para calcular el diámetro inicial de la burbuja que se ajusta a los experimentos que realizó, pero que este diámetro no es para todas las burbujas, sino que es la media probabilística de éstas. Por lo que para un flujo determinado podemos encontrarnos burbujas en un rango de tamaños y no sólo del que nos proporciona la fórmula.

Los resultados del análisis de partículas para tres flujos distintos los podemos ver en la siguiente figura:

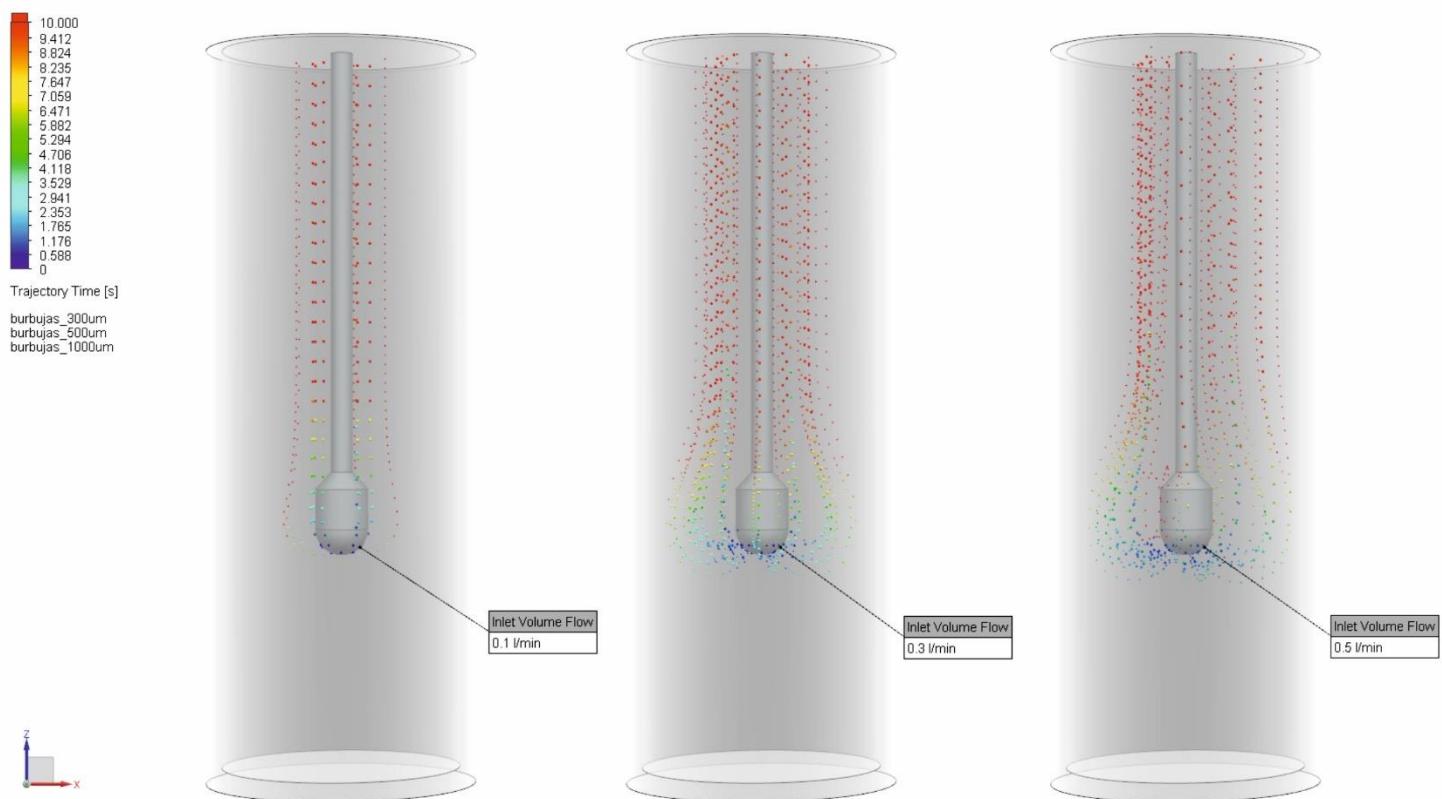


Figura 3.3.42. Análisis de partículas (burbujas). Para un flujo de 0,1, 0,3 y 0,5 l/min.

He tenido en cuenta la aceleración de la gravedad en el eje z y para las paredes he establecido como condición la absorción de las partículas, de forma que las trayectorias de las burbujas se detengan cuando entran en contacto con las paredes de la botella. Como sucede en una copa de vino espumoso, champán o cerveza.

He coloreado las burbujas con el tiempo desde el inicio de la trayectoria (tiempo de reacción).

Estadísticas de partículas

En la siguiente imagen, podemos ver el resultado del análisis estadístico de las trayectorias de las burbujas según su tamaño para un flujo de 0,5 l/min:

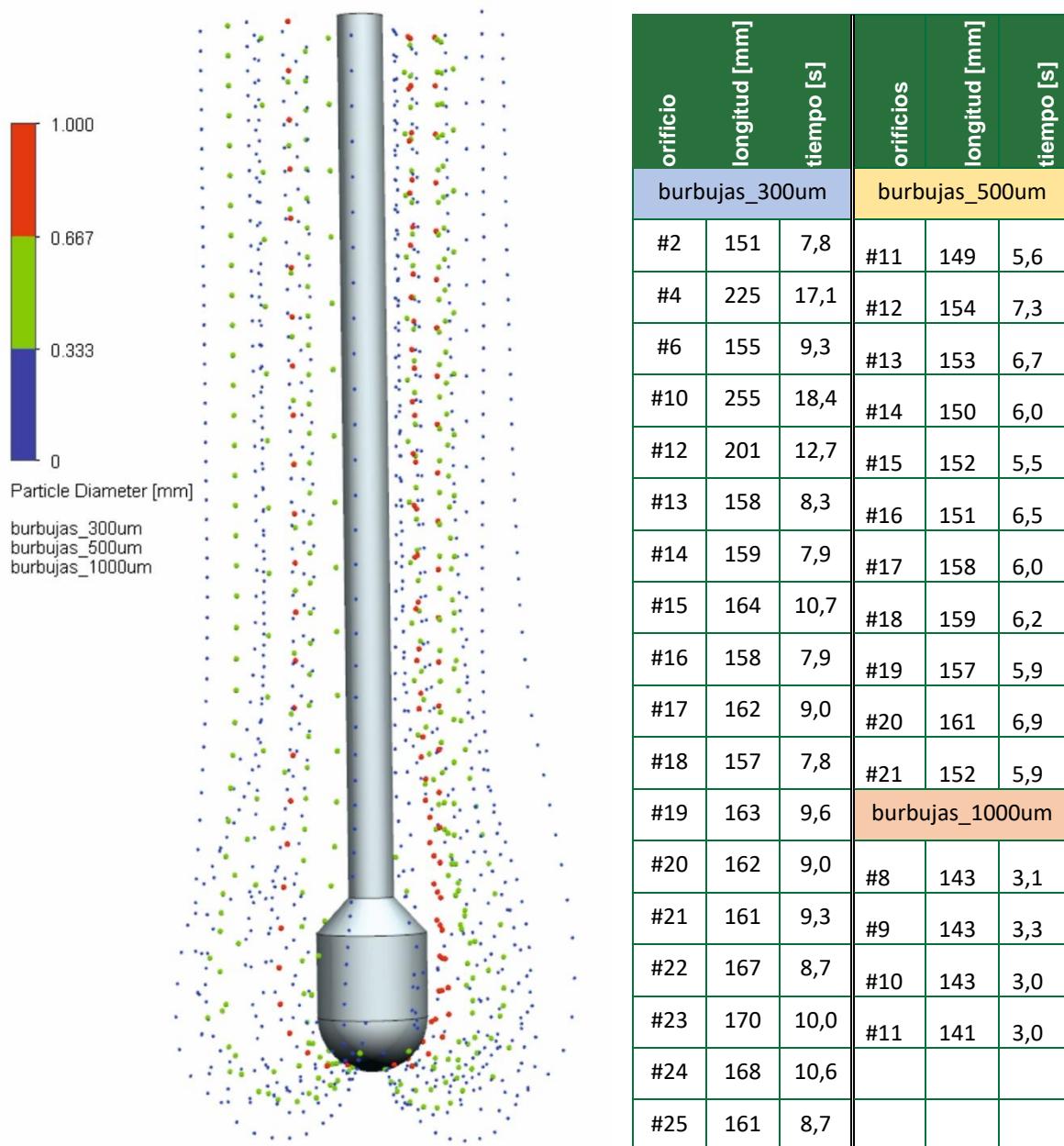


Figura 3.3.43. Análisis de partículas, estadísticas. Para burbujas de 0,3, 0,5 y 1 mm de diámetro.

Por simplicidad y claridad a la hora de mostrar los resultados, he establecido el siguiente número de trayectorias:

- Para las burbujas de 0,3 mm. 25 trayectorias
- Para las burbujas de 0,5 mm. 20 trayectorias
- Para las burbujas de 1 mm. 10 trayectorias

El número total de trayectorias podría considerarse como el número de micro taladros practicados en el difusor.

En este caso, la imagen la he coloreado según el diámetro de las partículas para diferenciarlas adecuadamente. En la tabla de la imagen anterior he insertado algunas de las trayectorias de las burbujas que dan una idea del comportamiento de las trayectorias para el mismo diámetro de burbuja.

Resultados del estudio de partículas

Con los resultados volcados por el “solver” de Mentor para análisis de fluidos, hemos obtenido la velocidad y las líneas de flujo en el dominio computacional que nos han permitido insertar las partículas (por medio de este estudio de partículas) para ver cómo se comportan las burbujas de distintos tamaños ante distintos flujos. Obtenido los siguientes resultados:

- Distribución espacial:

En un corte longitudinal, lo primero que observamos en la Figura 3.3.42, es que las burbujas no llegan al fondo para ningún caso de flujo y diámetro de burbuja. Esto es lógico ya que la densidad del dióxido de carbono es muy inferior a la del agua por lo que el empuje en el eje vertical que experimenta por la diferencia de presiones es muy alto. Observando la Tabla 2.1.2, podemos deducir que la densidad relativa del dióxido de carbono es unas 500 veces superior a la del agua:

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow \rho_{CO_2} = \frac{44,01 \text{ g/mol}}{22,26 \text{ l/mol}} = 1,977 \text{ g/l}$$

$$\rho_r = \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{CO_2}} = \frac{1000 \text{ g/l}}{1,977 \text{ g/l}} \cong 500$$

donde:

ρ : *densidad.*

m : *masa.*

V : *volumen.*

ρ_r : *densidad relativa.*

Este efecto se hace más evidente con las burbujas grandes que ascienden casi verticalmente. Las burbujas de menor tamaño describen una trayectoria más parabólica.

Este resultado nos indica que podría ser útil aumentar la longitud del tubo del difusor para que llegue al fondo.

En un corte transversal, observamos que las burbujas de mayor tamaño están más cerca del eje que las de menor tamaño para cualquier flujo. Y que a mayor flujo el campo de burbujeo se aleja del eje axial (Figura 3.3.42, flujo de 0,1 l/min) extendiéndose hacia las paredes según aumentamos el flujo (Figura 3.3.42, flujo de 0,5 l/min).

- Régimen de funcionamiento:

Estableciamos en el modelo adoptado (apartado 2.1, regímenes de flujo) que el régimen flujo deseado para nuestro inyector es el de burbujeo o borboteo, estableciendo a bajos valores de flujo los límites de esta zona.

Observamos que pese a haber zonas de recirculación de flujos (ver detalle en la Figura 3.3.41 más atrás), las partículas no quedan atrapadas en este rebuflo escapando rápidamente debido a su baja densidad respecto a la del líquido. Solamente se aprecia alguna pequeña burbuja atrapada para regímenes de flujo grandes.

Puede resultar interesante ver las animaciones del estudio de partículas donde se ven en movimiento las burbujas para distintos requerimientos de flujo. Las animaciones se encuentran en el repositorio del proyecto en el directorio simulación del difusor para los puntos de diseño 1, 3 y 5 correspondientes a los flujos de 0,1⁴⁵, 0,3⁴⁶ y 0,5⁴⁷ l/min respectivamente.

- Tiempo de reacción y longitud de trayectoria:

El análisis estadístico de las partículas nos permite calcular la longitud de trayectoria y el tiempo de reacción medio para cada tipo de partícula y el general. Con los datos de la tabla de la Figura 3.3.43, podemos calcular estos resultados:

\varnothing burbuja [μm]	Σ Longitud [mm]	Σ tiempo [s]	volumen de gas $V = 4/3 \cdot \pi \cdot r^3$
300 μm	171,93	10,16	0,014
500 μm	154,16	6,23	0,065
1000 μm	142,67	3,08	0,524
Medias Totales	156,00	6,49	0,193

Tabla 3.3.6. Tabla de resultados medios estadísticos.

Estos resultados nos sirven para asegurarnos que cumplimos con la limitación de tiempo máximo del gas en la botella para flujo máximo (limitación impuesta a 9s), que estableciamos al principio de esta simulación en la en la página 86.

⁴⁵ Animación para 0,1 l/min:

https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/blob/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_cad/3d_simulaciones/cfd_04-difusor_1/1/animation_01.avi

⁴⁶ Animación para 0,3 l/min:

https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/blob/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_cad/3d_simulaciones/cfd_04-difusor_1/2/animation_01.avi

⁴⁷ Animación para 0,5 l/min:

https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/blob/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_cad/3d_simulaciones/cfd_04-difusor_1/4/animation_4.avi

- Diámetro y número de micro taladros:

Como ya adelantábamos en la Tabla 3.3.5, el diámetro que nos proporciona la mejor distribución de gas dentro del volumen computacional de la botella es el de 0,1mm o 0,15mm.

El número de micro taladros a realizar en el difusor, lo podemos calcular dividiendo el flujo de entrada medio por el volumen de gas medio por burbuja calculado en la tabla anterior y multiplicándolo por el número de burbujas que se generan por unidad de tiempo (dato empírico aproximado):

$$n = \frac{\dot{q}}{n_b \cdot \dot{v}} \rightarrow n = \frac{0,25 \text{ l/min}}{200 \text{ burbujas/s} \cdot 0,193 \text{ mm}^3} = \frac{4167 \text{ mm}^3/\text{s}}{40 \text{ mm}^3/\text{s}} \cong 104$$

donde:

n : *número de orificios.*

\dot{q} : *caudal medio.*

\dot{v} : *volumen de burbuja medio.*

n_b : *número de burbujas por unidad de tiempo.*

Esto nos dará el número de trayectorias de burbujas más aproximado al ideal para el rango de flujos dado, obteniendo una la distribución de gas lo más homogénea posible.

3.4. Diseño de la Base

En la siguiente ilustración, podemos ver las piezas que componen la base del inyector:

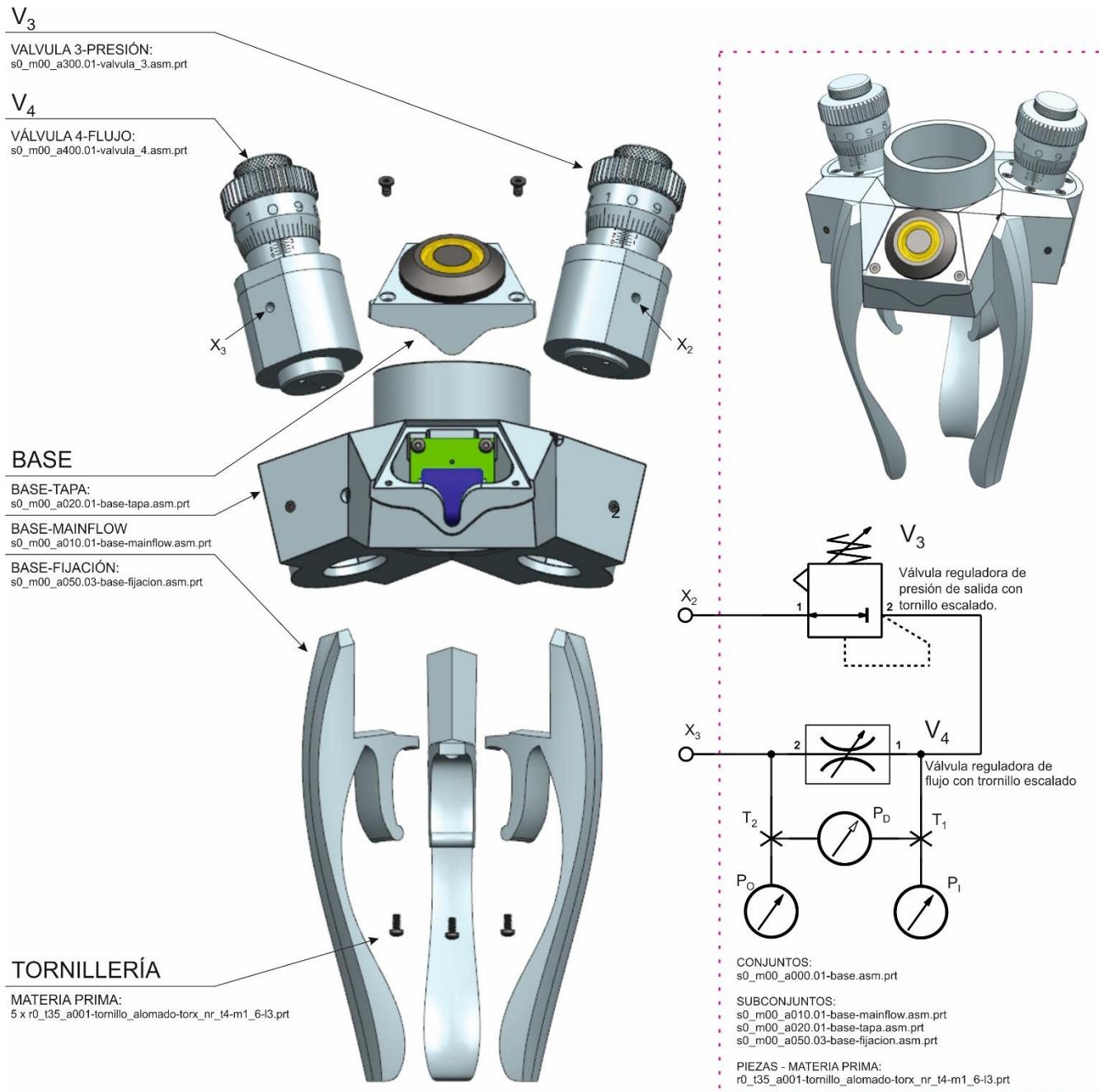


Figura 3.4.1. Base, vista de conjunto.

Como podemos observar en la figura anterior, la base está compuesta por:

- ✓ El conjunto base-mainflow.
- ✓ El conjunto base-tapa.
- ✓ El conjunto base-fijación

- ✓ Conjunto válvula 3, de control de presión.
- ✓ Conjunto válvula 4, de control de flujo.

A su vez, estos conjuntos están divididos en subconjuntos y alguna materia prima que se relacionan de manera jerárquica como podemos ver en detalle en el navegador de ensamblaje del base:

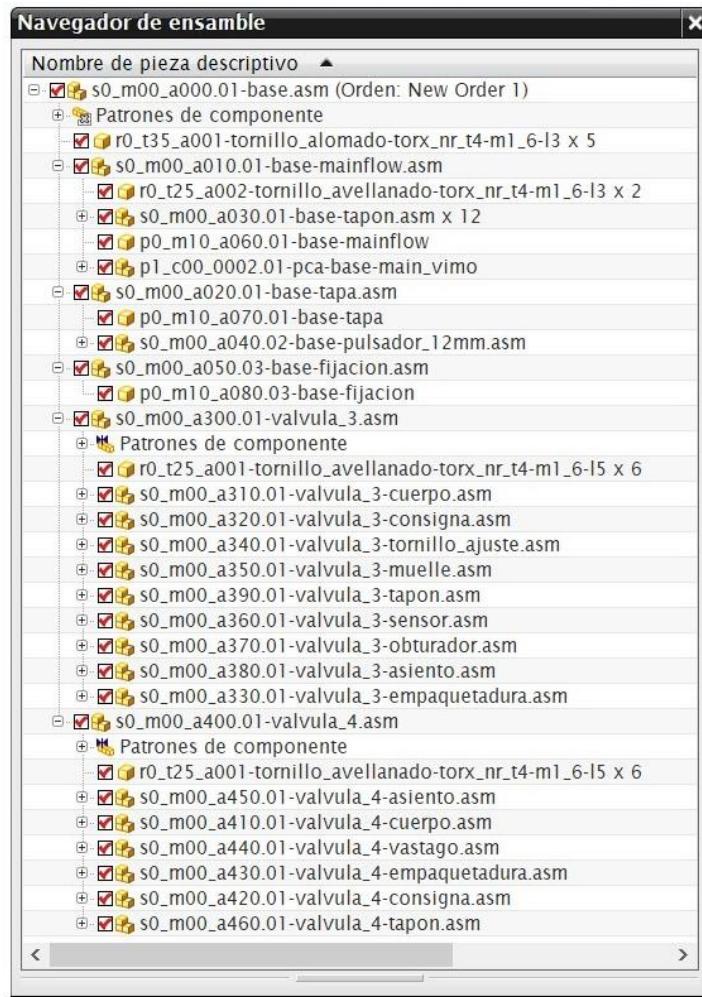


Figura 3.4.2. Base, piezas del ensamblaje.

He eliminado del navegador de ensamblaje las restricciones y las secciones.

En los siguientes puntos estudiaremos en detalle las distintas piezas (subconjuntos, piezas y materia prima) que forman la base.

3.4.2. Base - Mainflow

Esta pieza es la encargada de canalizar el gas, sustituye a los clásicos tubos, mangueras o latiguillos de conducción de fluidos. El guiado el gas por el interior de esta pieza hasta los sockets de las válvulas V₃ y V₄, se realiza mecanizando un tocho de material bruto de forma que los huecos interiores llevan el fluido hasta donde necesitemos.

Este tipo de piezas que distribuyen el flujo mediante mecanizados interiores se conocen en fluidos como “mainflows” o “mainfolds” (colectores en inglés), y suelen tener compartimentos donde se insertan (roscadas o a presión) las válvulas.

En la siguiente imagen se puede ver un ejemplo de colector de Swagelok:



Figura 3.4.3. Colector, canalización de flujos tocha. Fuente Swagelok.

Desde el agitador llega el gas por el punto de conexión x₂ que es canalizado hasta la entrada 1 de la válvula de regulación de presión de salida (válvula V₃). Al espacio donde se inserta la válvula lo vamos a denominar socket. A la salida de válvula V₃, punto 2 de esta válvula, se encuentra otra canalización para llevar el fluido hasta la entrada 1 de la siguiente válvula, válvula V₄ de regulación de flujo. Y finalmente de la salida de la válvula de regulación de flujo (punto 2 de V₄), el gas es canalizado hasta el punto de conexión x_e donde entra de nuevo al agitador. Se puede seguir el recorrido en la Figura 3.4.1 más atrás, aunque lo veremos las canalizaciones en detalle en el punto de diseño.

La mejor opción de mecanizado, para evitar pérdidas de flujo en este tipo de piezas, es el taladrado. Otro tipo de mecanizado como por ejemplo fresar dos mitades y luego unirlas con juntas, resultaría poco fiable. Así pues, he elegido taladrar el material para realizar los conductos.

Para realizar correctamente los taladros en el material, es necesario que la broca entre perpendicular a la superficie a taladrar, lo que ha supuesto un desafío en el diseño de esta pieza como explicaré en el siguiente punto.

Para cerrar las entradas de la broca, he utilizado tapones para tubo. Existen en el mercado numerosos tipos de tapones de distintas dimensiones y calidades.

Esta vez me he basado en el catálogo de "The Lee Company"⁴⁸⁴⁹ para utilizar un diseño de referencia que podemos ver en la siguiente imagen:

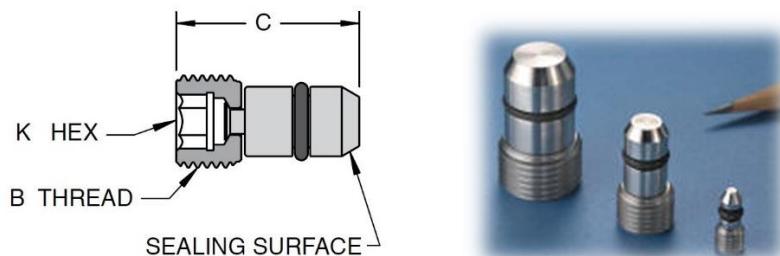


Figura 3.4.4. Tapones, para cerrar tubos. Fuente "The Lee Co".

3.4.2.1. Diseño

El diseño de esta pieza, ha sido especialmente difícil ya que para asegurar la mecanicazicón de los conductos, es necesario que la broca entre perpendicular a la cara de taladrado. Al tener que unir varios puntos internamente y de forma circular al eje central, la orientación de los planos en el plano transversal tiene que girar igualmente alrededor del eje.

Me he basado en un hexágono regular para modelar esta pieza, de manera que además de los planos OZX y OYZ ortogonales a 0° y 90° y su bisectriz a 45° , he generado planos a 15° , 30° y 60° . Todos las facetas del modelo están contenidas en estos planos.

En la siguiente imagen se puede apreciar el la planta el diseño hexagonal:

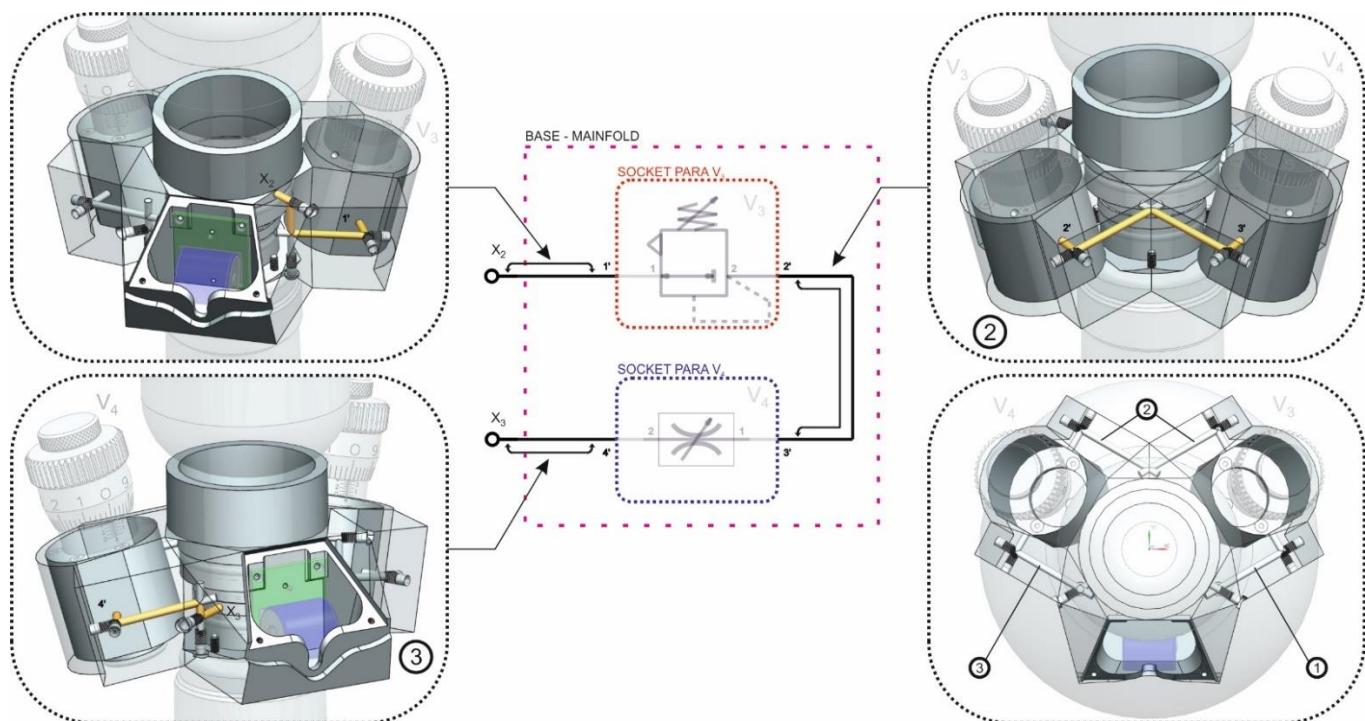


Figura 3.4.5. Base - Mainfold, canalizaciones internas. Y vista hexagonal de la planta.

⁴⁸ Tapones para tubo de The Lee Co: http://www.leeproducts.co.uk/press_release_archive_1.htm#prettyPhoto

⁴⁹ Repositorio del proyecto:

https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/tubos/

En la imagen anterior, se aprecia también que el hexágono deja tres sockets equidistantes a 120° , que aprovecho para posicionar la válvulas y la electrónica.

Para compactar el conjunto y hacer que las válvulas se acercasen al eje, la inserción de estas en el plano frontal está inclinada $\pm 15^\circ$ respecto a la vertical. En la Figura 3.4.1 más atrás se puede apreciar como la válvula V_3 tiene una inclinación de $+15^\circ$ y V_4 una inclinación de -15° respecto a la vertical.

TORNILLERÍA

MATERIA PRIMA:
2 x r0_t35_a001-tornillo_alomado-torx_nr_t4-m1_6-l3.prt

ELECTRÓNICA

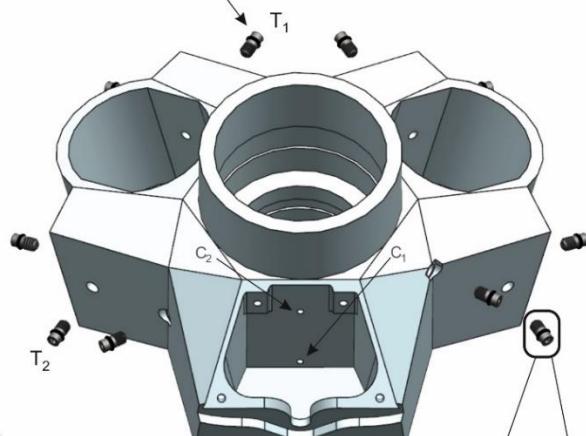
PIEZA:
p1_c00_0002.01-pca-base-main_vimo.prt

MAINFOLD

PIEZA - MECÁNICA:::
p0_m10_a060.01-base-mainflow.prt

TAPONES

SUBCONJUNTO:
12 x s0_m00_a030.01-base-tapon.asm.prt



CONJUNTOS:
s0_m00_a010.01-base-mainflow.asm.prt

SUBCONJUNTOS:
12 x s0_m00_a030.01-base-tapon.asm.prt

PIEZAS - MECÁNICA
p0_m10_a060.01-base-mainflow.prt

PIEZAS - ELECTRÓNICA
p1_c00_0002.01-pca-base-main_vimo.prt

PIEZAS - MATERIA PRIMA:
2 x r0_t35_a001-tornillo_alomado-torx_nr_t4-m1_6-l3.prt

BASE - MAINFLOW

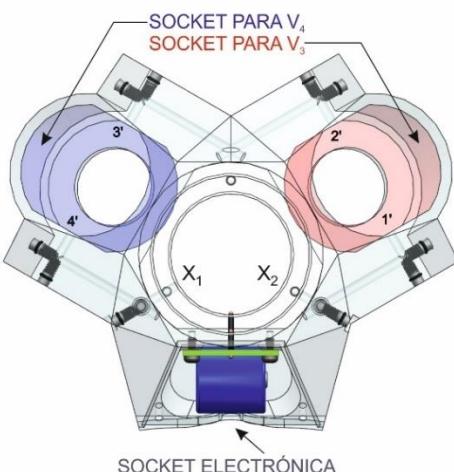
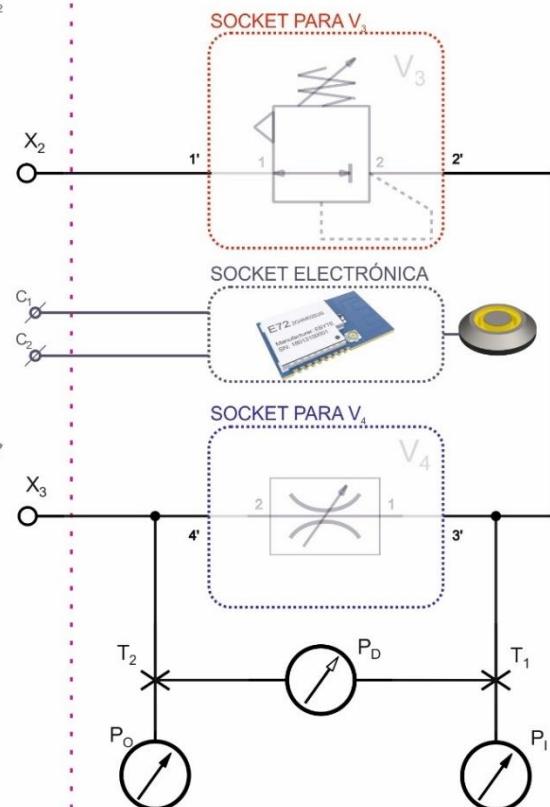


Figura 3.4.6. Base - Mainfold, piezas del ensamblaje.

Como podemos observar en la figura anterior, el colector de la base (Mainflow o Mainfold) está compuesta por:

- ✓ Pieza base-Mainflow para fresado. Recuerdo que p0_m10_[..] en la referencia del archivo, hace mención a que se trata de una pieza mecánica de fabricación por fresado. Ver nomenclatura de las referencias en el anexo A-1 donde explico la codificación utilizada durante todo el proyecto.
- ✓ Tapones. En este caso no he elegido los tapones de The Lee Co, ver la Figura 3.4.4. En su lugar he diseñado unos a medida. Se trata de un espárrago de cabeza hexagonal con una junta tórica de materia prima.
- ✓ Tornillería de fijación de la electrónica. Según catálogo.
- ✓ Electrónica principal. La electrónica principal se explicará en el siguiente punto por ser un elemento de especial interés.

Canalización interna

En la Figura 3.4.5, vista anteriormente, he tratado de explicar cómo se realiza la canalización en el interior de la base.

En la ventana 1, arriba a la izquierda, resalto la trayectoria que sigue el gas desde la zona de entrada de alta presión x_2 a donde llega el gas desde el agitador. Por una serie de taladrados, bajamos la trayectoria de gas hasta el nivel de entrada de la válvula de regulación de presión V_3 en el socket resaltado en color rojo.

En la ventana 2, resalto como canalizo la salida del socket rojo a la entrada del socket azul de la válvula de regulación de flujo V_4 . Esta canalización está al mismo nivel por lo que podemos efectuarla con dos taladros únicamente.

En la ventana 3, resalto la transferencia de gas desde la salida de V_4 , al punto de conexión x_3 con el agitador. Este trayecto ya es en baja presión.

En la figura anterior, página 102, se puede observar en el despiece que a cada entrada del taladro se rosca un tapón para hacer estanco el circuito. Alternativamente, en los tapones t_1 y t_2 se pueden conectar sensores de presión absoluta o diferenciales para medir la presión en la entrada P_i , a la salida P_o o para monitorizar el flujo mediante la presión diferencial P_d .

3.4.2.2. Electrónica principal

Pese a no ser tema de este máster, me parece interesante mencionar un poco por encima la electrónica de control del inyector, sobre todo la parte de conectorización y la parte que afecta al diseño mecánico por su volumen como la batería, el botón, etc.

Todas las búsquedas relacionadas con este tema se encuentran el directorio del repositorio de materia prima electrónica^{50 51 52 53}.

⁵⁰ https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/modulo_ble

⁵¹ https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/bateria

⁵² https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/pulsador

⁵³ https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/componentes_electronicos

En la siguiente imagen podemos ver una versión “dummy” de la pcb de control principal donde se aprecian los componentes que afectan al diseño mecánico:

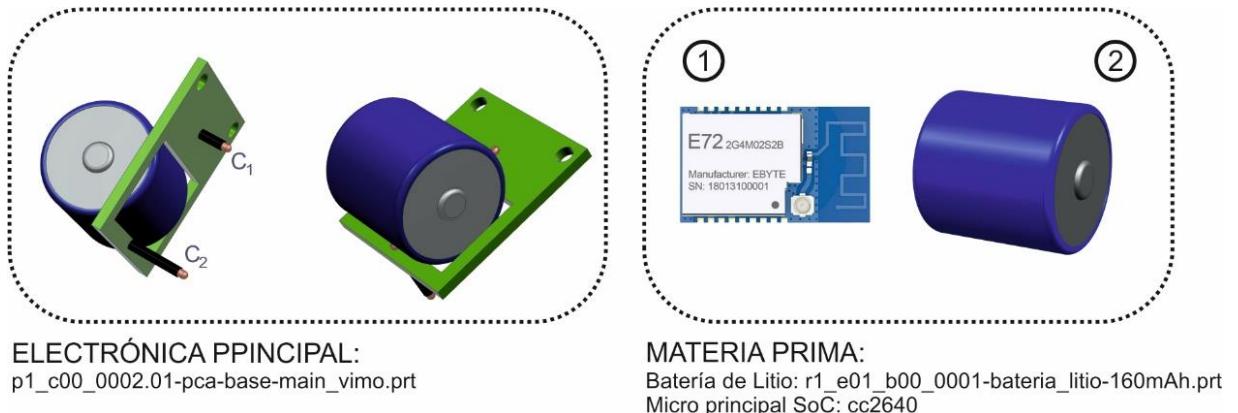


Figura 3.4.7. Electrónica principal y elementos electrónicos.

- Batería de Ion-Litio, modelo PBL8802 de Enix, ver el “datasheet” en el direcorio⁵¹, se trata de una batería de gran capacidad recargable y de pequeño tamaño.
- Para el microprocesador principal, he elegido el SoC de Texas Instruments cc2640⁵⁰ por su reducido tamaño, su bajo consumo y su módulo de radio Bluetooth Low Energy que permitiría en un futuro acceder de forma inalámbrica al inyector. Otra de las ventajas es que este módulo viene certificado y encapsulado.
- Para la conectrización, he elegido conectores de tipo “pogopin”⁵³, ver el apartado 3.3.1.3 más atrás, donde ya adelantaba el tipo de conector a utilizar y el tipo de conector.

En la siguiente imagen muestro cómo se establece el contacto entre la base y los electrodos del agitador (ver también 3.3.1.3). Los conectores pogopin tienen un muelle en su interior que hace que la punta se retraje cuando se inserta el agitador.

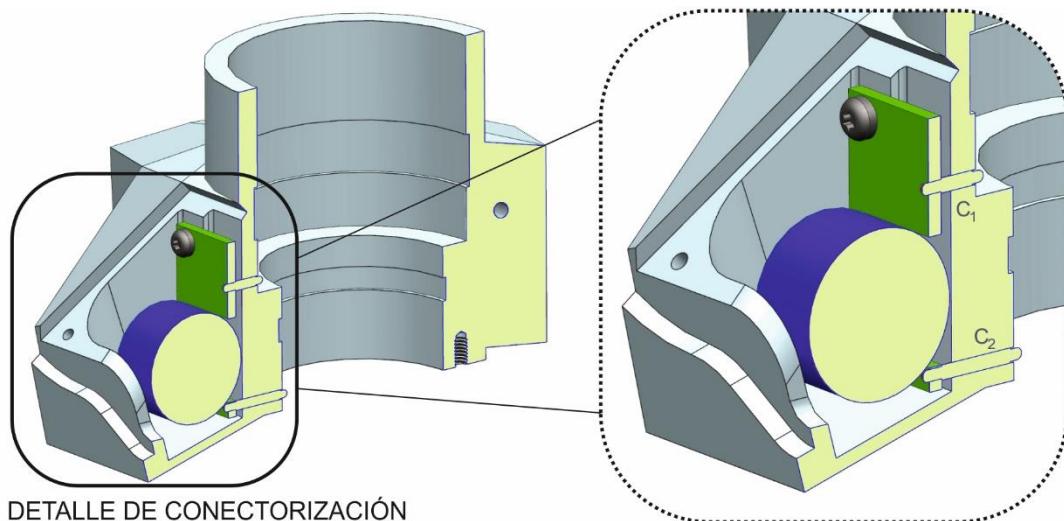


Figura 3.4.8. Electrónica principal, detalle de conectorización.

3.4.2.3. Tapa

En la siguiente imagen muestro las distintas piezas del subconjunto base-tapa donde he realizado también un despiece del pulsador:

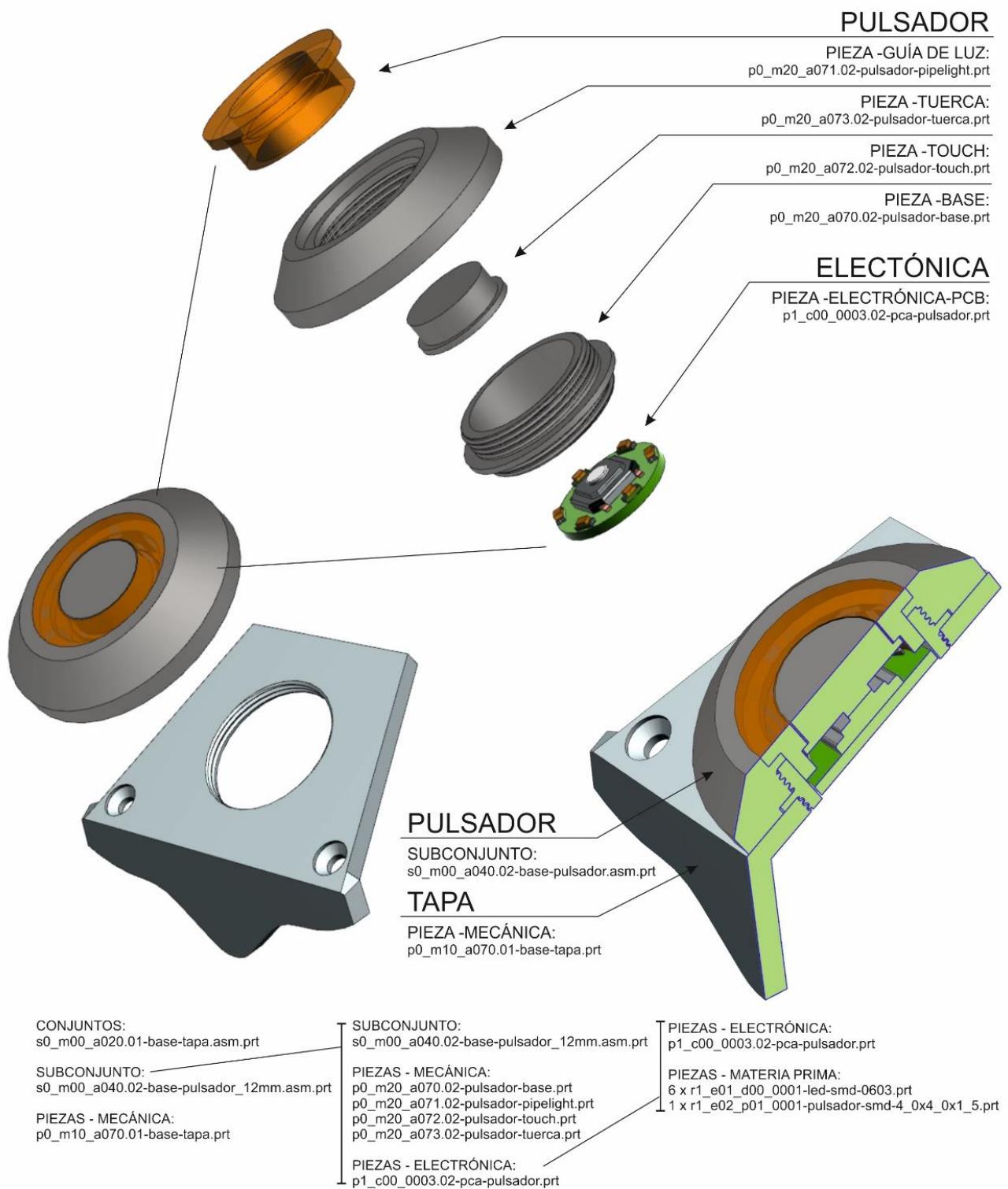


Figura 3.4.9. Tapa de la base con botón de activación.

La tapa es el elemento estructural que cierra el socket donde se inserta la electrónica de control principal y donde se sitúa el pulsador de activación del inyector. La tapa se fija por medio de dos tornillos avellanados de ranura “torx” como se aprecia en la Figura 3.4.1 de la página 98. Lo que más destaca de esta pieza es su botón que detallamos a continuación.

Botón paramétrico

Existen en el mercado gran cantidad de pulsadores de distintas calidades, formas y tamaños⁵² pero no he encontrado un botón de bajo perfil que se adapte a nuestro inyector, por lo que al final decidí modelarlo a medida.

En esta ocasión me pareció interesante realizar un modelo con un ensamblaje paramétrico de manera que modificando el diámetro del pulsador tipo botón se adaptaran todas las piezas del ensamblaje al nuevo diámetro. Para ello establecí relaciones paramétricas entre las distintas piezas del pulsador.

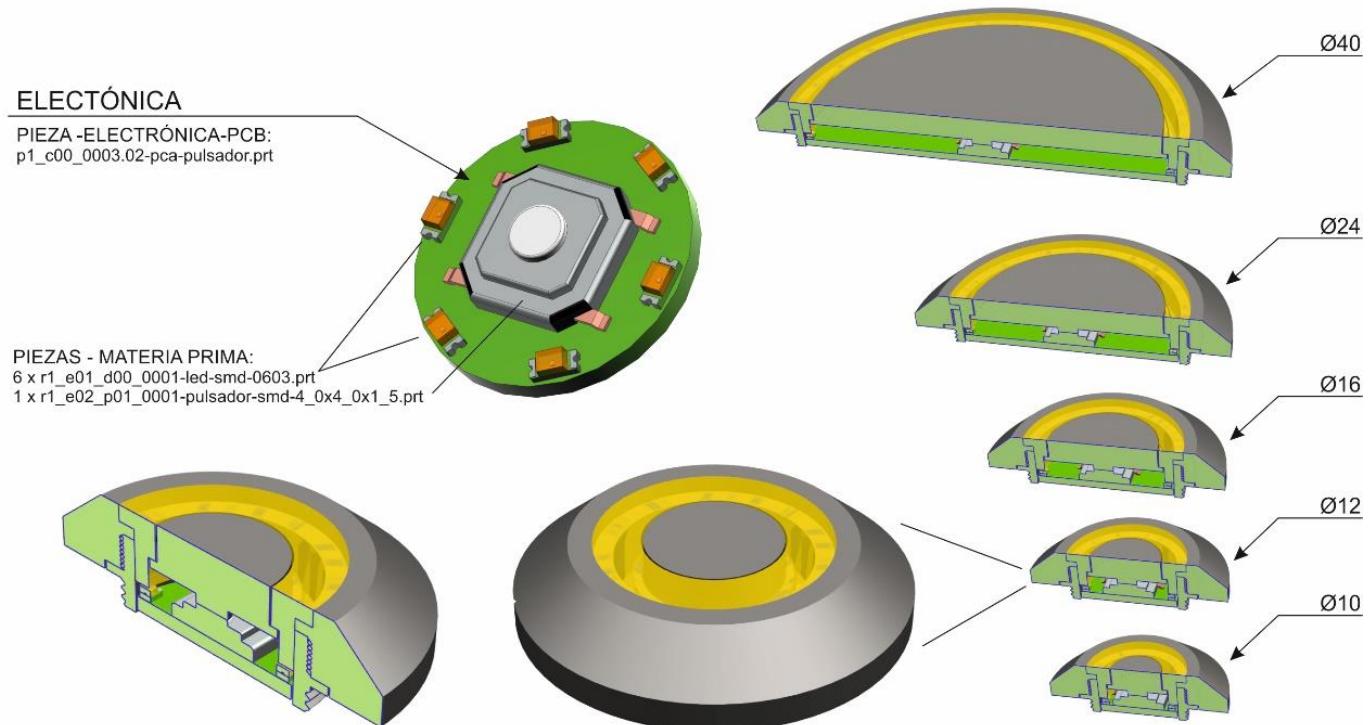


Figura 3.4.10. Botón. Modelo de ensamblaje paramétrico.

En la figura anterior, muestro distintos modelos del pulsador para varios diámetros de pulsador estándar. El diámetro que mejor se acomoda a nuestro diseño es el ø12 mm.

En la figura, también muestro el diseño de un circuito impreso (“printed circuit board, pcb” en inglés) “dummy” donde sólo muestro los componentes electrónicos limitantes con el diseño mecánico del pulsador tipo botón. El trazado de las pistas y diseño de la pcb quedan fuera del ámbito de este proyecto.

3.4.3. Base – Fijación

Esta pieza es en sí misma una cánula de centrado y fijación de la base a la botella. Facilita la inserción del agitador a la vez que mantiene la base fuertemente anclada a la garganta de la botella. Ver las instrucciones de montaje en la Figura 3.1.2 de la página 47.

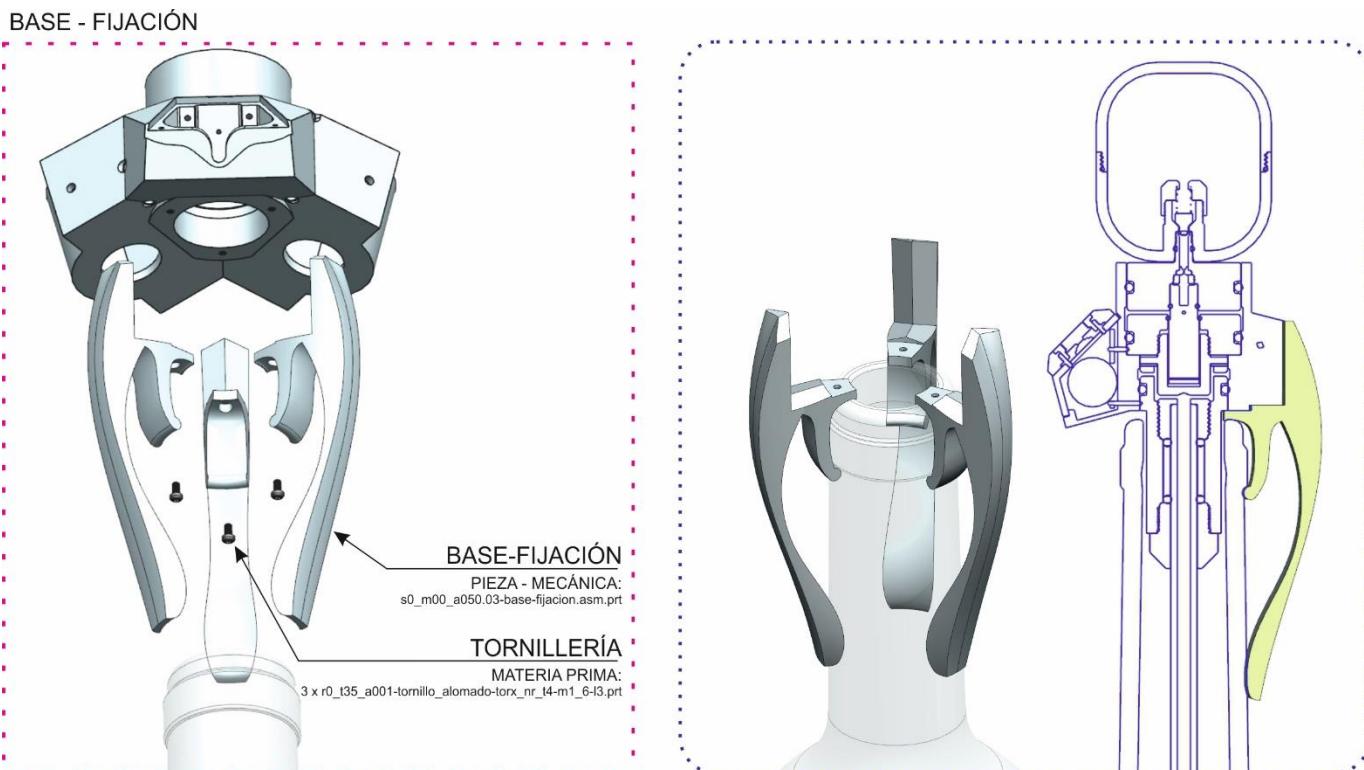


Figura 3.4.11. Fijación de la base. Montaje.

La cánula de centrado se fija a la base por medio de tres tornillos de cabeza alomada y ranura “torx” como se aprecia en la figura anterior. El conjunto base y fijación se acoplan al cuello de la botella de tipo Bordelesa de 28 mm de diámetro haciendo “click”, en la ranura exterior de la boquilla. Se puede apreciar la fijación en la figura anterior a la derecha.

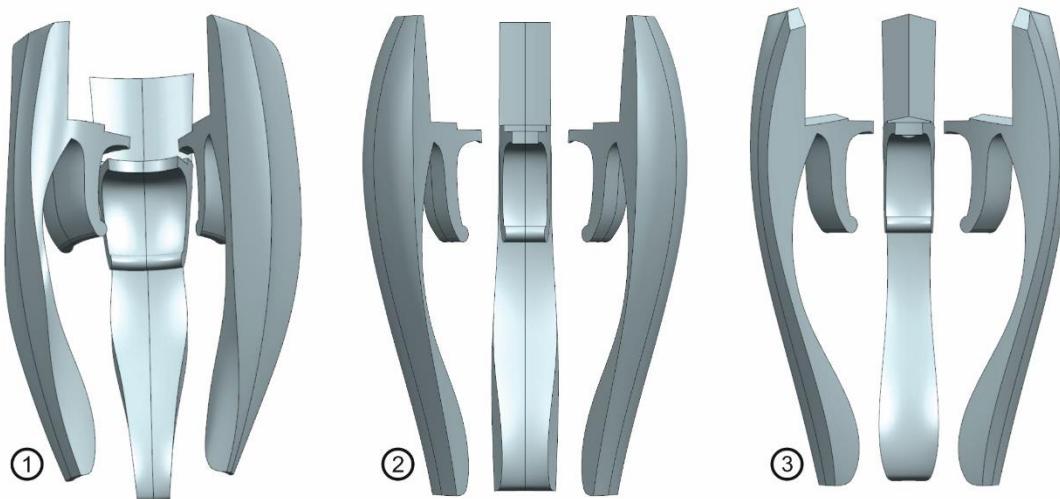
Modelado por superficies

Para el diseño de esta pieza he utilizado las potentes herramientas de modelado por superficies del software de Siemens PLM NX con el que he realizado este proyecto.

He echado en falta el módulo “3D Shape” no disponible con la licencia para estudiantes proporcionada. Con más trabajo y utilizando superficies he realizado varios diseños como los que podemos ver en la siguiente imagen:

- ✓ s0_m00_a050.01-base-fijacion.asm.prt. Modelo de mayor superficie con una mayor presión en el cuello de la botella.
- ✓ s0_m00_a050.02-base-fijacion.asm.prt. Modelo de base rectangular con apriete intermedio.
- ✓ s0_m00_a050.03-base-fijacion.asm.prt. Modelo final elegido con mejor estética.

Los modelos obtenidos se pueden encontrar en el directorio de piezas del diseño⁵⁴, nótese que el prefijo .01 .02 y .03 en la referencia del archivo, hacen referencia a la versión.



DISTINTOS DISEÑOS DE FIJACIÓN:
 1 - s0_m00_a050.01-base-fijacion.asm.prt
 2 - s0_m00_a050.02-base-fijacion.asm.prt
 3 - s0_m00_a050.03-base-fijacion.asm.prt

Figura 3.4.12.

Tres tipos de fijación de la base. Modelado por superficies.

3.4.4. Base - Válvula 3, reguladora de presión

El diseño de esta pieza es el más complejo de todo el proyecto por su elevado número de piezas y su precisión.

El referente para el diseño ha sido de nuevo Swagelok⁵⁵ y sus fantásticos manuales que explican el funcionamiento de las válvulas con todo tipo de detalles.

Una válvula reguladora de presión se encarga de mantener una presión de salida constante para variaciones no deseadas de la presión de entrada. Para ello, disponen de un elemento sensor que puede ser un diafragma o un pistón en el que a un lado tienen una fuerza de carga F_s ejercida por un muelle que establece la consigna y en el otro lado tiene la fuerza ejercida por el fluido que circula F . Ver siguiente figura donde se explica el funcionamiento.

Existen dos tipos básicos de reguladores de presión:

- Reguladores reductores de presión también conocidos como reguladores de presión de salida. En el que la presión de entrada es reducida y mantenida lo más constante posible ante cambios de presión y caudal de entrada. Esto se consigue cuando la fuerza del fluido F , es igual o ligeramente menor a la fuerza de carga F_s establecida en la consigna. En este momento el obturador está abierto. Figura de la izquierda.
- Reguladores de contrapresión o reguladores de presión de entrada. Cuya misión es mantener la presión de entrada por debajo de la presión de consigna abriendo el obturador

⁵⁴ https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_cad/3d_device/3d_mec_prt

⁵⁵ Catálogos de Swagelok:

https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/micro_valvulas/swagelok.com

cuando la presión en la estrada ejercida por el flujo F es mayor que la de consigna F_s y cerrando el paso cuando F es menor que F_s .

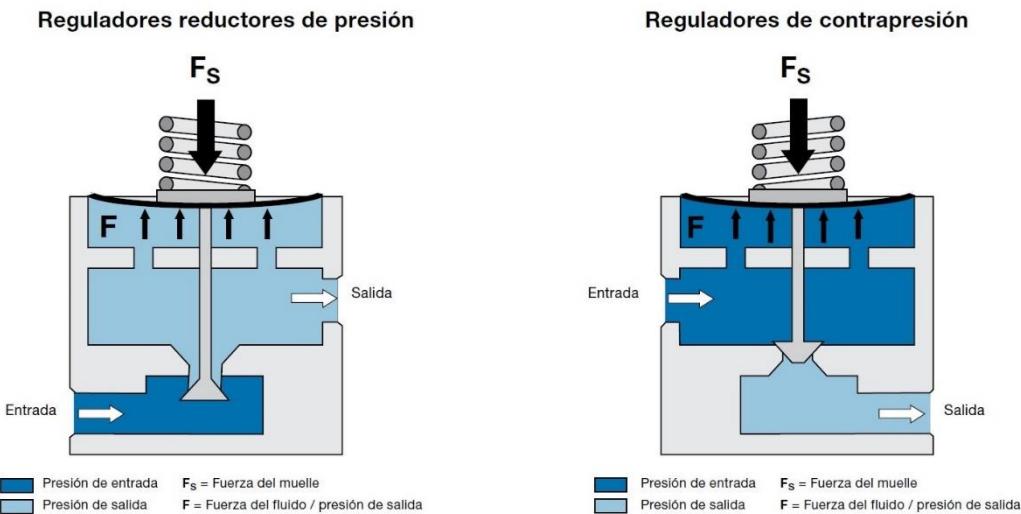
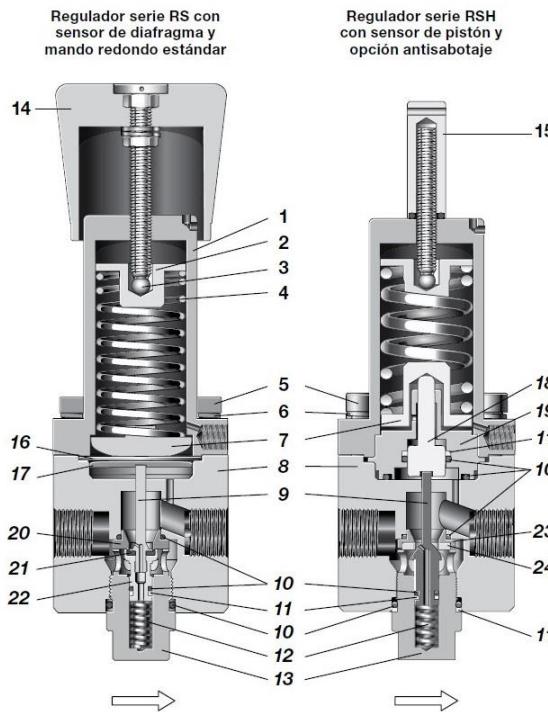


Figura 3.4.13. Tipos de reguladores de presión. Fuente Swagelok.

En nuestro caso, tenemos que mantener constante la presión a la salida de V3 ante distintos requerimientos de flujo y ante posibles variaciones de la presión de entrada por lo que nuestra válvula reguladora de presión será reductora o de regulación de presión de salida.

Materiales de construcción



	Componente	Material / Especificación
Componentes comunes	1 Carcasa del muelle	Acero inox. 316L / A479
	2 Guía del muelle	
	3 Bola	Acero inox. 420 (Endurecido)
	4 Muelle de regulación	Acero inox. 302 / A313
	5 Tornillo de la carcasa	A4-80
	6 Anillo del tornillo de la carcasa	A4
	7 Guía inferior del muelle	Acero inox. 316L / A479
	8 Cuerpo	
Actuación	9 Obturador	Acero inox. 316L / A479
		Acero inox. S17400 / A276 o Acero inox. 431
	10 Juntas tóricas	EPDM, FKM o nitrilo
	11 Anillo soporte	PTFE
	12 Muelle del obturador	Acero inox. 302 / A313
	13 Tapón del cuerpo	Acero inox. 316L / A479
Mecanismo sensor	14 Conjunto del mando redondo con tornillo de ajuste, tuercas, arandelas	ABS rojo con A2-70
RS solo	15 Opción antisabotaje con junta tórica, tornillo de fijación	Acero inox. 316L y A2-70 (Misma junta tórica que ítem 10)
Solo diafragma		
	16 Diafragma	EPDM, FKM o nitrilo
	17 Placa del diafragma	Acero inox. 316L / A479
Solo pistón		
	18 Pistón	
	19 Placa del pistón	Acero inox. 316L / A479
	20 Asiento	
	21 Cierre del asiento	EPDM, FKM o nitrilo
	22 Carcasa del obturador	Acero inox. 316L / A479
	23 Asiento	
	24 Cierre del asiento	PEEK o PCTFE

Lubricante húmedo: Con base de silicona y con base de hidrocarburo sintético

Figura 3.4.14.

Reguladores de presión, sensor a muelle. Fuente Swagelok.

Nuestro tipo de sensor va a ser de diafragma o de membrana porque son los más adecuados para el rango de presiones de nuestro inyector.

He utilizado como válvula de referencia las series RS(H)4, RS(H)6 y RS(H)8 de reguladores de presión de salida con sensor de muelle del fabricante Swagelok. En la página anterior podemos ver esta serie.

3.4.4.2. Cálculos

Para dimensionar nuestro muelle, utilizaremos siguiente fórmula:

$$[Fs]_{max} \leq [F]_{max} \rightarrow l_{max} \cdot R \leq P_{max} \cdot A \quad (3.4.1)$$

donde:

$[Fs]_{max}$: fuerza de consigna o de carga ejercida por el muelle.

$[F]_{max}$: fuerza ejercida por la presión del flujo.

l_{max} : compresión máxima del muelle.

R : constante del muelle.

P_{max} : presión máxima del flujo.

A : área del sensor.

3.4.4.3. Diseño

La válvula 3 se inserta en el socket situado a la derecha de la base. A este socket le llega desde el agitador el gas proveniente de la bombona. En la siguiente imagen podemos observar la posición correcta de la válvula de regulación de presión:

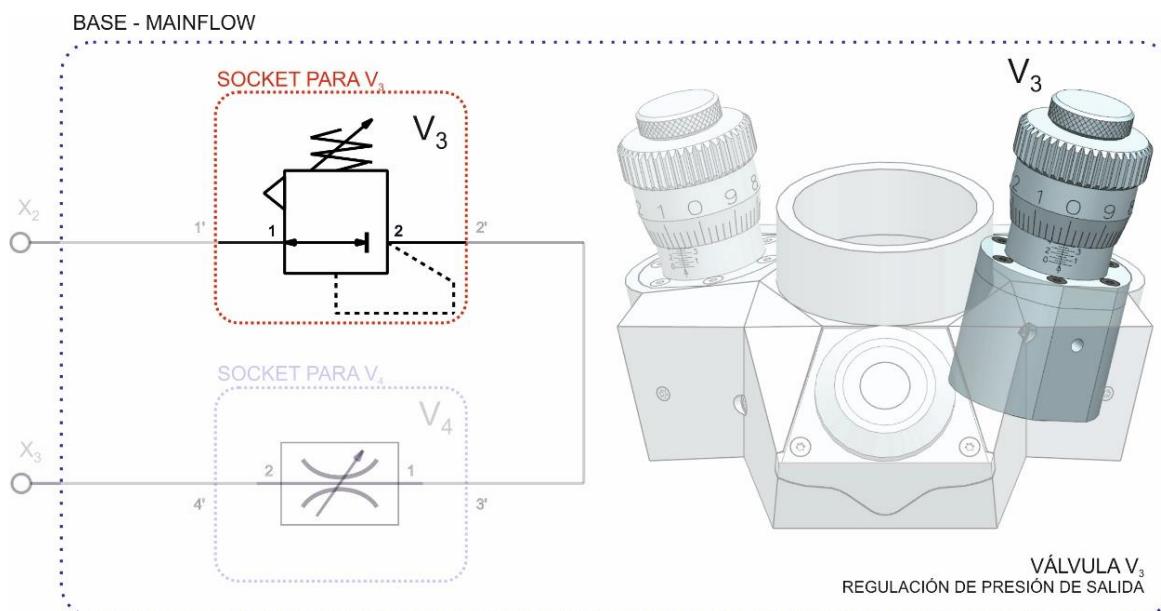
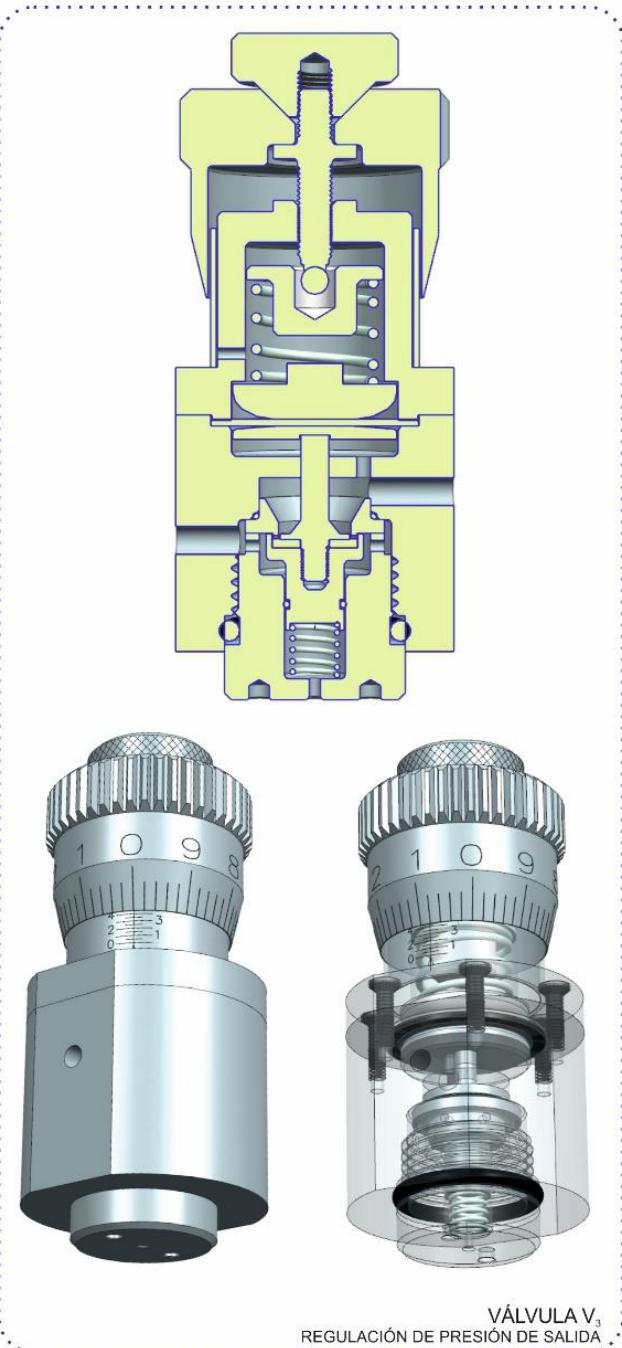


Figura 3.4.15. Válvula 3, vista de posición.

CONJUNTO:
s0_m00_a300.01-valvula_3.asm.prt



SUBCONJUNTOS:
s0_m00_a310.01-valvula_3-cuerpo.asm.prt
s0_m00_a320.01-valvula_3-consigna.asm.prt
s0_m00_a330.01-valvula_3-empaquetadura.asm.prt
s0_m00_a340.01-valvula_3-tornillo_ajuste.asm.prt
s0_m00_a350.01-valvula_3-muelle.asm.prt
s0_m00_a360.01-valvula_3-sensor.asm.prt
s0_m00_a370.01-valvula_3-obturador.asm.prt
s0_m00_a380.01-valvula_3-asiento.asm.prt
s0_m00_a390.01-valvula_3-tapon.asm.prt

PIEZAS - MATERIA PRIMA:
6 x r0_t25_a001-tornillo_avellanado-torx_nr_t4-m1_6-l5.prt

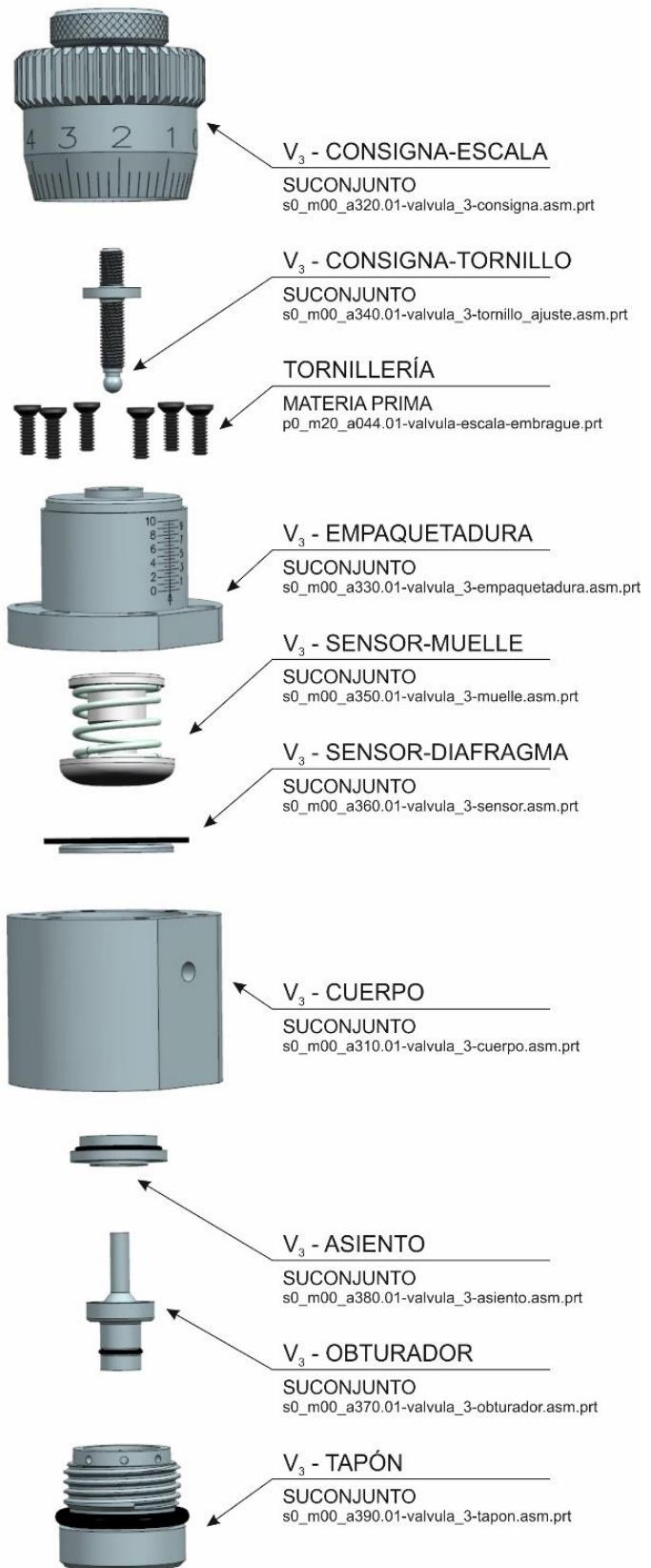


Figura 3.4.16. Válvula 3, vista de conjunto.

En la figura anterior podemos observar la gran cantidad de piezas que tiene esta válvula. A continuación, muestro el navegador de ensamblaje donde he eliminado restricciones posicionales y secciones por claridad.

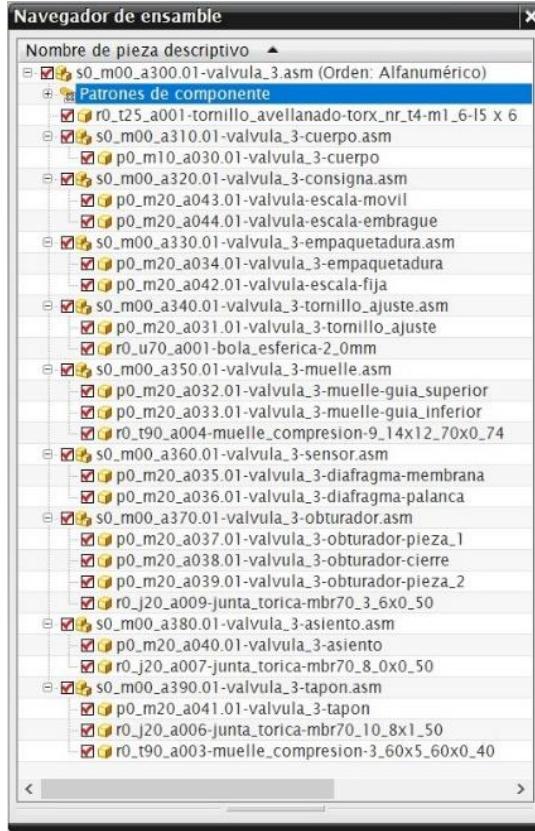


Figura 3.4.17. Válvula 3, piezas del ensamblaje.

Los subconjuntos que forman la válvula de regulación de presión los veremos en las siguientes páginas

Consigna

Este elemento es común para las válvulas V₃ y V₄. Existen dos versiones para la escala móvil, una prepara para grabado láser y la otra para mecanizado mediante fresado. El tornillo escalado nos va a permitir un ajuste muy fino, teniendo en cuenta que la escala es de 0 a 9 dividida cada sección en 5 partes tenemos una precisión de ojo humano de:

$$p = \frac{M}{e \cdot o} \rightarrow p = \frac{0,35 \text{ mm/vuelta}}{(50 \text{ pasos/vuelta}) \cdot 2} = 3,5 \mu\text{m/paso} \quad (3.4.2)$$

donde:

p: precisión.

M: paso de rosca. Para M2 fina es 0,35 mm vuelta

e: compresión máxima del muelle.

o: factor del ojo humano es de 2. Capaz de distinguir 1/2 de escala.

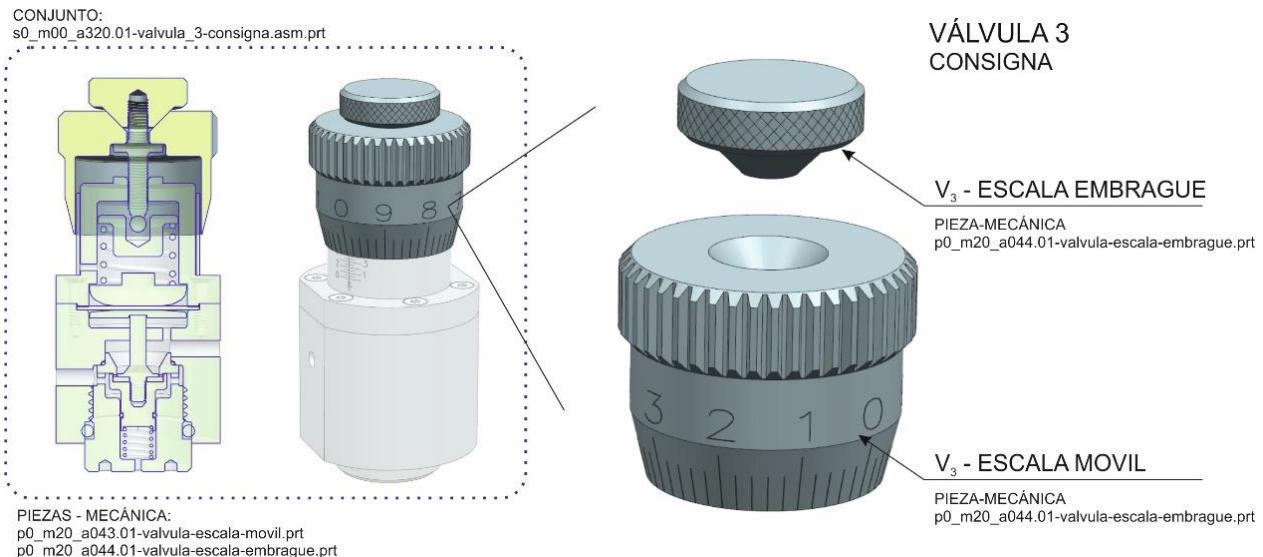


Figura 3.4.18. Válvula 3, consigna.

La consigna dispone de una pieza de embrague que permite fijar el cero de la escala.

Empaqueadura

Este conjunto tiene dos piezas:

- ✓ La empaquetadura propiamente dicha que es la que cierra y hace estanco el conjunto. Para ajustar correctamente la empaquetadura hay que ir apretando los tornillos enfrentados con una presión creciente. Así evitamos romper la junta de estanqueidad.
- ✓ La escala fija, también disponible para grabado por láser o mecanizado contiene la escala que marca el origen para la escala móvil.

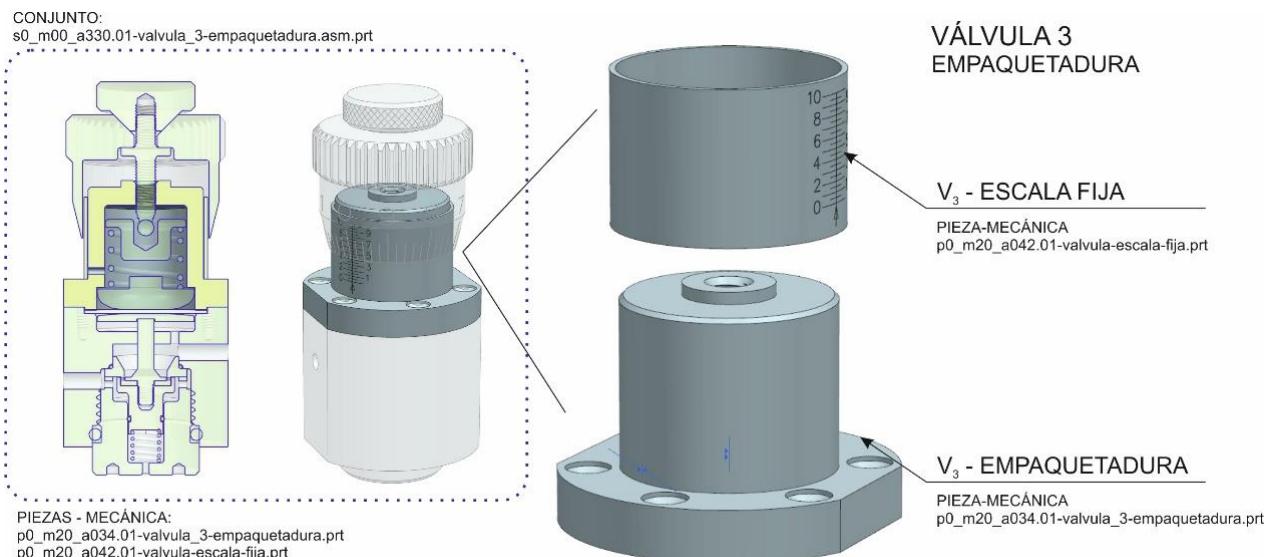


Figura 3.4.19. Válvula 3, empaquetadura.

Tornillo de ajuste

El tornillo de ajuste, está compuesto por el tornillo fijado a la consigna y una bola que hace de rótula sin rozamiento entre el tornillo y el muelle del sensor.

Este tornillo transmite el movimiento circular sobre la consigna a el muelle que efectúa la carga F_s sobre el elemento sensor. En la siguiente imagen podemos ver las partes que lo componen:

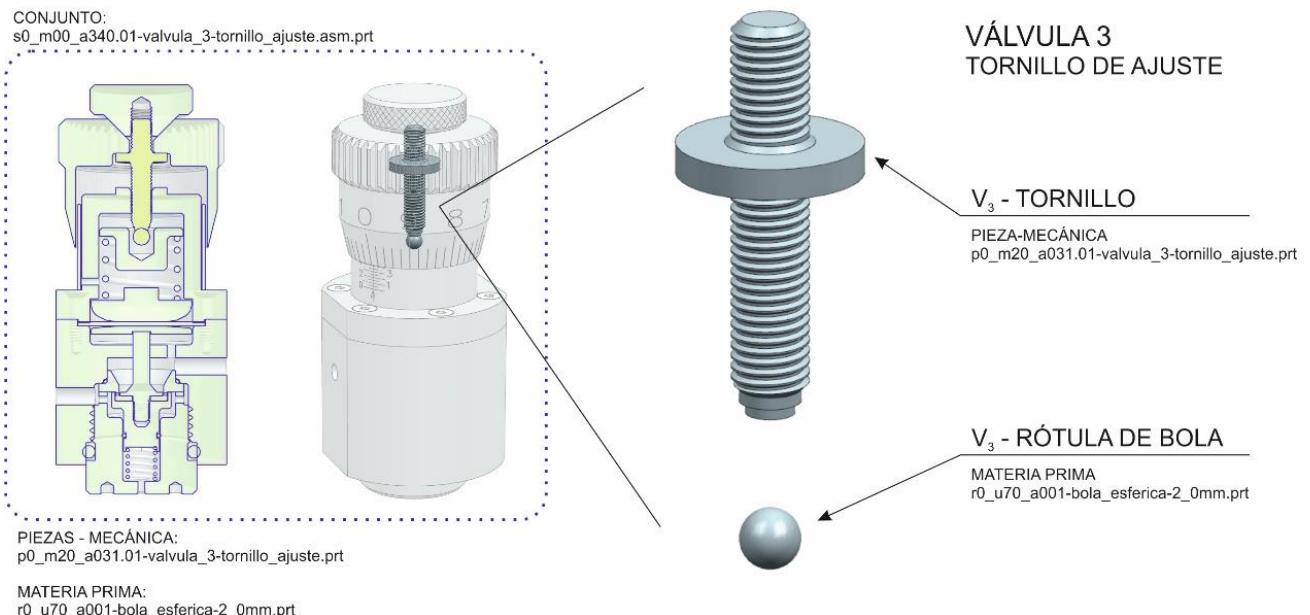


Figura 3.4.20. Válvula 3, tornillo de ajuste.

Muelle del sensor

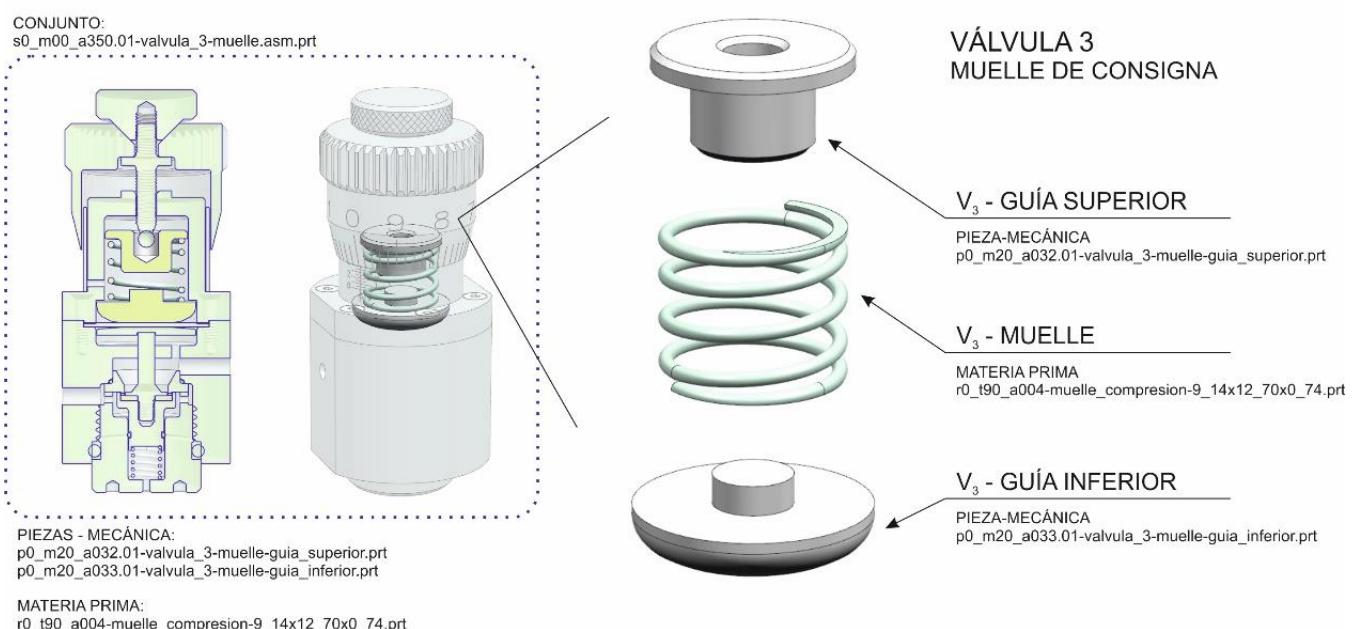


Figura 3.4.21. Válvula 3, muelle del sensor.

Este muelle es el que proporciona la fuerza de carga al sensor. A mayor compresión, mayor fuerza de carga por lo tanto mayor presión a la salida.

El conjunto está formado por tres piezas, el muelle y los soportes de adaptación en los extremos.

El soporte superior, tiene un agujero con fondo cónico que sirve de asiento a la bola (rótula) del tornillo de ajuste vista anteriormente.

En la parte inferior hay otro soporte que distribuye la fuerza de carga F_s de forma uniforme sobre la membrana del sensor.

Cuerpo

Como su nombre indica es la pieza que forma el cuerpo de la válvula sobre la que se fijan todas las demás.

El cuerpo tiene dos orificios por donde entra y sale el flujo y dos cámaras: la de paso de caudal (cámara inferior en la siguiente figura) y la de regulación en la que se encuentra el elemento sensor (parte de arriba en la siguiente figura).

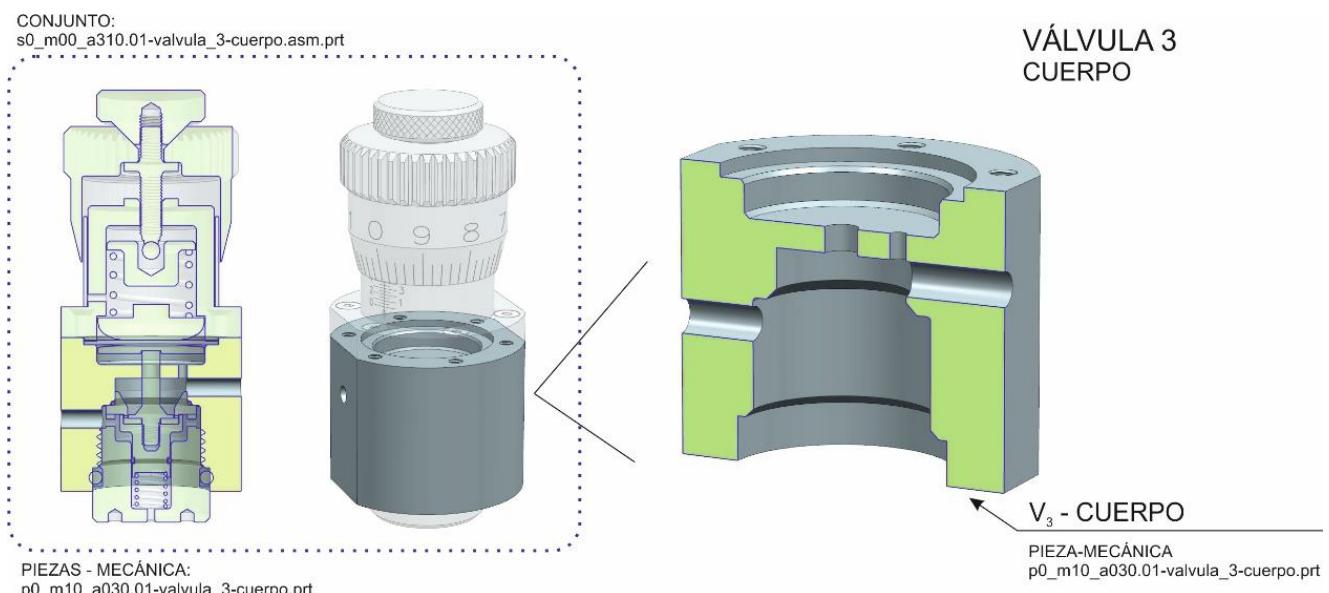


Figura 3.4.22. Válvula 3, Cuerpo.

Sensor

El elemento sensor en este caso es de diafragma fabricada con un polímero elastómero tipo EPDM, FKM o Nitrilo. Esta membrana actúa como un timpano transmitiendo la fuerza de un lado a otro de la cámara del sensor y a la vez permitiendo el cierre estanco de la válvula.

Si nos fijamos en la siguiente figura, esta membrana hace de junta estanca entre el cuerpo y la empaquetadura.

En la parte estanca de la cámara del sensor, hay una pieza llamada palanca que permite transmitir la fuerza al obturador sin dañar la membrana del sensor.

Esta pieza suele estar fabricada en acero inoxidable o algún polímero de gran dureza tipo PEEK o NYLON.

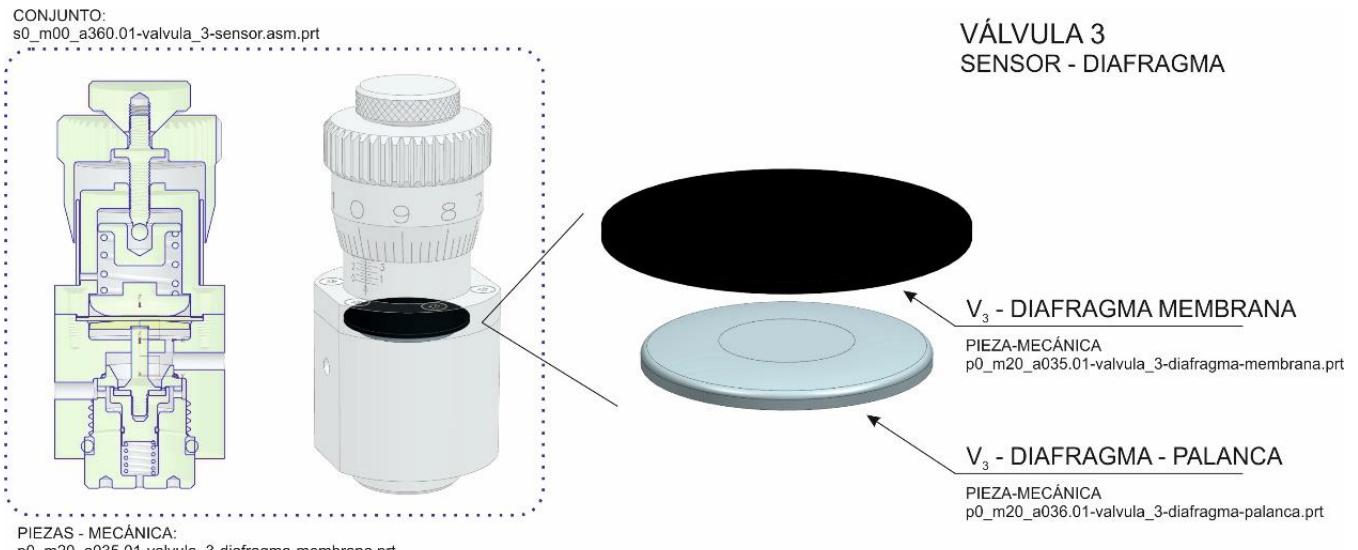


Figura 3.4.23. Válvula 3, elemento sensor.

Asiento

Sobre esta pieza descansa el obturador cuando la fuerza ejercida por el flujo F, es superior a la de consigna F_s.

La fijación se realiza por la presión axial ejercida por el tapón sobre esta pieza y para asegurar la estanqueidad se posiciona una junta tórica entre esta pieza y el cuerpo de la válvula de regulación de presión de salida.

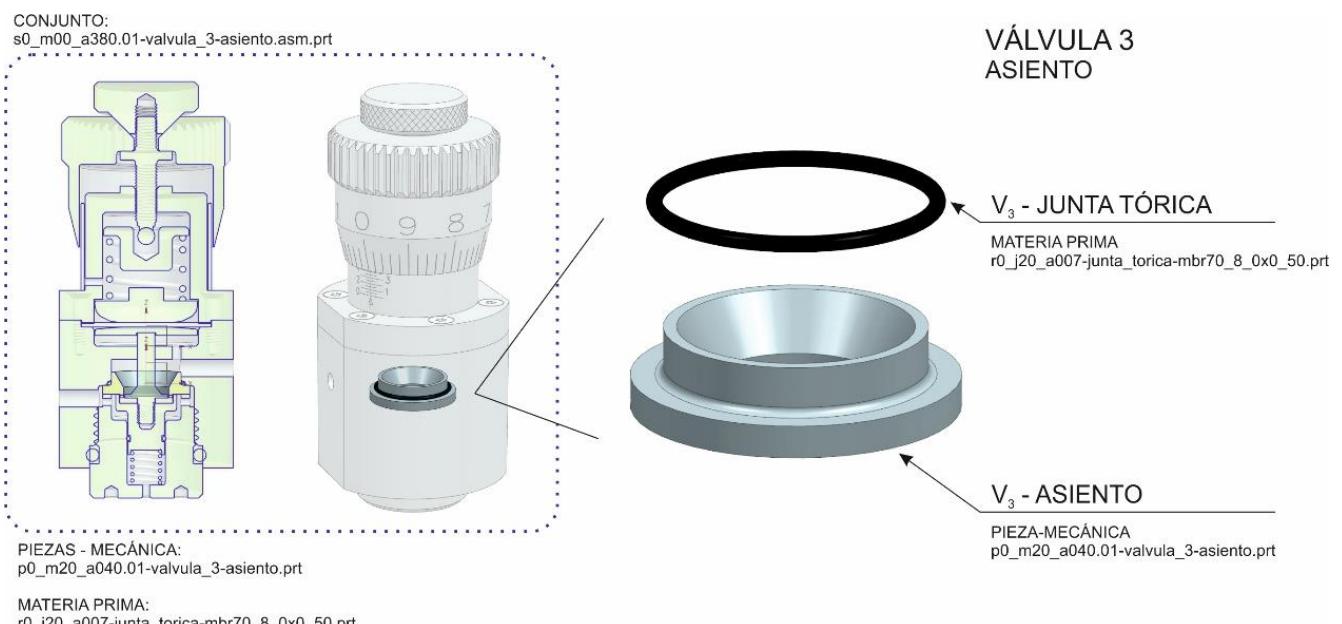


Figura 3.4.24. Válvula 3, asiento.

Obturador

Este elemento es el que cierra el paso de flujo cuando la presión del flujo a la salida es mayor que la presión de consigna establecida por el tornillo – muelle al hacer girar el tornillo moleteado. La pieza “cierre” es la que entra en contacto con la pieza “asiento” para impedir o cerrar el paso de flujo.

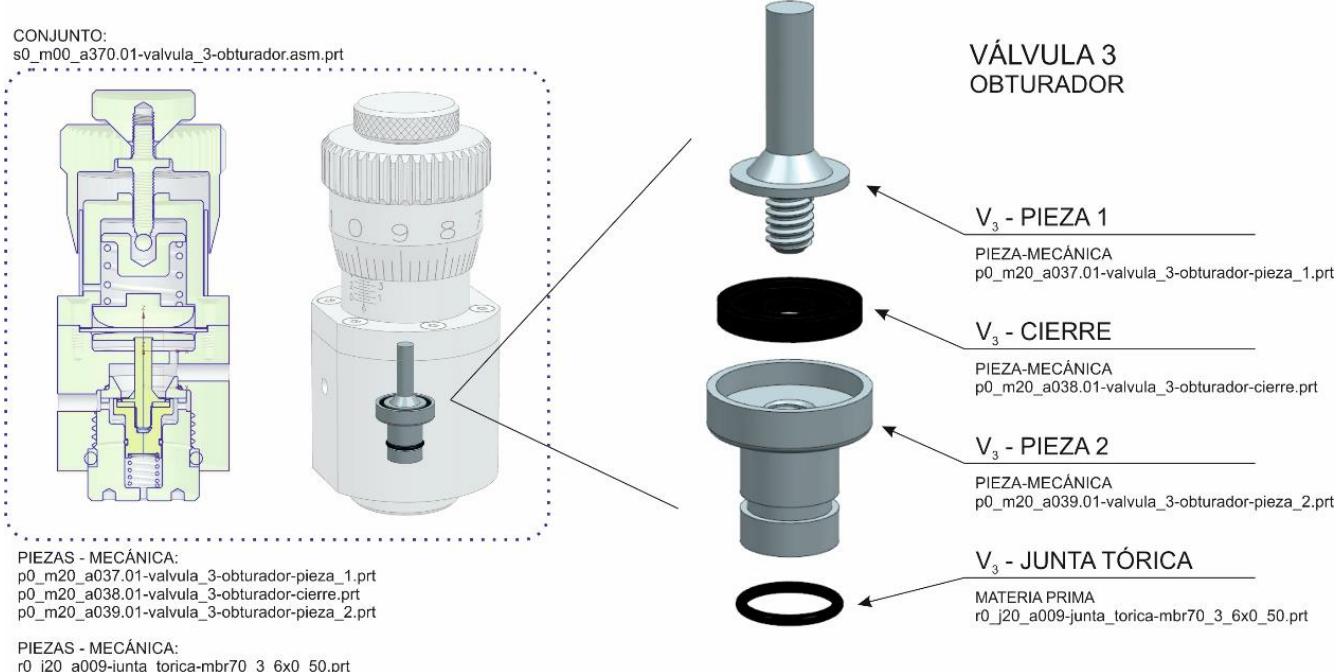


Figura 3.4.25. Válvula 3, obturador.

Tapón

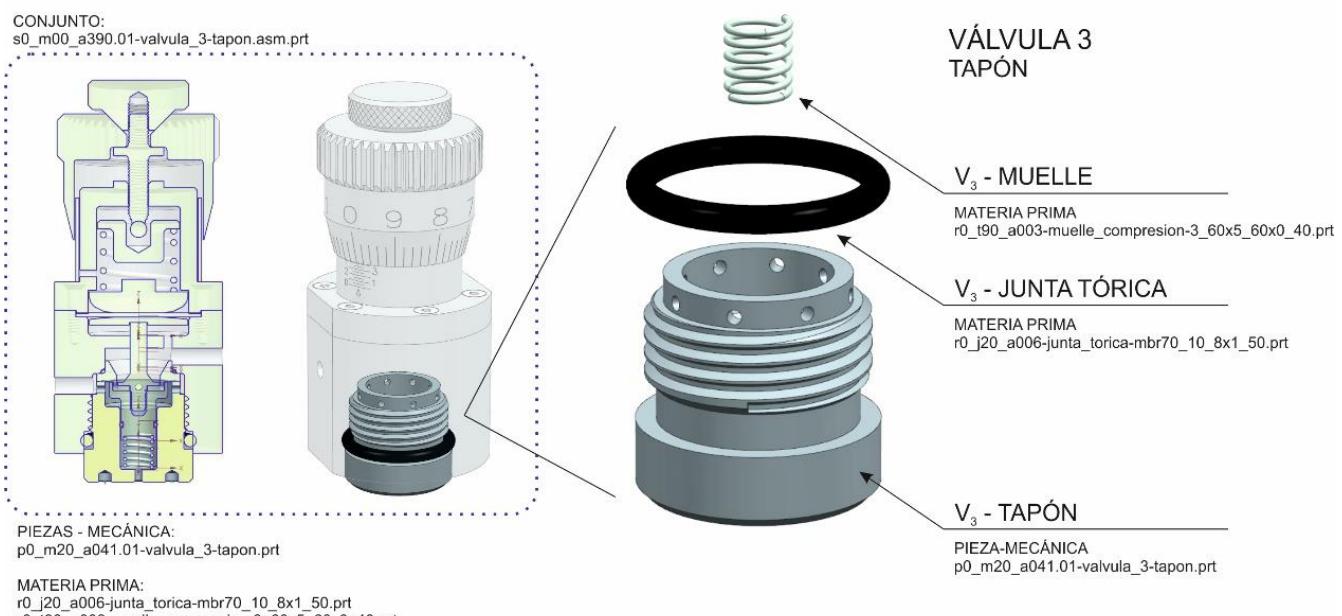


Figura 3.4.26. Válvula 3, tapón.

3.4.5. Base -Válvula 4, reguladora de caudal

Adentrarse en el mundo de las válvulas de regulación de flujo ha sido muy constructivo y excitante. A través de los catálogos de Swagelok he conocido los distintos tipos de válvulas de regulación de flujo, sus principales piezas (y nombres con los que se denominan) y características constructivas (coeficientes de caudal, diámetros de orificios, materiales, etc.) entre otras cosas.

El tipo de válvulas elegido es el de tipo aguja por su capacidad de control para flujos pequeños y la válvula de referencia en este caso ha sido una mezcla de estas dos series del catálogo de Swagelok:

- La serie O, 1, 18, 20 y 26 que es una válvula de aguja con bonete integrado^{56 55}. Como podemos ver en las siguientes imágenes.

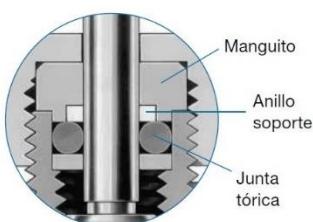


Figura 3.4.27. Válvula 4, de aguja con bonete integrado. Fuente Swagelok.

Es un tipo de válvula que se ajusta perfectamente a nuestras necesidades de flujo y presión. El bonete integrado confiere una gran robustez a la válvula, la rosca se mecaniza del vástago se mecaniza en el propio cuerpo de la válvula por lo que nos ahorramos una pieza (el bonete) haciendo el conjunto más barato y fácil de construir. En contra, la rosca queda expuesta al flujo. Ver imagen anterior.

En cuanto a la empaquetadura, he decidido hacer un cierre por junta como el que se muestra en la siguiente imagen, pero en lugar de utilizar una junta tórica, utilizo una junta plana. Lo veremos más adelante en el diseño de la válvula.

Cierres mediante junta tórica

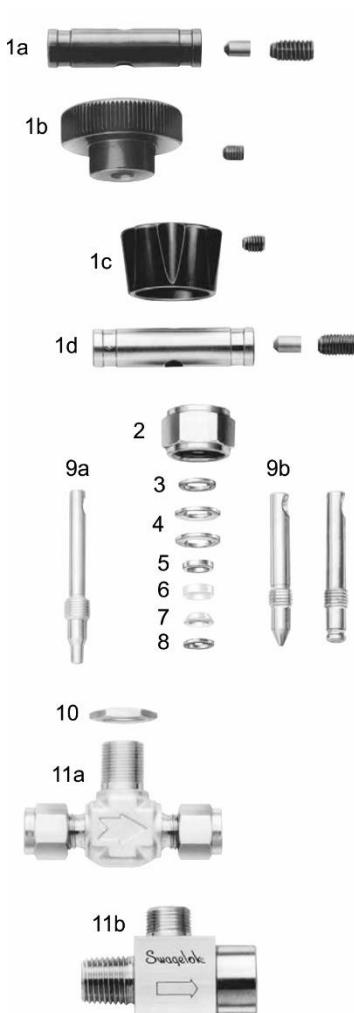


Material de la junta tórica	Temperatura de servicio °C (°F)	Indicador de la junta tórica	Indicador del conjunto	Rerencia básica del conjunto
Buna C	-53 a 121 (-65 a 250)	-BC	BC70	-9K-O (Series O y 20)
Buna N	-28 a 121 (-20 a 250)	-B	BN70	-9K-14 (Serie 1 con orificio de 0,172 pulg)
Etíleno propileno		-E	EP70	-9K-16 (Serie 1 con orificio de 0,250 pulg)
FKM fluorocarbono	-28 a 232 (-20 a 450)	-V	VA70	-9K-18 (Serie 18)
Kalrez®	-12 a 176 (10 a 350)	-KZ	KZ00	
Silicona	-28 a 121 (-20 a 250)	-SI	SI70	

Figura 3.4.28. Válvula 4, empaquetadura. Fuente Swagelok.

⁵⁶ Ver datasheet de Swagelok: "MS-01-164-valvulas_aguja-bonete_integral.pdf"

Para la elección de los materiales de cada una de las piezas, he utilizado como referencia los propuestos por el fabricante:



Materiales de construcción	Serie	Materiales del cuerpo de la válvula						
		Calidad/Especificación ASTM						
		Acero inox. 316	Latón	Acero al carbono	Aleación 400			
1 a Mando de barra Pasador del mando Tornillo de sujeción	18	Aluminio anodizado 2024/B221 o A209						
		Acero al carbono/A108						
		Acero al carbono recubierto de cadmio						
1 b Mando redondo Tornillo de sujeción	O y 1	Fenólico con inserto de latón						
		Acero al carbono recubierto de cadmio						
1 c Mando Tornillo de sujeción	20K	Aluminio anodizado 7129/B221	—					
		Acero al carbono recubierto de cadmio	—					
1 d Mando de barra Pasador del mando, Tornillo de sujeción	20V y 26	Acero inox. 316/A276	—					
		S17400/A564	—					
2 Tuerca de la empaquetadura	Todas	Acero inox. 316/A276	Latón 360/ B16	12L14/A108	Aleación 400/ B164			
3 Manguito	O, 1,① y 20	Acero inox. 304/A240, A167						
4 Muelles de empaquetadura	Todas②	S17700/A693						
5 Casquillo	Todas	Acero inox. 316/A240, A276, B783						
6 Empaquetadura superior	Todas	PFA/D3307						
7 Empaquetadura inferior		PCTFE/D1430						
8 Manguito inferior	Todas	Acero inox. 316/A240			Aleación 400/ B127			
9 a Vástago de regulación	O, 1, y 18	Acero inox 316 recubierto de cromo③/A276	Acero inox. 316/A276		Aleación 400/ B164			
9 b Vástago en V	Todas							
9 c Vástago asiento blando	Todas	Obturador						
		PCTFE/D1430						
10 Tuerca de panel	O, 1, y 18	Acero inox. 316	Latón 360/ B16	Acero inox. 316				
11 a Cuerpo	O, 1, y 18	Acero inox. 316/A182	Latón 377/ B283	Recubierta de cadmio 11L17/A108	Aleación 400/ B564			
11 b Cuerpo	20 y 26	Acero inoxidable 316/ A479	—					
Lubricante	Todas	Con base de disulfuro de tungsteno y fluorocarbono						

Los componentes húmedos se indican encursiva.

La tabla muestra las válvulas con mandos estándar. Consulte MANDOS en la página 8, para conocer las opciones de los mismos.

① Válvulas serie 1 con orificio de 4.4 mm (0,172 pulg).

② Series O, 20 y 1 con orificio de 4.4 mm (0,172 pulg)—2 muelles;

Series 18, 20 y 1 con orificio de 6.4 mm (0,256 pulg)—3 muelles.

③ Obturadores de regulación y en V; roscas del vástago de asiento blando.

Figura 3.4.29. Válvula 4, piezas y materiales. Fuente Swagelok.

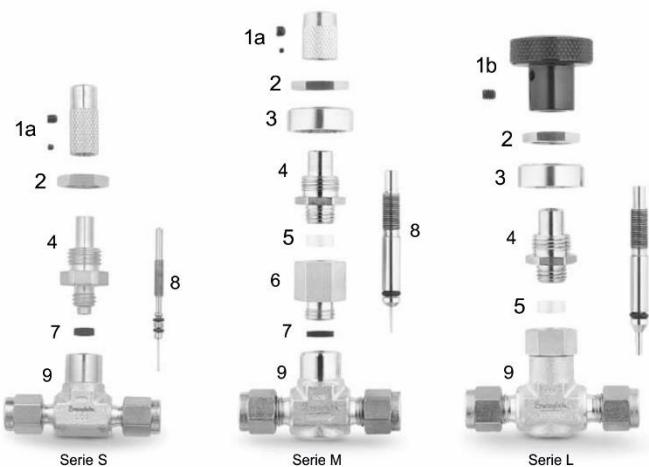
- La otra serie que he utilizado como referencia para el diseño, son las válvulas de aguja para regulación de precisión, series S, M, L y 31⁵⁷ ⁵⁵ que son válvulas especialmente diseñadas para control preciso de flujos.

En concreto, me he basado en las series S, M y L para control de flujo de precisión para bajas presiones. En la figura de la página siguiente muestro estas series de válvulas con los nombres que reciben las piezas y los materiales con los que se fabrican y que nos servirán para determinar los materiales que vamos a utilizar nosotros en nuestro diseño.

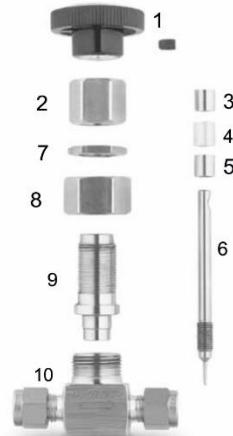
En esta imagen, también se aprecia (pate baja) como la rosca del vástago queda aislada del flujo principal de manera que no se ve afectada por posibles reacciones corrosivas.

⁵⁷ Ver datasheet de Swagelok: "MS-01-142-valvulas_aguja-precisión.pdf"

Válvulas de baja presión (Series S, M y L)



Válvulas de alta presión (Serie 31)



Componente	Material del cuerpo de la válvula	
	Latón	Acerinox. 316
	Calidad/Especificación ASTM	
1a Mando	Latón cromado con neblina de plata 360/B16	Acerinox. 300/A276
Tornillo del mando Tornillo de bloqueo ^①	Aleación de acero cubierta de aceite ligero y óxido negro/ANSI 18.3	
1b Mando	Aluminio anodizado verde 6061-T651/B211	
Tornillo del mando	Aleación de acero cubierta de aceite ligero y óxido negro/ANSI 18.3	
2 Tuerca de montaje en panel	Latón cromado con neblina de plata 360/B16	Acerinox. 316/A479—S, M; Acerinox. 316/B783—L
3 Manguito del bonete	Acerinox. 316 sinterizado	
4 Bonete	Latón cromado con neblina de plata 345/B453	Acerinox. 316/A479
5 Anillo guía del vástago	PTFE relleno de fibra de vidrio	
6 Extensión del cuerpo ^②	Latón cromado con neblina de plata 345/B453	Acerinox. 316/A479
7 Cierre del cuerpo ^②	Buna N	FKM fluorocarbono
8 Vástago	Acerinoxidable S17400/A564—S; Acerinoxidable 316/A479—M, L	Acerinox. recubierto de cromo duro S17400/A564—S Acerinox. recubierto de cromo duro 316/A479—M, L
Juntas tóricas	Buna N	FKM fluorocarbono
9 Cuerpo	Latón cromado con neblina de plata 377/B283	Acerinox. 316/A182
Lubricantes	Con base de disulfuro de molibdeno; con base de silicona	

Componente	Calidad/Especificación ASTM
1 Mando	Fenólico/D4617
Tornillo de sujeción	Acerox recubierto de níquel-cadmio
2 Tuerca de la empaquetadura	Acerinox. 316/A276
3 Casquillo superior	
4 Empaquetadura	PTFE/D1710
5 Casquillo inferior	Acerinox. 316/A276
6 Vástago	Acerinox. 440C/A276
7 Tuerca del panel	Acerinox. 316/B783
8 Tuerca de unión	Acerinox. 316/A276
9 Bonete	Acerinox. 316/A479
10 Cuerpo	
Lubricante	Anti-gripado de níquel con portador de hidrocarburo

Los componentes húmedos se indican en cursiva.

① Adhesivo anaeróbico

② Válvulas serie M modelos recto y doble.

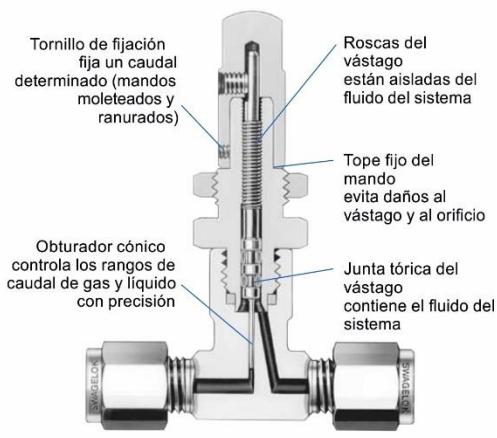
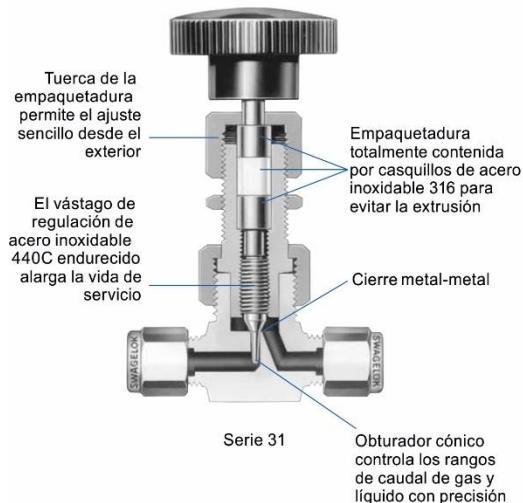


Figura 3.4.30. Válvula 4, series de precisión. Fuente Swagelok.

3.4.5.2. Diseño

Como marca la norma para un buen diseño (diseño eficiente), he intentado en la medida de lo posible utilizar o reciclar piezas ya utilizadas en otras partes del proyecto, en concreto en el diseño de la válvula 3.

Se observará que he mantenido piezas enteras y que las formas de ambas válvulas son muy parecidas. De hecho, a primera vista parecen iguales, siendo el interior completamente diferente.

Otra norma diseño que he aplicado es la facilidad de escalar y/o modificar el diseño. Es decir, he hecho un diseño que permita cambiar piezas determinantes por otras sin tener que cambiar toda la válvula. Por ejemplo, si queremos controlar más caudal (mayor C_v), podríamos cambiar el asiento y el vástago solamente. Esto va en detrimento del número de piezas.

En la figura de la página siguiente, podemos ver las piezas que tiene esta válvula. A continuación, muestro el navegador de ensamblaje donde he eliminado restricciones posicionales y secciones por claridad.

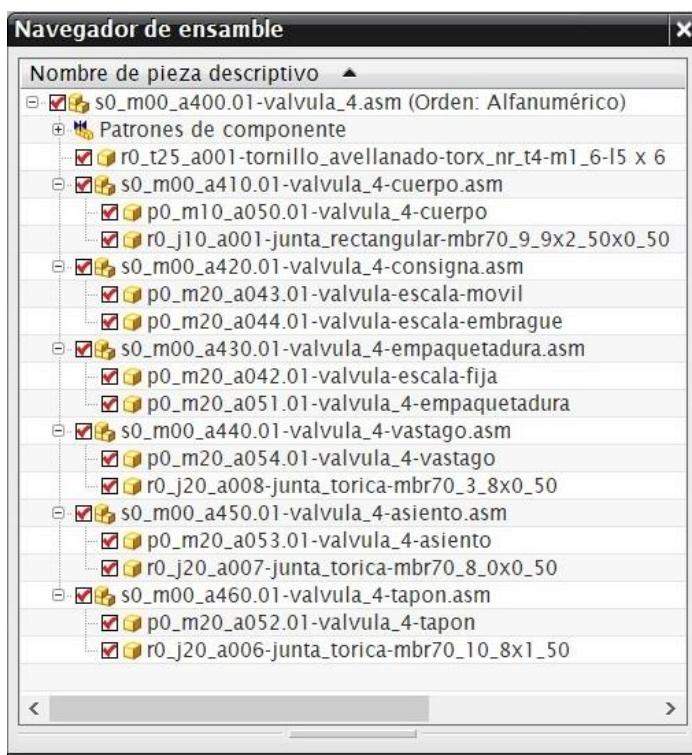
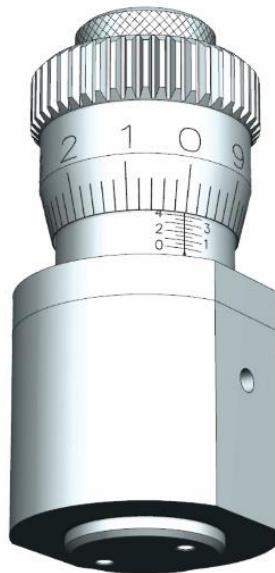
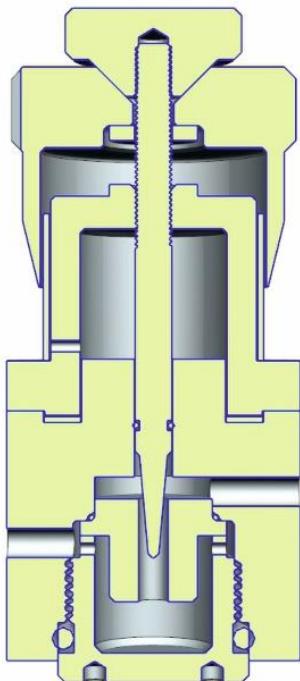


Figura 3.4.31. Válvula 4, piezas del ensamblaje.

Podemos ver que el chasis de la válvula piezas: consigna, empaquetadura, cuerpo y tapón son muy parecidos a los diseñados para la válvula de regulación de flujo (V_3). De hecho, la consigna, la empaquetadura, el tapón y la tornillería son las mismas (o prácticamente iguales).

Podemos observar también, como el órgano regulador está formado sólo por dos piezas: vástago y asiento. Por lo que podríamos cambiar solo estas piezas para tener una válvula completamente distinta.

CONJUNTO:
s0_m00_a400.01-valvula_4.asm.prt



VÁLVULA V₄
DE AGUJA PARA CONTROL DE FLUJO

SUBCONJUNTOS:

s0_m00_a410.01-valvula_4-cuerpo.asm.prt
s0_m00_a420.01-valvula_4-consigna.asm.prt
s0_m00_a430.01-valvula_4-empaquetadura.asm.prt
s0_m00_a440.01-valvula_4-vastago.asm.prt
s0_m00_a450.01-valvula_4-asiento.asm.prt
s0_m00_a460.01-valvula_4-tapon.asm.prt

PIEZAS - MATERIA PRIMA:

6 x r0_t25_a001-tornillo_avellanado-torx_nr_t4-m1_6-l5.prt

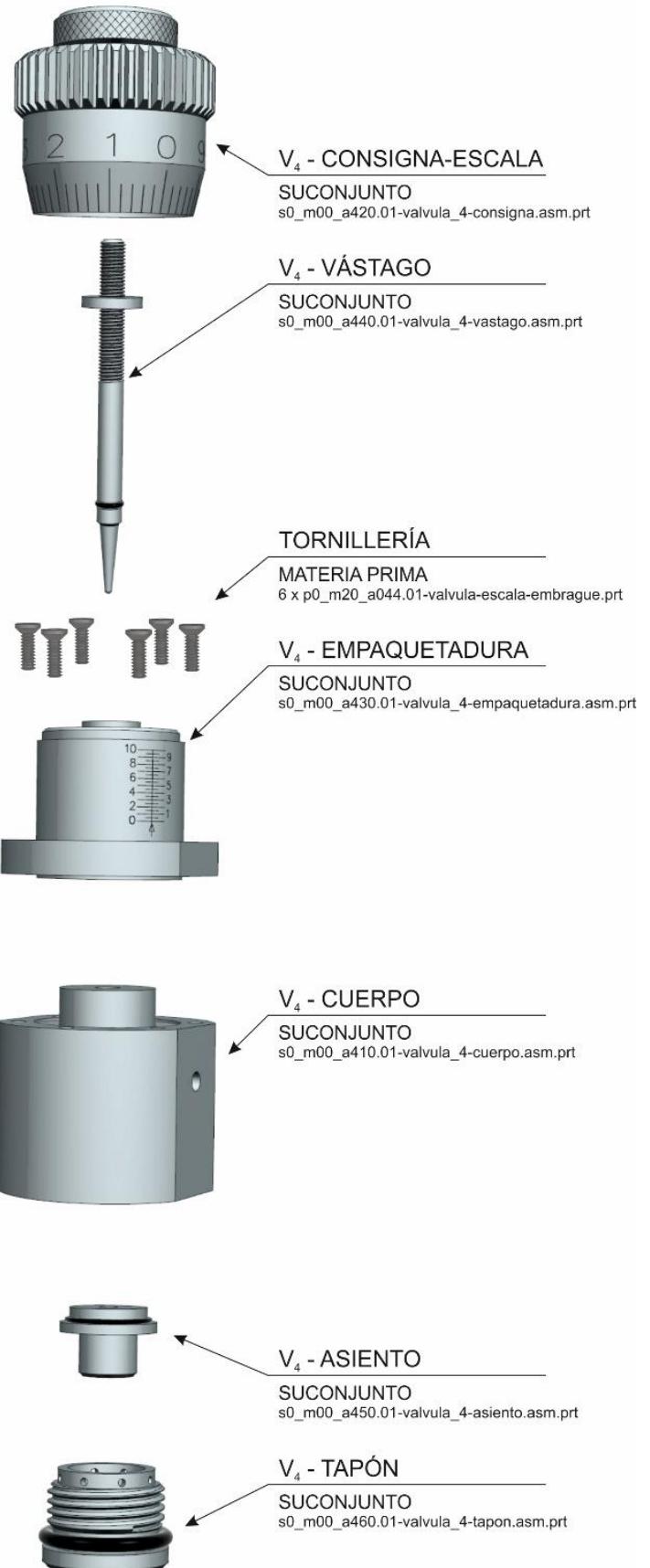


Figura 3.4.32. Válvula 4, vista de conjunto.

La válvula 4 se inserta en el socket situado a la izquierda de la base. A este socket le llega el gas desde la salida de la válvula V_3 y se encamina hacia el agitador en el punto de conexión x_2 . En la siguiente imagen podemos observar la posición correcta de la válvula de regulación de caudal:

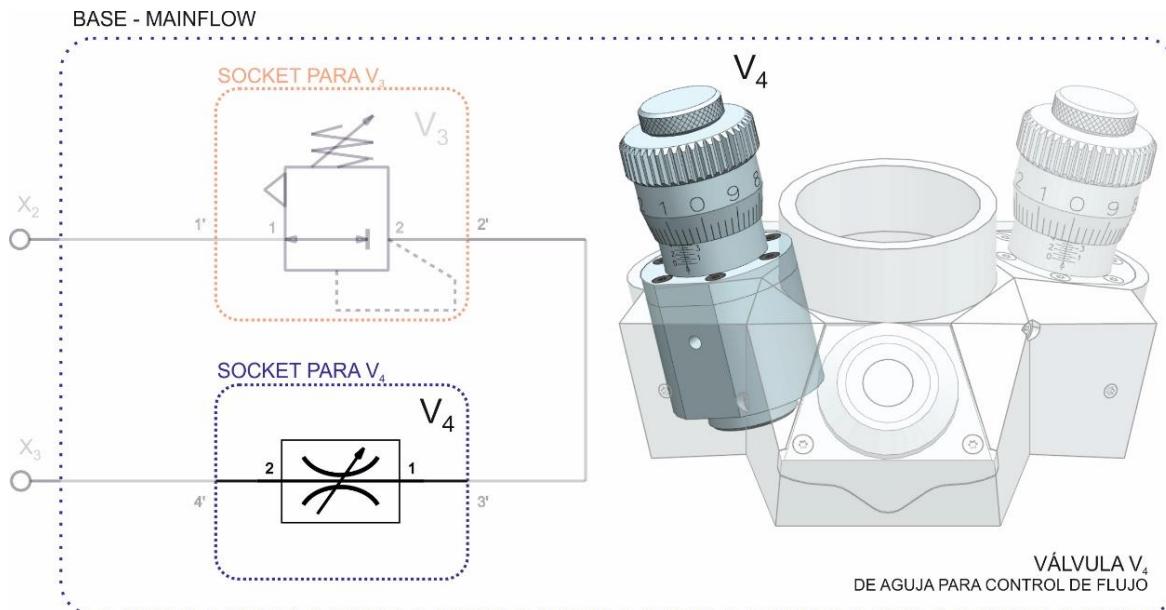


Figura 3.4.33. Válvula 4, vista de posición.

Los subconjuntos que forman la válvula de regulación de flujo los veremos en las siguientes páginas donde explicaré alguna cualidad interesante.

Consigna

Este elemento es común para las válvulas V_3 y V_4 y ya lo expliqué en el apartado 3.4.4.3 (ver la Figura 3.4.18, en la página 113) por lo que no voy a repetirlo, simplemente voy a mostrar cómo queda al posicionarlo en la válvula V_4 en la página siguiente, Figura 3.4.35.

La precisión del tornillo se mantiene, ver fórmula (3.4.2).

$$p = \frac{M}{e \cdot o} \rightarrow p = \frac{0,35 \text{ mm/vuelta}}{(50 \text{ pasos/vuelta}) \cdot 2} = 3,5 \mu\text{m/paso}$$

Pero el número de vueltas en este caso cambia ya que el recorrido de vástago en la garganta de V_4 es distinto al recorrido de la consigna en la válvula V_3 , en este caso el recorrido es:

$$n = \frac{l_o}{M} \rightarrow n = \frac{7 \text{ mm}}{0,35 \text{ mm/vuelta}} = 20 \text{ vueltas} \quad (3.4.3)$$

donde:

n : número de vueltas de la consigna.

M : paso de rosca. Para M2 fina es 0,35 mm vuelta

l_o : recorrido máximo del vástago en la garganta. 7 mm en V_4

En la siguiente figura, muestro la válvula V₄ para distintos recorridos del vástagos. En la parte izquierda muestro el vástagos a su máximo recorrido, 7mm (válvula completamente abierta) y a la derecha la misma válvula con el vástagos desplazado 0 mm (válvula completamente cerrada):

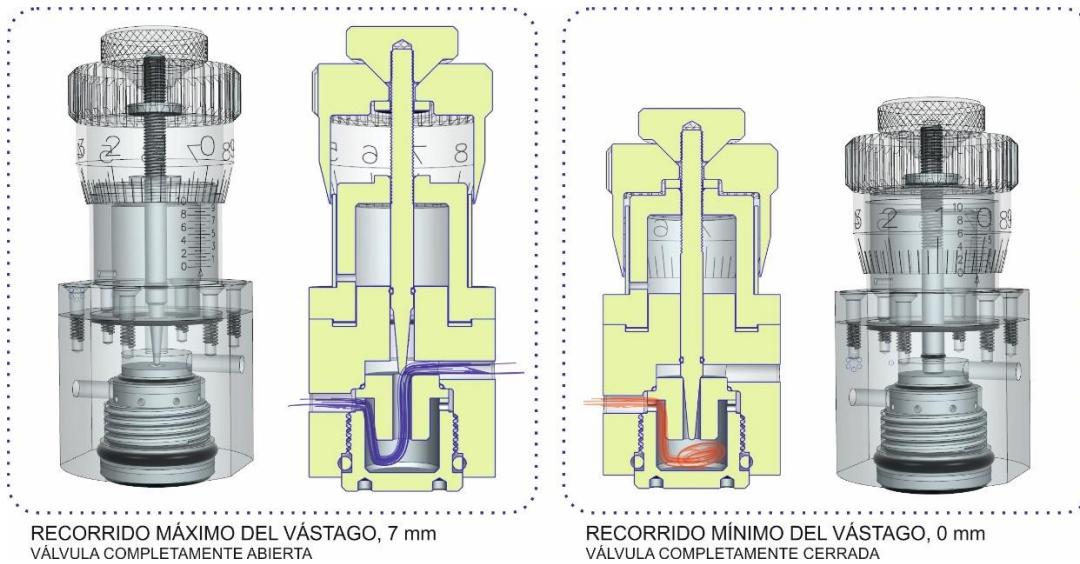


Figura 3.4.34. Válvula 4, recorrido del vástagos.

Aprovecho para comentar que en el modelo he puesto restricciones de cota en todas las partes móviles de manera que en cualquier momento podemos posicionar el sistema en la configuración deseada, como he hecho para realizar la ilustración anterior.



Figura 3.4.35. Válvula 4, consigna.

En la figura anterior, podemos ver la consigna que dispone de una pieza de embrague que permite fijar el cero de la escala.

Empaqueadura

Este conjunto tiene dos piezas:

- ✓ La empaquetadura propiamente dicha que es la que cierra y hace estanco el conjunto.
- ✓ La escala fija, que es exactamente la misma que la explicada en el punto 3.4.4.3, Figura 3.4.19 de la página 113.

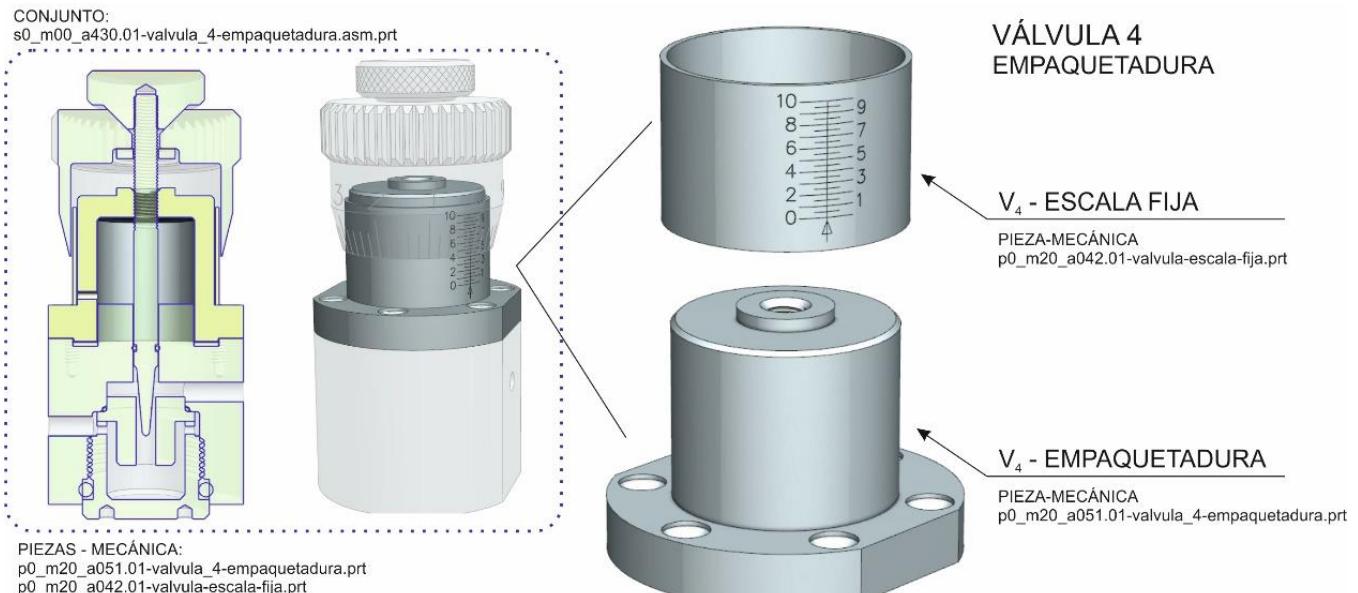


Figura 3.4.36. Válvula 4, empaquetadura.

Cuerpo

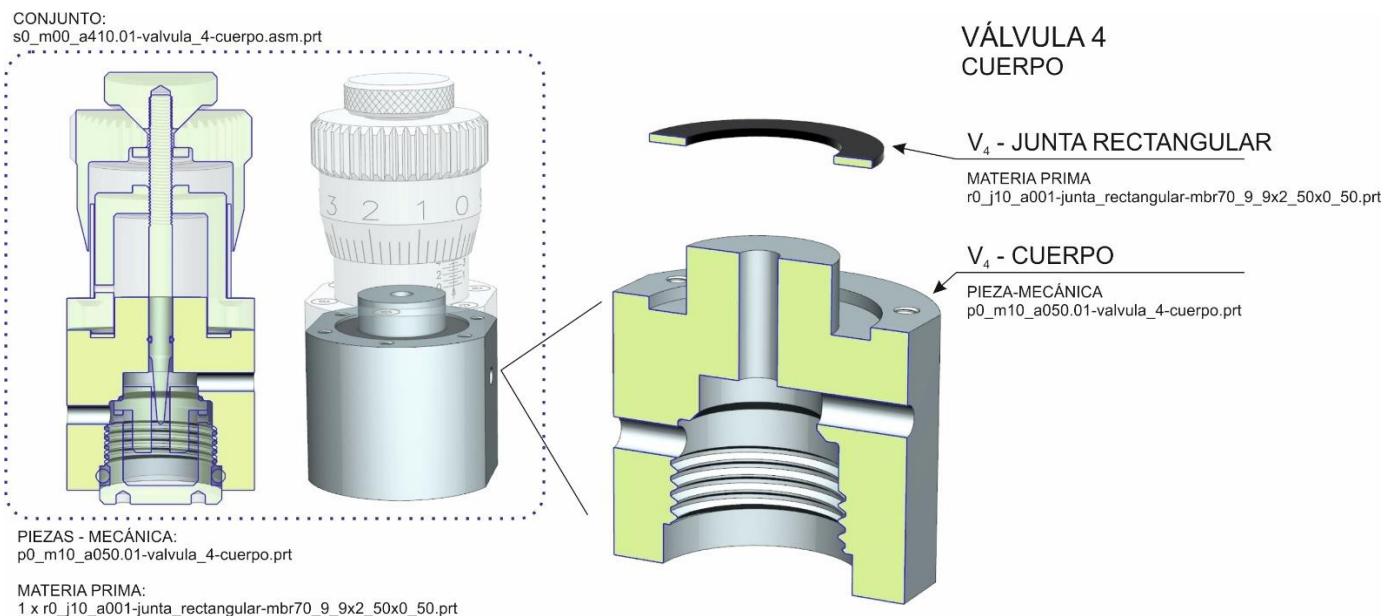


Figura 3.4.37. Válvula 4, Cuerpo.

Esta pieza que forma el cuerpo de la válvula sobre la que se fijan todas las demás.

El cuerpo tiene dos orificios por donde entra y sale el flujo y una cámara donde se encuentra el órgano regulador. En este caso el órgano regulador está formado por el asiento y el vástago que veremos a continuación.

Para asegurar la estanqueidad de la armadura, en la parte superior del cuerpo se sitúa una junta plana. El apriete sincronizado de los tornillos, repartirá la presión de forma uniforme por esta junta sin dañarla.

La junta rectangular, se puede comprar en los distribuidores habituales de juntas. Ver el anexo A-2.5 donde se especifican fabricantes de juntas.

Vástago

Las válvulas reguladoras de flujo de aguja se caracterizan por tener un vástago con un final cónico que se asemeja a una aguja (de ahí el nombre). Una aguja es un obturador cónico.

El tamaño y forma de la aguja junto con el desplazamiento axial producido por la rosca determinan la precisión y capacidad de flujo de la válvula. Por regla general, a menor pendiente en el cono, mayor precisión en el rango de variación y a mayor longitud del cono, mayor rango de control.

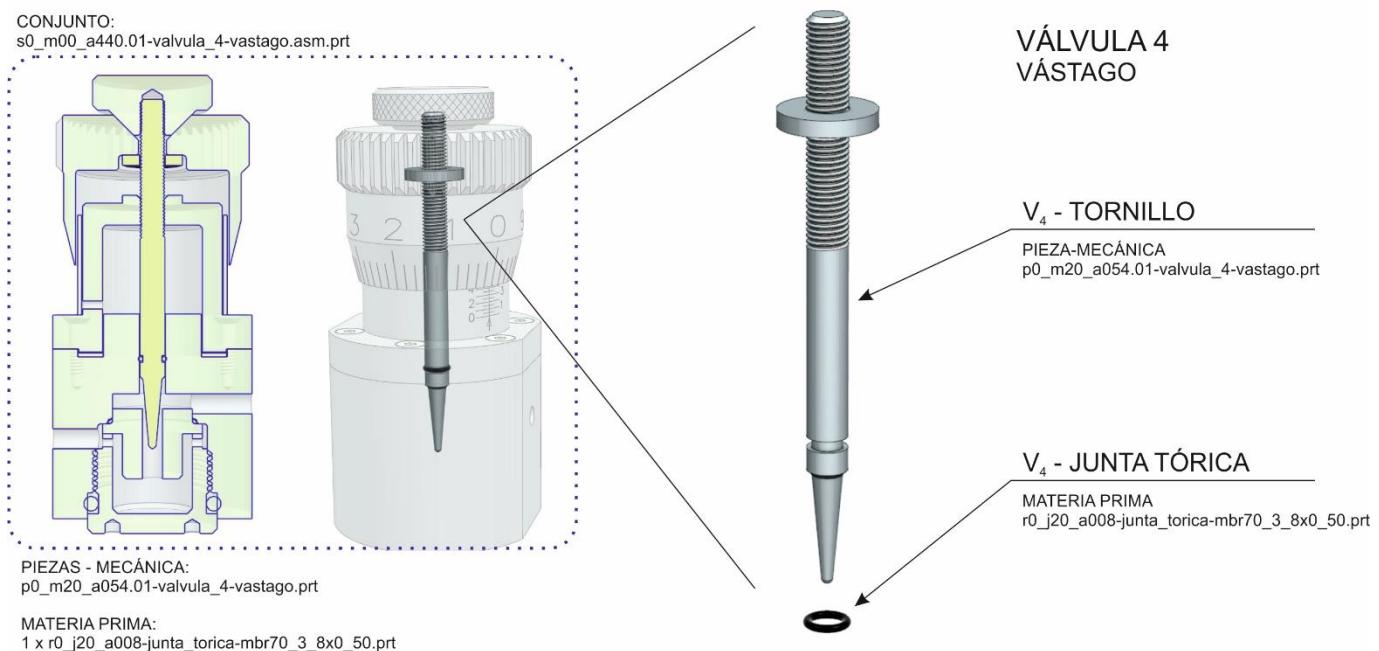


Figura 3.4.38. Válvula 4, Vástago.

Junto al asiento (pieza siguiente), conforman el órgano regulador de la válvula. Como se indicó al inicio de este tema. Se ha pensado el diseño para permitir un fácil acceso a los elementos internos de manera que:

- ✓ Facilitamos la limpieza y mantenimiento.
- ✓ Podemos intercambiar el órgano regulador (vástago-asiento) para tener una válvula con distintas características.

Asiento

Junto con el vástago, conforman el órgano regulador de la válvula. El diámetro y profundidad de la garganta, debe estar en sintonía con el cono del vástago. Para bajas presiones se suelen utilizar asientos blandos. Ver la siguiente figura:

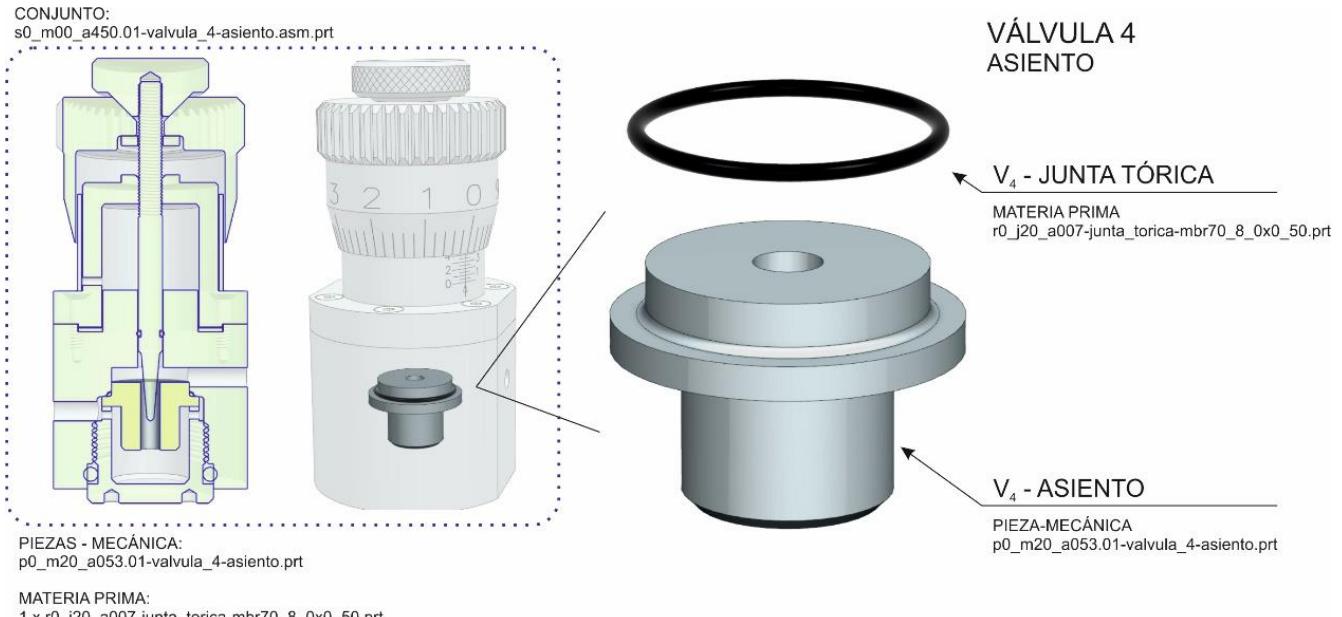


Figura 3.4.39. Válvula 4, Asiento.

Tapón

El tapón fija el asiento y permite el acceso al órgano regulador por la parte inferior de la válvula. En la siguiente figura muestro las partes del tapón:

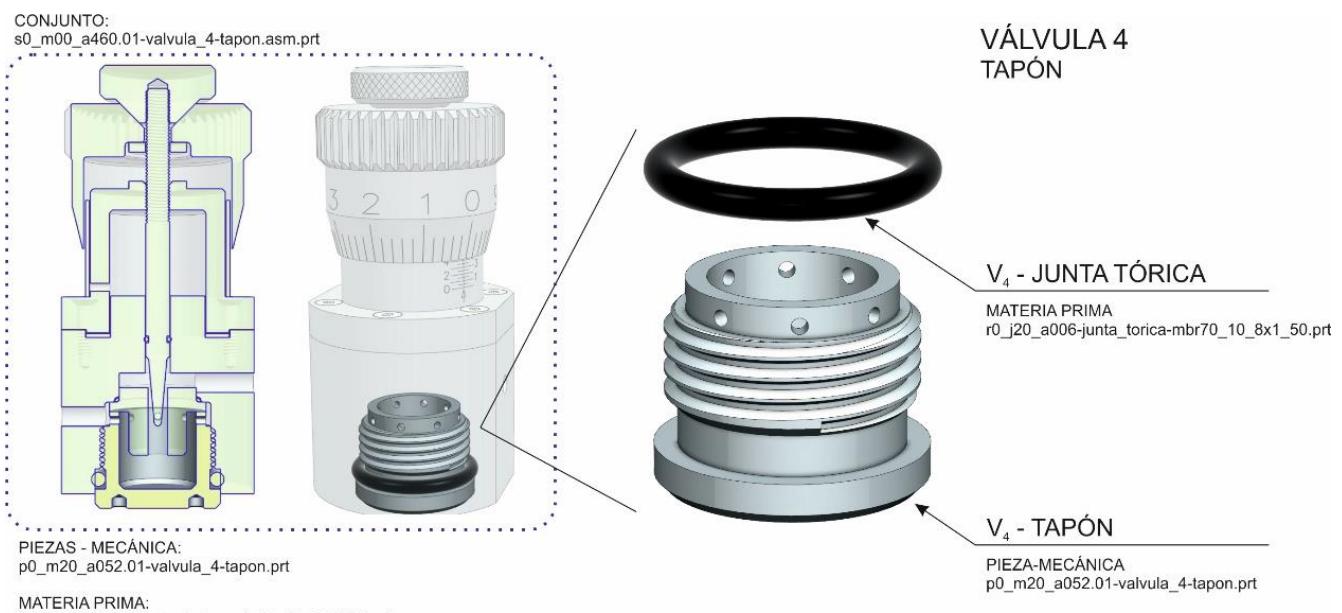


Figura 3.4.40. Válvula 4, Tapón.

3.5. Columna de burbujeo

El mundo de la enología es muy amplio y más complejo de lo que parece. Lo que en principio parece un tema simple (como por ejemplo las dimensiones de una botella de vino), resulta que está rigurosamente controlado y restringido.

En concreto, y sólo en el estado español, la norma que se aplica a la botella de vino Bordelesa es la UNE 126-201, y para el perfil de gargantilla se aplica la norma UNE 126-403. En Francia, para el perfil de la gargantilla, utilizan la norma NI H 35- 100.

Para vino seco se suele utilizar la botella tipo Bordelesa de 75cl. (puede haber cinco modelos diferentes, según su dimensión y peso). Su perfil de gargantilla (cuello de la botella) es de tipo 28 mm y, comúnmente, el gollete tiene un diámetro de apertura de $18,5 \pm 0,5$ mm. En la siguiente figura, muestro las dimensiones con las que he modelado la botella Bordelesa:

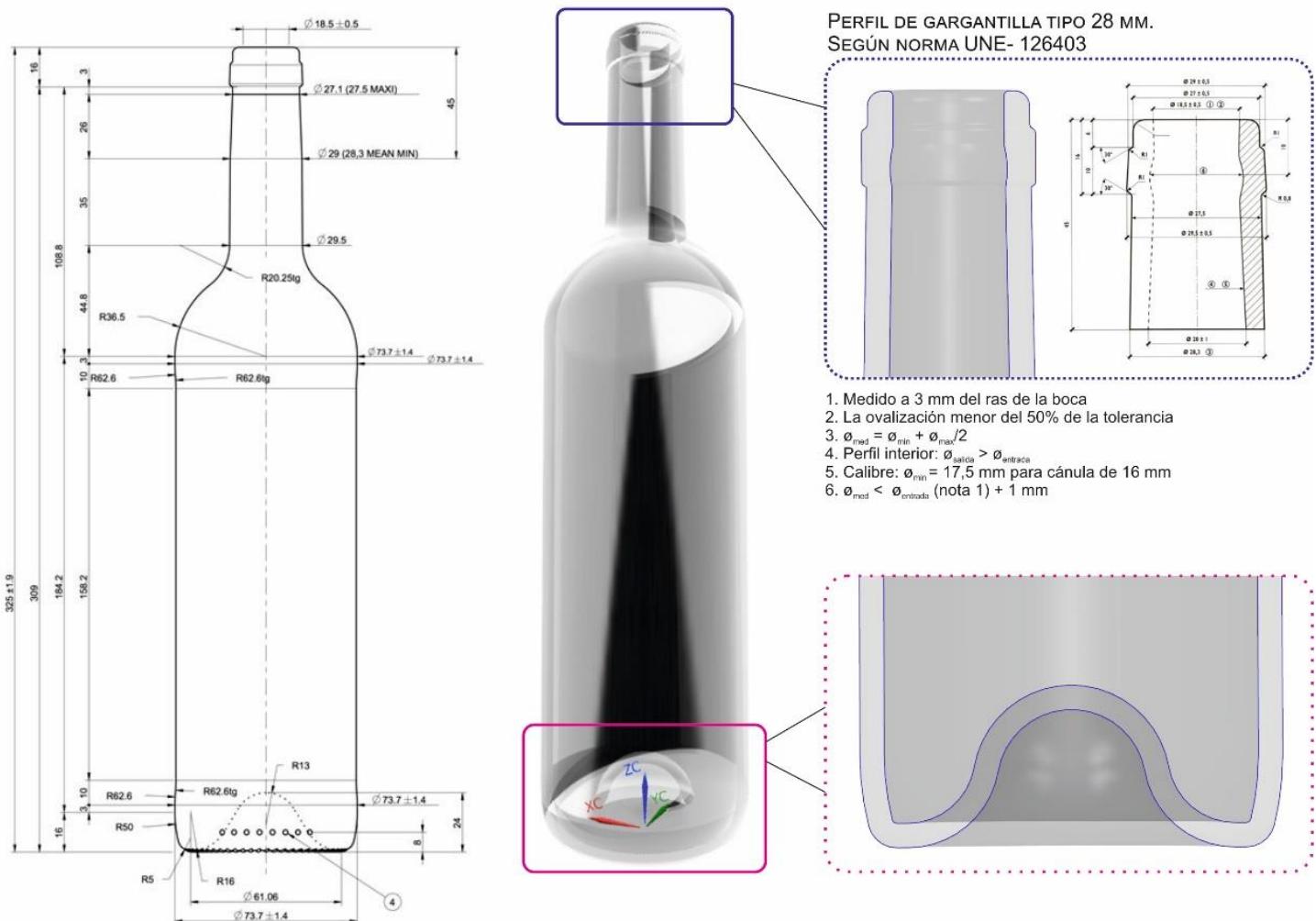


Figura 3.5.1. Botella de vino Bordelesa. Columna de burbujeo.

La documentación recopilada está en el repositorio del proyecto en la carpeta^{58 59}.

⁵⁸ github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts/botella_bordolesa
⁵⁹ <https://www.ceresnet.com/ceresnet/esp/taponero/tema4-3.html>

4. Presupuesto

Al inicio del proyecto, lo primero que se realizó fue un diseño 3d conceptual para pedir presupuestos. Este prototipo conceptual, se encuentra en la carpeta⁶⁰ y lo muestro en la siguiente figura

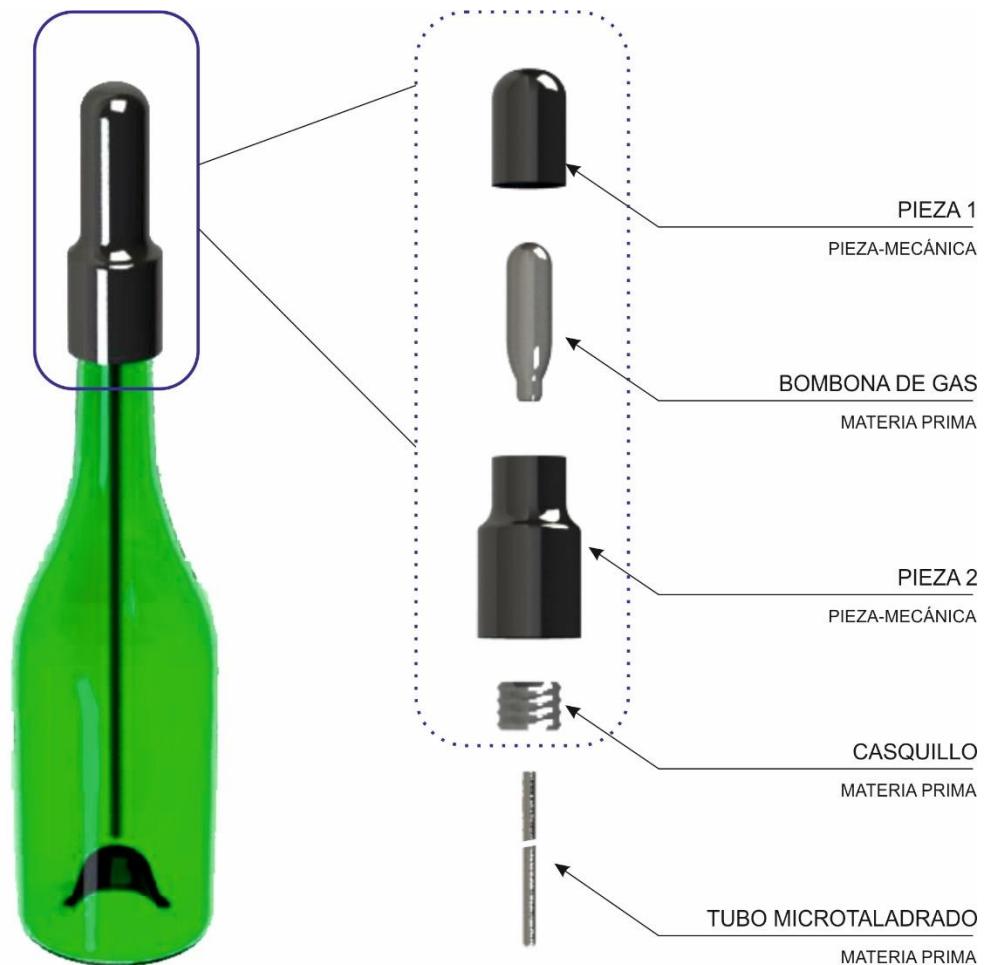


Figura 4.1.1. Prototipo conceptual para presupuestos.

Las cotizaciones recibidas se guardaron en la carpeta⁶¹ del repositorio del proyecto, siendo la empresa de prototipado rápido Protolabs, la que mejor oferta dispuso.

En la siguiente página podemos ver la oferta para realizar un único prototipo.

⁶⁰ https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_cad/3d_conceptual

⁶¹ https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_sales/quotations

La fabricación empieza a ser rentable para 20 unidades con los siguientes precios:

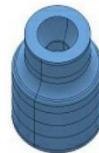
Pieza	1 u	20 u
Pieza 1	218 €	93 €
Pieza 2	281 €	81 €

Tabla 4.1.1. Presupuesto escalado en aluminio. Protolabs.

ProtoQuote®

Presupuesto Mecanizado CNC

Preparado para: Seas (ES)
Número de presupuesto: 416699
Fecha del presupuesto: 5-Aug-2019
Nombre de la pieza: Cuerpo difusor (rev: 1)
Dimensiones: 74.018 mm x 42.552 mm x 42.552 mm



Le agradecemos que nos brinde la oportunidad de poder presupuestar sus piezas. Esperamos poder trabajar pronto con usted en este proyecto. En caso de que tenga alguna pregunta, no dude en ponerse en contacto con nosotros en el teléfono +34 932 711 332.

① Confirme o modifique las especificaciones y revise el importe

Material:	Aluminium - Grey (Aluminium 6082 - T651)	
Método de fabricación:	<input checked="" type="radio"/> Máquina CNC <input type="radio"/> Torno	
Cantidad:	1 Pieza/s a € 281,43 =	€ 281,43
Finish:	Desbarbado y chorro de gránulo suave	
Plazo de fabricación:	Por favor, seleccione una opción de plazo de fabricación.	

¿Necesita sus piezas antes de 14 agosto?
Seleccione el plazo de fabricación de 1 día y asegúrese usando nuestra entrega al día siguiente dentro de 49 h 40 min.

⚠ Debe seleccionar un plazo de fabricación antes de continuar.

Total EUR: € 281,43

ProtoQuote®

Presupuesto Mecanizado CNC

Preparado para: Seas (ES)
Número de presupuesto: 416699
Fecha del presupuesto: 5-Aug-2019
Nombre de la pieza: Capucha (rev: 1)
Dimensiones: 47.413 mm x 30.776 mm x 30.776 mm



Le agradecemos que nos brinde la oportunidad de poder presupuestar sus piezas. Esperamos poder trabajar pronto con usted en este proyecto. En caso de que tenga alguna pregunta, no dude en ponerse en contacto con nosotros en el teléfono +34 932 711 332.

① Confirme o modifique las especificaciones y revise el importe

Material:	Aluminium - Grey (Aluminium 6082 - T651)	
Método de fabricación:	<input checked="" type="radio"/> Máquina CNC <input type="radio"/> Torno	
Cantidad:	1 Pieza/s a € 218,88 =	€ 218,88
Finish:	Desbarbado y chorro de gránulo suave	
Plazo de fabricación:	Por favor, seleccione una opción de plazo de fabricación.	

¿Necesita sus piezas antes de 13 agosto?
Seleccione el plazo de fabricación de same día y asegúrese usando nuestra entrega al día siguiente dentro de 41 h 49 min.

⚠ Debe seleccionar un plazo de fabricación antes de continuar.

Total EUR: € 218,88

Figura 4.1.2. Cotización de Protolabs⁶².

⁶² Fabricación de prototipos rápidos: www.protolabs.es

A la vista del resultado final del proyecto con el elevado número de piezas, la cotización anterior no tiene sentido. He elaborado una hoja Excel⁶¹ para calcular de forma aproximada el presupuesto para fabricar 1 prototipo con pedido mínimo de 20 unidades.

En la siguiente tabla podemos ver el coste de la materia prima escalado para 20 unidades:

Código	Cantidad	Precio [€]	Subtotal [€]
r0_j20_a001-junta_torica-mbr70_3_0x1_00.prt	1	1,00	1,00
r0_j20_a002-junta_torica-mbr70_5_5x2_00.prt	2	1,00	2,00
r0_j20_a003-junta_torica-mbr70_17_0x2_00.prt	1	3,00	3,00
r0_j20_a004-junta_torica-mbr70_23_0x2_00.prt	2	3,00	6,00
r0_j20_a005-junta_torica-mbr70_36_2x1_00.prt	2	2,00	4,00
r0_j20_a006-junta_torica-mbr70_10_8x1_50.prt	1	1,00	1,00
r0_j20_a007-junta_torica-mbr70_8_0x0_50.prt	1	1,00	1,00
r0_j20_a008-junta_torica-mbr70_3_8x0_50.prt	12	2,00	24,00
r0_j20_a009-junta_torica-mbr70_3_6x0_50.prt	1	1,00	1,00
r0_j20_a010-junta_torica-mbr70_1_5x0_50.prt	1	1,00	1,00
r0_m00_a002-columna_burbujeo-modelo_2.prt	1	0,36	0,36
r0_t25_a001-tornillo_avellanado-torx_nr_t4-m1_6-l5.prt	3	2,00	6,00
r0_t25_a002-tornillo_avellanado-torx_nr_t4-m1_6-l3.prt	2	1,00	2,00
r0_t35_a001-tornillo_alomado-torx_nr_t4-m1_6-l3.prt	6	1,00	6,00
r0_t90_a001-muelle_compresion-1_45x3_05x0_15.prt	1	1,00	1,00
r0_t90_a002-muelle_compresion-3_52x6_30x0_32.prt	1	3,00	3,00
r0_t90_a003-muelle_compresion-3_60x5_60x0_40.prt	1	4,00	4,00
r0_t90_a004-muelle_compresion-9_14x12_70x0_74.prt	1	5,00	5,00
r0_u20_a001-tubo_acero-250_0x6_00x1_50.prt	1	8,00	8,00
r0_u70_a001-bola_esferica-2_0mm.prt	1	1,00	1,00
r0_v02_a001-electrovalvula_vias-2_2_nc.prt	1	50,00	50,00
r1_e01_b00_0001-bateria_litio-160mAh.prt	1	5,00	5,00
r1_e01_d00_0001-led-smd-0603.prt	6	0,10	0,60
r1_e02_p01_0001-pulsador-smd-4_0x4_0x1_5.prt	1	1,00	1,00
			Subtotal: 136,96
			IVA(21%): 28,76
			Total: 165,73

Tabla 4.1.2. Coste materia prima.

En la siguiente tabla podemos ver el coste de fabricación de las piezas mecánicas escalado para 20 unidades:

Código	Cantidad	Precio [€]	Subtotal [€]
p0_m10_a030.01-valvula_3-cuerpo.prt	1	50,00	50,00
p0_m10_a050.01-valvula_4-cuerpo.prt	1	50,00	50,00
p0_m10_a060.01-base-mainflow.prt	1	100,00	100,00
p0_m10_a070.01-base-tapa.prt	1	20,00	20,00
p0_m10_a080.01-base-fijacion.prt	1	70,00	70,00

Código	Cantidad	Precio [€]	Subtotal [€]
p0_m20_a002.01-bombona-base.prt	1	40,00	40,00
p0_m20_a003.01-bombona-casquete.prt	1	40,00	40,00
p0_m20_a004.01-bombona-tornillo_apriete.prt	1	20,00	20,00
p0_m20_a005.01-bombona-obturador.prt	1	10,00	10,00
p0_m20_a010.01-agitador-mainflow-entrada.prt	1	50,00	50,00
p0_m20_a011.01-agitador-mainflow-union.prt	1	40,00	40,00
p0_m20_a012.01-agitador-mainflow-salida.prt	1	45,00	45,00
p0_m20_a013.01-agitador-valvula_1-empaquetadura.prt	1	5,00	5,00
p0_m20_a014.01-agitador-valvula_1-garganta.prt	1	5,00	5,00
p0_m20_a015.01-agitador-fijacion-soporte.prt	1	40,00	40,00
p0_m20_a016.01-agitador-fijacion-cilindro.prt	1	10,00	10,00
p0_m20_a017.01-agitador-valvula_2-contacto_1.prt	1	6,00	6,00
p0_m20_a018.01-agitador-valvula_2-contacto_2.prt	1	6,00	6,00
p0_m20_a019.01-agitador-difusor-base.prt	1	30,00	30,00
p0_m20_a020.01-agitador-difusor-casquete.prt	1	40,00	40,00
p0_m20_a031.01-valvula_3-tornillo_ajuste.prt	1	20,00	20,00
p0_m20_a032.01-valvula_3-muelle-guia_superior.prt	1	20,00	20,00
p0_m20_a033.01-valvula_3-muelle-guia_inferior.prt	1	20,00	20,00
p0_m20_a034.01-valvula_3-empaquetadura.prt	1	50,00	50,00
p0_m20_a035.01-valvula_3-diafragma-membrana.prt	1	10,00	10,00
p0_m20_a036.01-valvula_3-diafragma-palanca.prt	1	15,00	15,00
p0_m20_a037.01-valvula_3-obturador-pieza_1.prt	1	10,00	10,00
p0_m20_a038.01-valvula_3-obturador-cierre.prt	1	10,00	10,00
p0_m20_a039.01-valvula_3-obturador-pieza_2.prt	1	20,00	20,00
p0_m20_a040.01-valvula_3-asiento.prt	1	20,00	20,00
p0_m20_a041.01-valvula_3-tapon.prt	1	40,00	40,00
p0_m20_a042.01-valvula-escala-fija.prt	2	40,00	80,00
p0_m20_a043.01-valvula-escala-movil.prt	2	60,00	120,00
p0_m20_a044.01-valvula-escala-embrague.prt	2	10,00	20,00
p0_m20_a051.01-valvula_4-empaquetadura.prt	1	50,00	50,00
p0_m20_a052.01-valvula_4-tapon.prt	1	40,00	40,00
p0_m20_a053.01-valvula_4-asiento.prt	1	20,00	20,00
p0_m20_a054.01-valvula_4-vastago.prt	1	30,00	30,00
p0_m20_a061.01-base-tapon.prt	12	5,00	60,00
p0_m20_a070.01-pulsador-base.prt	1	20,00	20,00
p0_m20_a071.01-pulsador-pipelight.prt	1	10,00	10,00
p0_m20_a072.01-pulsador-touch.prt	1	15,00	15,00
p0_m20_a073.01-pulsador-tuerca.prt	1	20,00	20,00
			Subtotal: 1397,00
			IVA(21%): 293,37
			Total: 1690,37

Tabla 4.1.3. Coste de fabricación de las piezas.

Por lo que el coste unitario total del prototipo será (pedido mínimo 20 unidades):

Concepto	Subtotal
Materia prima:	165,73 €
Fabricación de piezas:	1690,37 €
Total:	1856,10€

Tabla 4.1.4. Coste de fabricación.

Este presupuesto es puramente aproximativo ya que no está teniendo en cuenta aspectos importantes como son la mano de obra para el montaje, puesta a punto, precio de la electrónica, etc., ni aspectos relacionados con el balance de la instalación (BOP) como conste de servicios y tratamiento de los gases, subcontratación del microperforado y grabado láser, almacenaje (stockage), marketing y packaging, etc. Tampoco se ha aplicado un factor de corrección (típicamente x 2).

En la siguiente tabla muestro el número de piezas distintas y el número total de ellas para los tipos de piezas a fabricar y de materia prima:

Tipo de pieza	Piezas distintas	Piezas utilizadas
Materia prima:	24	51
Piezas a fabricar:	43	57
Total:	67	108

Tabla 4.1.5. Piezas del equipo.

En resumen, el inyector tiene 67 piezas distintas (entre materia prima y piezas que hay que fabricar) de las cuales 43 son piezas para mecanizar.

El número total de piezas en el escandallo del equipo es de 108 piezas, en las que no están contempladas las piezas de la electrónica.

5. Conclusiones

CONCLUSIONES SOBRE EL PROYECTO

Ya estoy al final del proyecto y al echar la vista atrás observo (ya con perspectiva) el trabajo realizado, este es:

Diseño 3D eficaz

Codificación del proyecto

El primer objetivo ha sido cumplido con creces. Por las decisiones tomadas en el modelo adoptado (ver apartado 2.5 en la página 45), se trata de un diseño complejo con muchas piezas por lo que ha sido absolutamente necesario establecer una codificación de archivos y directorios (ver anexo de codificación de referencias A-1) para mantener una estructura limpia y estable.

Documentación

Pero antes de realizar el modelado, ha sido necesaria una fuerte instrucción previa en la materia base del inyector: el campo de los reactores químicos⁶³.

- Pare ello ha sido necesaria una fuerte absorción de conceptos de química que he dejado plasmados (lo mejor que he podido) en el apartado de fundamentos teóricos 2.1.
- También he tenido que estudiar en profundidad los tipos de reactores químicos y sus partes realizando un estudio concienzudo de los fundamentos constructivos de los reactores (apartado 2.2).

Búsqueda de materia prima

Con la base técnica adquirida, hice una búsqueda activa de la materia prima a utilizar en el inyector: electroválvulas, baterías, reguladores de presión, juntas tóricas, muelles, tornillería, bombonas de gas de pequeño tamaño, suministradores de gases de calidad alimentaria, etc⁶⁴

Cada uno de estos temas es un mundo en sí mismo.

Estudio de mercado

Dentro de la búsqueda activa, realicé un estudio de mercado (ver apartado 2.3 en la página 34), con la intención de ver las líneas de diseño actuales y hasta donde se ha llegado en este tema. Se realizó la búsqueda en dos ámbitos distintos:

- Entorno doméstico: no he encontrado ningún equipo igual al presentado en este proyecto. Si que encontré equipos para preservar o dispensar el vino que pueden asemejarse a nivel constructivo y de diseño a nuestro inyector.
- Entorno industrial: en este ámbito sí que existen equipos de gasificación de vino que realizan la función del que pretendemos diseñar. Lógicamente, estos equipos no son portátiles como pretendemos.

⁶³ https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/ref_doc

⁶⁴ https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/raw_parts

En resumen, me basé en los equipos de preservación y dispensación de vino para la línea de diseño y estética, y utilicé los equipos industriales de gasificación para ver la estructura interna que debe tener nuestro inyector. Al fin y al cabo, el dispositivo diseñado en este proyecto no es más que un equipo de gasificación miniaturizado y llevado al ámbito doméstico, algo que nadie ha hecho nunca hasta la fecha.

Possibles soluciones

Con los conocimientos adquiridos y la documentación recopilada elaboré varias posibles soluciones (ver el apartado 2.4 en la página 41) para el diseño del inyector.

Desde el punto de vista académico y considerando que se trata de un proyecto final de máster en el que se valora el desempeño de las materias tratadas en los estudios, la solución adoptada fue el diseño completamente a medida de todas las partes del inyector. Ver la explicación detallada de la solución adoptada en el apartado 2.5 de la página 45.

La elección del diseño a medida conlleva asumir las siguientes consecuencias:

- Aumenta el tiempo para la realización del diseño.
- Mas tiempo para documentación
- Menor estabilidad.
- Prototipo inabarcable

Los dos primeros puntos han hecho que acumulara retrasos, respecto al diagrama de Gant presentado en la propuesta de proyecto⁶⁵.

El tercer punto hace referencia a que el supuesto inyector prototipo va a estar fabricado con piezas primera iteración. Sin calidad contrastada y susceptibles de mejoras.

Y el punto cuarto es claro, eliminamos inmediatamente la posibilidad de hacer un prototipo (objetivo 4) debido al enorme precio y tiempo que supondría.

Bondades del diseño 3D

El diseño presentado⁶⁶ cumple con el objetivo en cuestiones de calidad y eficacia:

- Diseño limpio y estructurado. Se ha generado una estructura de directorios y un nombramiento de archivos que lo permite.
- Reutilización de piezas, materia prima y estructuras de diseño. Se puede observar en la Tabla 4.1.5 de la página 133, que el número de piezas distintas utilizadas es 67 mientras que el número de piezas utilizadas en el diseño es de 108. Esto es un indicador de reutilización de piezas en el diseño. Se ha intentado siempre que ha sido posible reutilizar materia prima ya utilizada o piezas mecánicas ya diseñadas. Un ejemplo claro de reutilización de estructuras es la envolvente de las válvulas de regulación de presión (ver el apartado 3.4.4 en la página 108) y regulación de caudal (ver el apartado 3.4.5 en la página 118) que comparten la estructura externa pero interiormente son completamente distintas.

⁶⁵ https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_doc/pfm/propuesta

⁶⁶ https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_cad

- Modelos completamente restringidos. Tanto los ensamblajes como los bocetos están completamente restringidos.
- Restricciones de posicionamiento acotadas que permiten posicionar las partes móviles pudiendo configurar el sistema en cualquier estado.
- Se han generado varios ordenamientos de la estructura para visualizar correctamente el despiece de los conjuntos y estados de funcionamiento.
- Modelo de ensamblaje paramétrico, el caso del pulsador. Me pareció interesante modelar un ensamblaje paramétrico para el caso del pulsador. En cualquier momento podemos redimensionar el botón indicándole el diámetro deseado.
- Utilización de modelado por superficies, el caso de la fijación. La fijación o cánula de centrado del inyector, está íntegramente modelada utilizando los potentes comandos de modelado por superficies que ofrece el software de Siemens PLM NX.

Bondades de la documentación

No se estableció como objetivo parcial, pero me parece importante resaltar las cualidades de la documentación presentada:

- Documentación altamente referenciada, ver las 49 citas entre referencias bibliográficas y bibliografía al final de esta memoria. Hasta 70 notas al pie de página y multitud de referencias cruzadas.
- Figuras de calidad y montadas. Hasta 99 figuras se han insertado, muchas de ellas han sido montadas, editadas y ajustadas. Todas ellas con índice y origen referenciado.
- Más de 27 tablas con índice y origen referenciado.
- Hasta 31 fórmulas con su numeración específica para ser referenciadas en cualquier lado del documento.
- Sin párrafos copia-pegue. En las más de 35 000 palabras del documento, no hay ningún párrafo copiado y pegado salvo los entrecomillados y con indicación explícita de la fuente. Casi todo el texto es original o un resumen de la fuente a la que también referencia.

También quiero comentar que todo el trabajo ha quedado documentado a lo largo del tiempo en el repositorio⁶⁷ que he creado para el diseño y donde se ha podido seguir el discurso del proyecto en todo el periodo de actividad. En cualquier momento se puede regresar a un punto específico del diseño.

Simulación del proyecto mediante CFD-FEA

El segundo objetivo trataba la simulación de las partes sensibles mediante técnicas de elementos finitos para las partes mecánicas (análisis FEA) y para el comportamiento del flujo de gas en el inyector (mediante análisis CFD).

Los resultados han sido muy útiles y satisfactorios sirviendo para realimentar el diseño mecánico de la pieza.

⁶⁷ https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo

Se han simulado dos piezas sensibles a este tipo de análisis:

- La válvula V_1 de restricción por estrangulamiento de canal (ver el apartado 3.3.3.4 en la página 67).
- El difusor de burbujas D_1 (ver el apartado 3.3.2.4 en la página 86).

La válvula V_1

Mediante la simulación CFD, hemos sido capaces de hacer un estudio paramétrico (para varios diámetros de garganta trabajado a distintos flujos) que nos ha arrojado el mejor diámetro de garganta para conseguir la pérdida de presión necesaria a la entrada de la electroválvula V_2 .

Los resultados en cuanto a presión, velocidad, ruido y bloqueo de la garganta se pueden ver en detalle en la página 74.

El diámetro que mejor se ajusta a nuestras necesidades según los cálculos obtenidos por métodos numéricos es de $\varnothing 0,2\text{mm}$.

El difusor de burbujas D_1

Este es el elemento contactor entre la fase líquida y la gaseosa del cual depende directamente la eficacia en el inyector. Un mal dimensionado de esta pieza puede llevar a una mala o nula disolución del gas en el vino por lo que su diseño es determinante.

Resumiendo mucho toda la literatura consultada, los parámetros que determinan una mayor o menor eficacia del inyector que vamos a poder controlar en este dispositivo son el diámetro del orificio y el flujo del gas (proporcional a la velocidad a la salida del orificio). Estos dos parámetros determinan el tamaño inicial de la burbuja (Akita, et al., 1974) y el tamaño de la burbuja es inversamente proporcional al tiempo que está en contacto el gas-líquido (tiempo de reacción) y a la transferencia de masa del gas al líquido (absorción física debida a las diferencias de presión).

Para dimensionar correctamente el diámetro de los orificios del difusor, he utilizado la simulación CDF para generar un escenario con distintos flujos de gas y posteriormente he inyectado partículas de gas con distintos diámetros para ver como son sus trayectorias.

Finalmente he analizado estas trayectorias y realizado cálculos estadísticos para ver que diámetro nos ofrecía una mejor distribución de gas en el dominio de la reacción.

Los resultados de tamaño de burbuja en función de diámetro y flujo los podemos ver en la Tabla 3.3.5, de la página 92 y la del análisis de partículas en la Tabla 3.3.6 de la página 96.

Software utilizado

Se estudiaron varias opciones a la hora de seleccionar un software para las simulaciones⁶⁸ ANSYS Fluent, blue CFD u OpenFoam, además de la propia simulación avanzada de PLM NX, pero finalmente opté por integrar en PLM NX una versión de evaluación de FloEFD por su rápida curva de aprendizaje.

En el directorio⁶⁸ podemos toda la documentación sobre el programa utilizado.

⁶⁸ https://github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_sw

CONCLUSIONES PERSONALES

Es momento de hacer una valoración personal de lo que ha supuesto este proyecto para mí y que dejo plasmado como respuesta a las siguientes preguntas:

Qué me ha aportado el proyecto

El estudio previo y la documentación acopiada para afrontar este diseño, has sido para mí una fuente de aprendizaje que ha aportado muchos e interesantes conocimientos.

Este proyecto ha sido para mí como un “rasca y gana”, cada tema que rascaba un poco: me aparecían nuevos y excitantes aspectos a abordar.

Para mí ha sido un placer conocer un poco los temas tratados: válvulas, reactores químicos, juntas tóricas, muelles, tornillería, industria en torno a la enología, simulaciones cfd, etc.

Sin olvidarme de los nuevos conocimientos que me han aportado los módulos de estos estudios y que son de gran interés para mí.

Que limitaciones he tenido

A nivel personal, me he encontrado limitado en cuanto al tiempo de dedicación por otras cuestiones de mayor prioridad.

La elección de un diseño completamente a medida y documentarlo hasta el final han influido negativamente en este aspecto.

Al respecto de esta limitación, me hubiera venido bien una licencia “stand alone” que permitiera trabajar sin conexión a internet. Los sitios oficiales con red wifi no soportan la comunicación por los puertos del servidor de licencias.

A nivel de software, he echado en falta el módulo “shape studio” (no soportado por la licencia de estudiante) a la hora de modelar alguna pieza. El software de Siemens es muy completo y potente pero su motor gráfico “parasolid” tiene un desesperante retardo en determinados comandos. De todas formas, tengo que decir que me he acabado acostumbrando y que la potencia del software es muy sobresaliente por lo que seguiré utilizándolo en un futuro (si es posible).

Que haría de manera diferente si tuviera que empezar de nuevo

Haría un modelo simplificado.

Que ha cambiado durante el desarrollo

Tras visualizar el seminario “Aplicaciones de Simulación de Fluidos”⁶⁹ impartido por Antonio Gómez⁷⁰, decidí dedicar más tiempo a las simulaciones CFD del proyecto en detrimento de otros objetivos.

Me pareció y creo que así es, que CFD es una herramienta muy útil en cualquier tipo de diseño y me apetecía explorar un poco más en detalle esta cuestión. Los resultados y la experiencia han sido muy buenos. Ver los apartados 3.3.3.4 y 3.3.2.4.

⁶⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=6EE0RELZqvU>

⁷⁰ <http://www.nabladot.com/>

6. Limitaciones y prospectiva

Limitaciones del proyecto

El dispositivo tiene una limitación implícita relacionada con la baja fiabilidad de prototipos iniciales. Esta falta de fiabilidad se debe fundamentalmente a que las válvulas (que son elementos muy preciosos) las he diseñado completamente desde cero por lo que estaríamos utilizando piezas que no han sido probadas nunca que lógicamente no tienen la fiabilidad de una válvula comprada a un gran fabricante cuyo control de calidad asegura una fiabilidad dentro de unos rangos (según calidades).

Esta limitación es fácilmente superable en las primeras interacciones de diseño y utilizando las potentes herramientas de diseño asistido (simulaciones, análisis, etc.) podemos minimizar esta limitación y adelantar la salida del producto.

Prospectiva

La idea original de este proyecto me la comentó Diego Embid, hoy en día es difícil encontrar un dispositivo útil que no esté ya inventado... y esto es lo que pasa con el inyector de gases tratado en este proyecto. No existe nada parecido en el mercado actual con las características del que he diseñado.

Esto puede ser bueno o malo. Bueno porque es disruptivo o malo porque a lo mejor no tiene sentido; este estudio demuestra que el sistema sí tiene sentido y sí es posible fabricarlo.

El fin de este dispositivo es la modificación del sabor del vino al mezclarlo con distintos gases, ¿es esto cierto?, ¿afectan de manera determinante?, ¿de qué forma afecta el gas al olor y/o sabor?, ¿qué combinaciones de vino-gas hay que hacer y en qué proporción?

Todos estos temas hay que aclararlos para ver el futuro de este dispositivo y estos temas se aclaran haciendo un dispositivo funcional para pruebas.

Así pues, considero que esta sería la evolución lógica de este dispositivo, hacer algo que funcione para dar respuesta a las preguntas formuladas.

Como continuaría

Estas son algunas de los puntos que metería en el proyecto si dispusiera de más tiempo para la realización:

- Simulación FEA de la bombona de gas. Asegurarnos que el grosor de las paredes soporta la presión del gas en su interior
- Simulación CFD de la válvula de regulación de presión. Ver cómo se comporta el flujo y dimensionar adecuadamente el obturador y el asiento. Calcular la presión ejercida en el sensor para dimensionar el muelle y la fuerza de carga que ejerce sobre el elemento sensor.
- Simulación CFD de la válvula de regulación de flujo. Ver cómo se comporta el flujo dentro de esta válvula y dimensionar adecuadamente el tamaño del elemento regulador (conjunto vástago-asiento) para el flujo dentro del rango de trabajo.

● Referencias Bibliográficas

- Akita, Kiyomi and Fumikate, Yoshida. 1974.** *Bubble Size, Interfacial Area, and Liquid-Phase Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns.* Tokushima; Kyoto : Kyoto University and Tokushima University, 1974. p. 8. Vol. 13. 1.
- Alcalá, Facultad de Farmacia. Universidad de. 1993.** Química general. Los gases, teoría cinético molecular. [Online] 1993. http://www3.uah.es/edejesus/resumenes/QG/Tema_6.pdf.
- Aragonesa, Tornilleria. 2019.** Todo tipo de tornillos. *Tabla de rosca estandar.* [Online] 2019. http://tornilleraaragonesa.com/archivos/info_tecnica/esp/tabla_rosacas.pdf.
- Atkins, Peter and De Paula, Julio. 2008.** Atkins. *Química Física.* s.l. : Editorial Panapericana, 2008. ISBN 9789500612487.
- Bakkerr, Andre. 2002-2006.** <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/>. *Lecturas de diseños con Fluent.* [Online] 2002-2006. <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/15-dpm.pdf>.
- Buwa, Vivek V. and Ranade, Vivek V. 2002.** *Dynamics of gas-liquid flow in a rectangular bubble column: experiments and single-multi-group CFD simulations.* Pune, India : Chemical Engineering Science, 2002. Vol. 57, Industrial Flow Modelling Group (iFMg). 4715-4736.
- Camacho Soto, Hernán and Alvarado Aguilar, Patricia. 1994.** Caracterización de una columna de burbujeo. San José de Costa Rica : s.n., 1994.
- Cashco. 2019.** Fluid Flow Basics of Throttling Valves. <https://www.cashco.com/>. [Online] 2019. https://www.controlglobal.com/assets/Media/MediaManager/RefBook_Cashco_Fluid.pdf.
- Cidead. 2019.** Los Gases y la Teoría Cinética. [Online] 2019. http://recursostic.educacion.es/newton/web/materiales_didacticos/EDAD_3eso_gases_y_teoria_cinetica/impresos/quincena2.pdf.
- Cruz, Franciso Javier Arregui de la, et al. 2017.** *Apuntes de mecánica de fluidos.* Valencia : Universidad Politecnica de Valencia, 2017. 78-84-9048-359-6.
- D. Giavendoni, María and A. Saita, Fernando. 1997.** Estudio del Desplazamiento de una Interfase Líquido-Gas Usando el Método de Elementos Finitos. Casos Plano y Axiximétrico. Barcelona : Univertstat Politecnica de Catalunya, 1997, Vols. 13,4.
- Danckwerts, P.V. 1950.** Absorption by simultaneous diffusion and chemical reaction. *Transactions of the Faraday Society.* 1950, Vol. 46, pp. 385-390.
- Díaz Martín, Ricardo . 2001.** *Estudio de Flujo en Reactores con tres fases por Simulación.* Madrid : Universidad Complutense, 2001. ISBN: 84-669-1820-5.
- Dirdal, Inger Karin. 2015.** *Tesis: A mathematical model for flow of gas-liquid mixture in a vertical pipe.* s.l. : Universidad de Stavanger, 2015.
- E. Brennen, Christopher. 2005.** *Fundamentals of Multiphase Flows.* Pasadena, California : California Institute of Technology, Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521 848040.
- Erica. 2019.** Polímeros plásticos. *Plásticos técnicos.* [Online] 2019. <http://www.erica.es/web/plasticos-tecnicos/>.
- FloEFD. 2018.** FloEFD Tutorial. Software Versión 17. [Online] Mentor, 2018. <http://hebergement.u-psud.fr/master2dfe/IMG/pdf/tutorial.pdf>.
- Fluent. 2001.** Manual de Fluent ANSYS. <http://www.afs.enea.it>. [Online] 2001. <http://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/>.

- Gitbook.** 2016. Mixtures. [Online] 2016.
https://legacy.gitbook.com/book/qknowbooks/jhs_2_science-mixtures/details.
- Higbie, R.** 1935. The Rate of Absorption of a Pure Gas into a Still Liquid during Short Periods of Exposure. s.l. : Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 1935, Vol. 31, pp. 365-389.
- Iborra, Montserrat, Telero, Javier and Cunill, Fidel.** 2013. Reactores multifásicos, apuntes. Barcelona : Universidad de Barcelona, 2013.
- J. Pérez, Renee, A. Heidemann, Robert and González Partida, Eduardo.** 2009. Modelo teórico para el cálculo de las solubilidades mutuas entre gases no-polares y agua con sales disueltas. México : s.n., 2009, Vol. 61, pp. 325-337.
- Jeifetz, L.G, et al.** 2011. Simulación de un reactor monolítico COPrOx. Cuarto Congreso Nacional – Tercer Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía – HYFUSEN 2011. Argentina : Ciudad Universitaria Buenos Aires, 2011.
- Juan A., Cornesa Ferrer.** 2019. Reactores multifásicos. Diseño de reactores heterogéneos. Alicante : Universidad de Alicante, 2019.
- Li, Guang, Yang, Xiaogang and Dai, Gance.** 2009. *CFD simulation of effects of the configuration of gas distributors on gas–liquid flow and mixing in a bubble column*. China : Chemical Engineering Science, 2009. p. 13. Vol. 64. 5104-5116.
- Linde, Abello.** 2019. Gases Industriales. *Gases con Calidad Alimentaria*. [Online] 2019.
http://www.abellolinde.es/es/products_and_supply/food_grade_gases/index.html.
- M. White, Frank.** 1979. *Mecanica de Fluidos*. Madrid : McGraw-Hill, 1979. ISBN: 84-481-4076-1.
- Martín del Campo, Lopez Eduardo.** 2015. Reactores Multifásicos, Columnas de Burbujeo. *Repositorio Institucional*. Facultad de Química, 2015.
- Masterton, Slowinski and Stanistski.** 1989. *Química general superior*. s.l. : McGraw-Hill, 1989.
- Metálicos, Carburos.** 2019. Inyecvin. *Soluciones para el sector enológico*. [Online] Grupo Air Products, 2019. http://www.carburos.com/microsite/es/enologia/equipos_inyecvin.htm.
- Ogawa, Shinji, et al.** 1986. Gas-liquid mass transfer in the jet reactor with liquid jet ejector. Osaka : Osaka University, Toyonaka 560, 1986, Vol. 16.
- Pazmiño Mayorga, Jaime A., et al.** 2017. *Determinación del coeficiente de descarga de un prototipo tubo de Venturi construido para uso académico en laboratorio*. [ed.] Polo del conocimiento. Ecuador : Universidad de Ecuador, 2017. Vol. 2. ISSN: 2550 - 682X.
- Piedra-Díaz, M., et al.** 2008. Caracterización hidrodinámica de una columna de burbujeo agua aire. [ed.] InSTEC. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Cuba : s.n., 2008, Vol. 12, 1, pp. 27-36.
- 2019.** Reactores Multifásicos, Columnas de Burbujeo. 2019.
- Rendón, et al.** 2018. youtube.com. [Online] 2018.
<https://www.youtube.com/watch?v=cOrB4Wi--Vk>.
- Reyes Fonseca, Roberto Carlos and Fernández Vargas, Jorge Adán.** 2013. www.grupossc.com. [Online] 2013. XII Congreso Internacional de innovación y diseño basado en simulación por computadora.
https://www.grupossc.com/ponencias/ponencia_510116111253.pdf.
- Sanyal, Jayanta, et al.** 1999. *Numerical simulation of gas-liquid dynamics in cylindrical bubble column reactors*. [ed.] Chemical Engineering Science. St. Louis : Washington University, 1999. Vol. 54. 5071-5083.
- ScientDirect.** 2019. Liquid-Gas Mixture. [Online] 2019.
<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/liquid-gas-mixture>.

- Seas. 2019.** Máster en Diseño Mecánico y Producción con Sistemas CAD-CAM-CAE. *Documentación de las modulos.* [Online] Grupo San Valero y Universidad Católica de Ávila, 2019. www.seas.es.
- Shahda, Joseph. 2010.** Predicting Control Valve Noise in Gas and Steam Applications. www.dresser.com. [Online] ControlGlobal.com, 3 11, 2010. https://www.plantservices.com/assets/Media/1003/WP_Valve.pdf.
- Stankiewicz, A. 2019.** Multiphase Reactors. s.l. : Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), 2019, Vol. III.
- Stewart, C. and Hessami, M. 2005.** A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration. *Energy Conversion and Management*. 2005, Vol. 463, 3, pp. 403-420.
- Swagelok. 2019.** Cilindros de tomo de muestras en miniatura. [Online] 2019. <https://www.swagelok.com/es-ES/product/Sample-Cylinders/Miniature-Sample-Cylinders>.
- Tamajón Álvarez, Francisco Javier. 2015.** *Tratamiento de Corrientes Gaseosas mediante Absorción en Disoluciones Organo-Acuosas de N-Metildietanolamina*. Vigo : Universidad de Vigo, 2015.
- Taylor, G.I. and Davies, R.M. 1950.** The Mechanics of Large Bubbles Rising Through Liquids and Through Liquids in Tubes. [ed.] Actas de la Real Sociedad de Londres. Londres : Actas de la Real Sociedad de Londres, 1950, Vol. Serie A. 200, pp. 375-390.
- ThoughtCo. 2019.** What is a Mixture in Science. [Online] 29 Julio 2019. <https://www.thoughtco.com/mixture-definition-chemistry-glossary-606374>.
- tvL. 2019.** Calculadora: Rango de Flujo de Aire a Través de un Orificio. [Online] 2019. <https://www.tlv.com/global/LA/calculator/air-flow-rate-through-orifice.html>.
- Valtek. 2019.** Control Valve Sizing. *cti controltech*. [Online] <https://www.cti-ct.com/>, 2019. https://www.cti-ct.com/article_90_Control-Valve-Sizing.cfm.
- Whitman, W.G. 1962.** The two film theory of gas absorption. *International Journal*. 1962, Vol. 5, 5, pp. 429-433.

● Bibliografía Utilizada

- Atkins, Peter y De Paula, Julio. 2008.** *Atkins. Química Física.* s.l. : Editorial Panamericana, 2008. ISBN 9789500612487.
- Bakkerr, Andre. 2002-2006.** <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/>. *Lecturas de diseños con Fluent.* [En línea] 2002-2006. <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/15-dpm.pdf>.
- Cruz, Franciso Javier Arregui de la, et al. 2017.** *Apuntes de mecánica de fluidos.* Valencia : Universidad Politécnica de Valencia, 2017. 78-84-9048-359-6.
- E. Brennen, Christopher. 2005.** *Fundamentals of Multiphase Flows.* Pasadena, California : California Institute of Technology, Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521 848040.
- Erica. 2019.** Polímeros plásticos. *Plásticos técnicos.* [En línea] 2019. <http://www.erica.es/web/plasticos-tecnicos/>.
- Fluent. 2001.** Manual de Fluent ANSYS. <http://www.afs.enea.it>. [En línea] 2001. <http://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/>.
- Higbie, R. 1935.** The Rate of Absorption of a Pure Gas into a Still Liquid during Short Periods of Exposure. s.l. : Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 1935, Vol. 31, págs. 365-389.
- Iborra, Montserrat, Telero, Javier and Cunill, Fidel. 2013.** Reactores multifásicos, apuntes. Barcelona : Universidad de Barcelona, 2013.
- M. White, Frank. 1979.** *Mecánica de Fluidos.* Madrid : McGraw-Hill, 1979. ISBN: 84-481-4076-1.
- Masterton, Slowinski y Stanistski. 1989.** *Química general superior.* s.l. : McGraw-Hill, 1989.
- Seas. 2019.** Máster en Diseño Mecánico y Producción con Sistemas CAD-CAM-CAE. *Documentación de las modulos.* [En línea] Grupo San Valero y Universidad Católica de Ávila, 2019. www.seas.es.
- Stankiewicz, A. 2019.** Multiphase Reactors. s.l. : Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), 2019, Vol. III.
- Tamajón Álvarez, Francisco Javier. 2015.** *Tratamiento de Corrientes Gaseosas mediante Absorción en Disoluciones Organo-Acuosas de N-Metildietanolamina.* Vigo : Universidad de Vigo, 2015.
- Whitman, W.G. 1962.** The two film theory of gas absorption. *International Journal.* 1962, Vol. 5, 5, págs. 429-433.

● Anexos

A-1. Codificación del proyecto

Debido a la complejidad y gran cantidad de piezas de este proyecto, es imprescindible establecer unas reglas claras a la hora de generar, ordenar y dar nombre a la estructura y ficheros.

Las reglas de codificación que he establecido para este proyecto las he ido modificando de forma dinámica según iban apareciendo las necesidades y las recojo en el fichero "codificación.txt"⁷¹ en el repositorio del proyecto y que resumo de forma simplificada en las siguientes tablas:

Formato del código:		[aa] xx_yyy_zzzz-descripción
Campos		
Campos	[aa]	Alfanumérico, localización de almacén. Opcional.
	xx	Alfanumérico, indica la familia principal.
	yyy	Alfanumérico, indica la subfamilia.
	zzzz	Alfanumérico, indica el tipo de contador y el contador.
	descripción	Alfanumérico, una descripción del contenido.

A1.1. Codificación de archivos. Campos.

Tipo de almacén:		[aa]
Valores		
Valores	vx	Almacén virtual-x Datos en la nube, repositorios, medios digitales.
	mx	Almacén de mecánica-x Espacio físico dedicado a almacenar mecánica.
	ex	Almacén de electrónica-x Espacio físico para almacenar electrónica.
	sx	Almacén de pedidos-x Espacio físico para guardar pedidos.

A1.2. Codificación de archivos. Tipos de almacén.

El campo de almacén es opcional.

Siempre que ha sido posible y ha dependido de mí, he normalizado los nombres de archivo siguiendo la filosofía UNIX, que recomienda la no utilización de mayúsculas y evitar los caracteres especiales como ñ, vocales acentuadas o símbolos especiales como \$, %, espacios, etc.

En las siguientes tablas podemos ver una descripción de las familias principales y de las subfamilias generadas para este proyecto:

⁷¹ Codificación: github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/blob/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_cad/codificacion.txt

Familias principales:			XX
Mecánica	r0	Materia prima	Piezas compradas. Tornillos, muelles, etc
	s0	Semifabricado	Subconjuntos que contienen varias piezas y/o materia prima.
	p0	Fabricado	Piezas que fabricamos.
	d0	Equipo	Dispositivo funcional.
	x0	Documentación	Manuales, certificaciones, etc.
Electrónica	r1	Materia prima	Componentes comprados. Resistencias, pcb, etc.
	s1	Semifabricado	Sin terminar de montar. pcb y componentes de una cara
	p1	Fabricado	Electrónica montada
	d1	Equipo	Dispositivo electrónico final.
	x1	Documentación	Listas de componentes, gerbers para fabricación, etc.
Electricidad	r2	Materia prima	Cableado, conectores, contactores, etc.
	s2	Semifabricado	Cable con terminal, etc.
	p2	Fabricado	Latiguillos, cableados, mazos de cable, etc.

A1.3. Codificación de archivos. Familias principales.

Subfamilias:			yyy
Mecánica	r0	Materia prima	piezas compradas: tornillos, muelles, etc.
	r0	t00	tornillería-genérica
	r0	t10	tornillo-cabeza_cilíndrico
	r0	t20	tornillo-cabeza_avellanado
	r0	t21	tornillo-cabeza_avellanado-hendidura plana
	r0	t22	tornillo-cabeza_avellanado-hendidura philips
	r0	t23	tornillo-cabeza_avellanado-hendidura pozidrive
	r0	t24	tornillo-cabeza_avellanado-hendidura hexagonal
	r0	t25	tornillo-cabeza_avellanado-hendidura torx
	r0	t26	tornillo-cabeza_avellanado-hendidura torx seguridad
	r0	t30	tornillo-cabeza_alomado
	r0	t40	tornillo-cabeza_hexagonal
	r0	t50	tornillo-cabeza_bajo_perfil
	r0	t60	tornillo-cabeza_esparago
	r0	t70	arandela-circular
	r0	t71	arandela-retención
	r0	t80	tuerca-hexagonal
	r0	t81	tuerca-bajo_perfil

r0	t90	muelle-compresión
r0	t91	muelle-tracción
r0	u00	ejes, tubos, perfiles, chavetas, pasadores, rodamientos, bolas
r0	u10	ejes
r0	u20	tubos
r0	u30	perfiles
r0	u40	chavetas
r0	u50	pasadores
r0	u60	rodamientos
r0	u70	bolas
r0	j00	junta-genérica
r0	j10	junta-rectangular
r0	j20	junta-tórica
r0	j30	junta-cónica
r0	v00	válvula-genérica
r0	v10	válvula-vías
r0	v20	válvula-aguja
r0	v30	válvula-reguladora_presión
r0	v40	válvula-reguladora_flujo
r0	v50	válvula-estrangulación
s0	Semifabricado	subconjuntos que contienen varias piezas y/o materia prima.
p0	Fabricado	Piezas que fabricamos.
p0	m00	Mecánico-genérico
p0	m10	pieza-fresada
p0	m20	pieza-torneada
p0	m30	pieza-taladrada
p0	m40	pieza-plegada
d0	Equipo	Dispositivo funcional.
x0	Documentación	Manuales, certificaciones, etc.
r1	Materia prima	Componentes comprados. Resistencias, pcb, etc.
	e00	Electrónica genérica.
	b00	Electrónica-componentes pasivos - baterías
	p00	Electrónica-componentes pasivos - pulsadores smd
	p01	Electrónica-componentes pasivos - pulsadores thd

A1.4. Codificación de archivos. Subfamilias mecánicas.

		Subfamilias:	yyy
Electrónica	s1	Semifabricado	Sin terminar de montar. pcb+componentes_top
	p1	Fabricado	Electrónica montada
	d1	Equipo	Dispositivo electrónico final.
	x1	Documentación	Listas de componentes, gerbers para fabricación, etc.
	r2	Materia prima	Cableado, conectores, contactores, etc.
	s2	Semifabricado	Cable con terminal, etc.
	p2	Fabricado	Latiguillos, cableados, mazos de cable, etc.

A1.5. Codificación de archivos. Subfamilias electrónicas.

Ejemplos de códigos:

r0_m00_a001-columna_burbujeo-modelo_1.ptr
Familia: r0 - Materia prima de tipo mecánico. Subfamilia: m00 - Objeto mecánico genérico. Contador: a001 - El primer objeto de este tipo. Descripción: columna_burbujeo-modelo_1.
s0_m00_a001-agitador-modelo_1.ptr
Familia: s0 – Subconjunto mecánico. Subfamilia: m00 - Objeto mecánico genérico. Contador: a001 - El primer objeto de este tipo. Descripción: agitador-modelo_1.
d0_m00_a001-reactor_quimico-modelo_1.ptr
Familia: d0 – Equipo mecánico. Subfamilia: m00 - Objeto mecánico genérico. Contador: a001 - El primer objeto de este tipo. Descripción: reactor_quimico-modelo_1.

A1.6. Codificación de archivos. Ejemplos.

He realizado un diseño fuertemente estructurado en conjuntos, subconjuntos, piezas y materia prima. Todos los archivos CAD del proyecto se encuentran en el repositorio del proyecto⁷² que por claridad está estructurado en directorios, según se recoge en la siguiente tabla:

⁷² Ficheros CAD: github.com/0dr4d3k/pfm_vimo/tree/dev/M40001_vimo_dev/M40001_vimo_dev_cad/3d_device

Directorio	Descripción
3d_mec_dev	conjuntos - dispositivos finales
3d_mec_dev	conjuntos - dispositivos finales
3d_mec_prt	piezas - piezas diseñadas
3d_mec_raw	piezas - materia prima

A1.7. Estructuración de directorios.

En cada directorio del proyecto podemos encontrar un archivo “dit.txt” que nos indica el contenido de las subcarpetas del directorio actual.

Cómo arrancar NX para que acceda a la estructura de directorios

Para que NX vaya a buscar los archivos del proyecto en la ruta correcta simplemente tenemos que posicionarnos el directorio del dispositivo, directorio “3d_mec_dev” y hacer doble click sobre el archivo “d0_m00_a001.01-reactor_bifasico-modelo_1.asm.prt”.

Al arrancar NX desde este directorio, se carga el archivo de preferencias “load_options.def” donde he definido las rutas de búsqueda relativas al directorio actual para los componentes del inyector indicadas en la tabla A1.7.

A-2. Tablas utilizadas de diseño

A-2.1. Tabla de tolerancias dimensionales

Schwarze Zahlen = Spiele
Grüne Zahlen = Übermaße

Passungen nach DIN 7157 sind bevorzugt anzuwenden.

DEUTSCHE NORMEN												ISO-Passungen für Einheitsbohrung											
DIN 7154												ISO-Passungen für Einheitsbohrung											
Blatt 2												Blatt 2											
ISO-Passungen aus Toleranzfeldern nach DIN 7157 ¹⁾												ISO-Passungen aus Toleranzfeldern nach DIN 7157 ¹⁾											
Toleranzfelder der Reihen 1, 2 und 3												Toleranzfelder der Reihen 1, 2 und 3											
μm +400 +300 +200 +100 0 -100 -200 -300 -400												μm +400 +300 +200 +100 0 -100 -200 -300 -400											
Paßlochtoleranzfelder												Paßlochtoleranzfelder											
Grundfläche dargestellte Paßlochtoleranzfelder sind für Nennmaß 40 mm nicht vorhanden												Grundfläche dargestellte Paßlochtoleranzfelder sind für Nennmaß 40 mm nicht vorhanden											
Paßlochtoleranzfelder												Paßlochtoleranzfelder											
Paßlochtoleranzfelder für Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												Paßlochtoleranzfelder für Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
Spiel												Spiel											
Paßlochtoleranzfelder für Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												Paßlochtoleranzfelder für Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits for the hole basic system. Tolerances of fit (electrodes and interference) Ajustements ISO pour le système de tige fondamentale. Tolérances d'ajustement (jus et serrage)												ISO-Fits for the hole basic system. Tolerances of fit (electrodes and interference) Ajustements ISO pour le système de tige fondamentale. Tolérances d'ajustement (jus et serrage)											
Paßlochtoleranzfelder für Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												Paßlochtoleranzfelder für Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
Spiel und Übermaße in μm												Spiel und Übermaße in μm											
Paßlochtoleranzfelder für Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												Paßlochtoleranzfelder für Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Toleranzen DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Toleranzen DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2												ISO-Fits für die Reihen 1, 2 und 3 siehe DIN 7154 Blatt 1 und Blatt 2											
ISO-Fits																							

A-2.2. Diámetros y roscas

M

Rosca métrica ISO DIN 13

Metric ISO thread DIN 13

Metric ISO thread DIN 13 • Rosca métrica ISO DIN 13

Rosca Thread	Paso Pitch	Ø Broca Ø Drill	Rosca Thread	Paso Pitch	Ø Broca Ø Drill
M 1	0,25	0,75	M 18	2,5	15,5
M 1,1	0,25	0,85	M 20	2,5	17,5
M 1,2	0,25	0,95	M 22	2,5	19,5
M 1,4	0,30	1,1	M 24	3	21
M 1,6	0,35	1,25	M 27	3	24
M 1,7	0,35	1,35	M 30	3,5	26,5
M 1,8	0,35	1,45	M 33	3,5	29,5
M 2	0,40	1,6	M 36	4	32
M 2,2	0,45	1,75	M 39	4	35
M 2,3	0,40	1,85	M 42	4,5	37,5
M 2,5	0,45	2,05	M 45	4,5	40,5
M 2,6	0,45	2,1	M 48	5	43
M 3	0,5	2,5	M 52	5	47
M 3,5	0,6	2,9	M 56	5,5	50,5
M 4	0,7	3,3	M 60	5,5	54,5
M 4,5	0,75	3,7	M 64	6	58
M 5	0,8	4,2	M 68	6	62
M 6	1	5	M 70	6	64
M 7	1	6	M 72	6	66
M 8	1,25	6,8	M 75	6	69
M 9	1,25	7,8	M 76	6	70
M 10	1,5	8,5	M 80	6	74
M 11	1,5	9,5	M 85	6	79
M 12	1,75	10,2	M 90	6	84
M 14	2	12	M 95	6	89
M 16	2	14	M 100	6	94

A2.1. Tabla de roscas métrica estándar. Fuente Tornillería Aragonesa.

A-2.3. Diámetros y roscas paso fino

Rosca métrica fino ISODIN 13

Metric Ane ISO thread DIN 13

MF

Rosca Thread	Paso Pitch	ØBroca Ø Drill	Rosca Thread	Paso Pitch	ØBroca Ø Drill	Rosca Thread	Paso Pitch	ØBroca Ø Drill
M 1	0,2	0,8	M 22	1,5	20,5	M52	3	49
M 1,1	0,2	0,9		2	20		4	48
M 1,2	0,2	1	M 24	1	23	M55	1,5	53,5
M 1,4	0,2	1,2		1,5	22,5		2	53
M 1,6	0,2	1,4		2	22		3	52
M 1,7	0,2	1,5	M 25	1,5	23,5		4	51
M 1,8	0,2	1,6		2	23	M 56	1,5	54,5
M 2	0,25	1,75	M 26	1,5	24,5		2	54
M 2,2	0,25	1,95		2	25		3	53
M 2,3	0,25	2,05	M 27	1,5	25,5	M 60	4	52
M 2,5	0,35	2,15		2	25		1,5	58,5
M 2,6	0,35	2,25	M 28	1,5	26,5	M 64	2	58
M 3	0,35	2,65		2	26		3	57
M 3,5	0,35	3,15	M 30	1,5	28,5	M 68	4	56
M 4	0,35	3,65		2	28		1,5	62,5
	0,5	3,5	M 32	1,5	30,5	M 70	2	62
M 4,5	0,5	4		2	30		3	61
M 5	0,5	4,5	M 33	1,5	30,5	M 72	4	60
M 6	0,5	5,5		2	31		1,5	66,5
	0,75	5,25	M 35	1,5	33,5	M 75	2	66
M 7	0,5	6,5		3	30		3	65
	0,75	6,25	M 36	1,5	34,5	M 76	4	64
M 8	0,75	7,25		2	34		2	68
	1	7	M 38	1,5	36,5	M 80	3	67
M 9	0,75	8,25		2	36		4	66
	1	8	M 39	1,5	37,5	M 85	2	70
	0,75	9,25		2	37		3	69
M 10	1	9	M 40	1,5	38,5	M 90	4	68
	1,25	8,75		2	38		2	73
M 11	1	10	M 42	1,5	40,5	M 95	3	72
	1	11		2	40		4	71
M 12	1,25	10,75	M 45	1,5	43,5	M 100	2	74
	1,5	10,5		2	43		3	73
M 13	1	12	M 48	1,5	46,5		4	72
	1	13		2	46		2	78
M 14	1,25	12,75	M 50	1,5	48,5		3	77
	1,5	12,5		2	48	M 80	4	76
M 15	1	14	M 52	1,5	50,5		2	83
	1,5	13,5		3	47	M 85	3	82
M 16	1	15		1,5	50,5		4	81
	1,5	14,5		2	50	M 90	2	88
M 17	1,5	15,5					3	87
	1	17					4	86
M 18	1,5	16,5				M 95	2	93
	2	16					3	92
M 20	1	19					4	91
	1,5	18,5				M 100	2	98
	2	18					3	97
M22	1	21					4	96

A2.2. Tabla de roscas métrica paso fino. Fuente Tornillería Aragonesa.

Metric Ane ISO thread DIN 13 • Rosca métrica fino ISO DIN 13

A-2.4. Rugosidades según acabados superficiales

Proceso	Rugosidad promedio en micrómetros - Ra μm											
	5 0	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.80	0.40	0.20	0.10	0.05	0.025
Arenado												
Aserrado												
Brochado												
Brñido												
Cepillado												
Cizallado												
Corte con soplete												
Corte electroquímico												
Corte láser												
Electroerosión												
Estampado												
Esmerilado												
Extrusión												
Forjado												
Fresado												
Fundición a cera perdida												
Fundición a presión												
Fundición en arena												
Fundición en coquilla												
Granillado												
Laminado en caliente												
Laminado en frío												
Lapidado												
Limado												
Mandrilado												
Morfajado												
Oxicorte												
Pulido												
Recalcado												
Rectificado												
Superacabado												
Taladrado												
Torneado												
Trefilado												
Aplicación frecuente			Aplicación menos frecuente									

PROCESO	ACABADO DE LA SUPERFICIE (μm)		
FUNDICIÓN EN ARENA	POBRE	12-25	N10-N12
LAMINADO EN FRÍO	BUENO	1-3	N6-N8
EXTRUSIÓN EN FRÍO	BUENO	1-4	N6-N9
TALADRADO	MEDIANO	1.5-6	N7-N9
FRESADO	BUENO	1-6	N7-N9
TORNEADO	BUENO	0.5-6	N6-N9
PULIDO	EXCELENTE	0.1-0.5	N3-N5

1.- Tablas de rugosidades según acabado superficial
 2.- Equivalencia entre Valores de Ra y Grados de rugosidad

Valores de rugosidad Ra	Números de grados de rugosidad	
	μm	$\mu\text{pulgadas}$
50	2000	N 12
25	1000	N 11
12.5	500	N 10
6.3	250	N 9
3.2	125	N 8
1.6	63	N 7
0.8	32	N 6
0.4	16	N 5
0.2	8	N 4
0.1	4	N 3
0.05	2	N 2
0.025	1	N 1

A2.3. Tabla de rugosidades según acabado superficial. Fuente Internet.

A-2.5. Juntas tóricas

El mundo de las juntas es muy amplio y extenso, existiendo gran cantidad de tipos de junta, accesorios y dimensiones con múltiples calidades y materiales. En el directorio del repositorio de las juntas²⁰ recojo el trabajo de búsqueda de fabricantes realizado en Internet.

Todas y cada una de las juntas utilizadas en este proyecto son comerciales y se pueden comprar en Anyseals⁷³. Anyseals y sus catálogos⁷⁴ han sido de gran ayuda para adentrarme en el mundo de las juntas tóricas.

Materiales

He elegido el elastómero NBR (caucho acrilonitrilo butadieno) de dureza 70 como material para las juntas. Este material se adapta muy bien a nuestras necesidades y existe una gran cantidad de dimensiones, (estándar DIN ISO 1629). Es el tipo de material más utilizado en juntas tóricas y retenes radiales por sus buenas cualidades mecánicas, buena resistencia a la abrasión, escasa permeabilidad al gas.

A continuación, podemos ver distintos tipos de elastómeros utilizados en la fabricación de juntas:

Nomenclatura química del polímero base	Nomenclatura según DIN ISO 1629 ASTM D 1418	
Caucho de acrilonitrilo butadieno	NBR	NBR
Caucho de acrilonitrilo butadieno hidrogenado	HNBR	HNBR
Caucho fluorado	FKM	FKM
Perfluorelastomero	FFKM	FFKM
Caucho de etileno propileno dieno	EPDM	EPDM
Caucho de silicona / Polisiloxano de vinilo metilo	VMQ	VMQ
Caucho de fluorosilicona / Polisiloxano de fluoro metilo	FVMQ	FVMQ
Elastómero de copolímero de tetrafluoretíleno-propileno	FEPM	FEPM
Caucho de poliacrilato	ACM	ACM
Caucho de cloropreno	CR	CR
Caucho de estireno butadieno	SBR	SBR
Polietileno cluorosulfonado	CSM	CSM
Caucho de epilclorhidrina	ECO	ECO
Caucho de butadieno	BR	BR
Caucho butílico	IIR	IIR
Caucho de isopreno	IR	IR
Poliésteruretano	AU	AU
Poliéteruretano	EU	EU
Caucho natural	NR	NR

A2.4. Juntas tóricas, materiales. Fuente Anyseals.

⁷³ Selección de juntas de anyseals: <http://anyseals.org/en/products/productlist/?categoryId=1&subCategoryId=16>

⁷⁴ Catálogo de anyseals, en el repositorio del proyecto:

o:\work_seas\pfm_vimo\M40001_vimo_dev\M40001_vimo_dev_doc\raw_parts\juntas\anyseals.org\o-juntas_toricas.pdf

Y en la siguiente tabla las características principales de algunos de ellos:

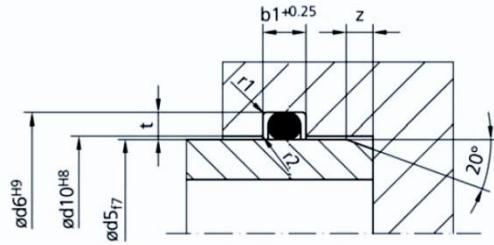
Propiedades	Dureza [Shore A]	Color	Temp. min. [°C]	Temp. máx. [°C]	brevemente [°C]
NBR	70	negro	-30	+100	+120
	80	negro	-25	+100	+120
	90	negro	-25	+100	+120
FKM	80	marrón	-15	+200	
EPDM estándar	70	negro	-45	+130	
EPDM peróxido	70	negro	-50	+150	
VMQ (silicona)	70	rojo	-55	+200	

A3.1. Juntas tóricas, características de los materiales. Fuente Anyseals.

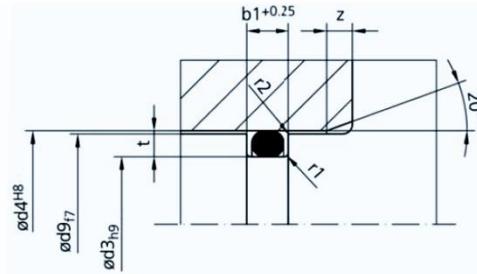
Diseño de ranuras

Para diseñar las ranuras que albergan las juntas, he utilizado las siguientes tablas de catálogo según el tipo de estanqueidad requerida. Casi todas las juntas diseñadas en el inyector están pensadas para estanqueidad estática (no hay movimiento entre las piezas durante el periodo de operación) de compresión radial (interior o exterior) y compresión axial (desde dentro o desde fuera).

Estanqueidad estática radial interior:



Estanqueidad estática radial exterior:



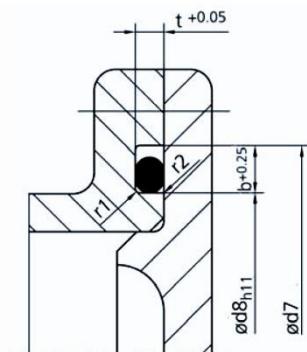
d_2	$t^{+0,05}$	$b_1^{+0,25}$	z	r_1	r_2	2,20	1,65	3,00	2,0	0,3	0,2	4,50	3,50	5,90	3,0	0,6	0,2
0,50	0,35	0,70	1,0	0,3	0,1	2,20	1,65	3,00	2,0	0,3	0,2	4,50	3,50	5,90	3,0	0,6	0,2
0,74	0,50	1,10	1,0	0,3	0,1	2,26	1,70	3,00	2,0	0,3	0,2	5,00	4,00	6,60	3,0	0,6	0,2
1,00	0,70	1,40	1,2	0,3	0,1	2,30	1,75	3,00	2,0	0,3	0,2	5,30	4,30	7,00	3,0	0,6	0,2
1,02	0,70	1,40	1,2	0,3	0,1	2,34	1,75	3,10	2,0	0,3	0,2	5,33	4,30	7,00	3,0	0,6	0,2
1,20	0,85	1,70	1,2	0,3	0,1	2,40	1,80	3,20	2,0	0,3	0,2	5,50	4,40	7,20	3,5	0,6	0,2
1,25	0,90	1,70	1,2	0,3	0,1	2,46	1,85	3,30	2,0	0,3	0,2	5,70	4,60	7,50	3,5	0,6	0,2
1,27	0,90	1,70	1,2	0,3	0,1	2,50	1,90	3,30	2,0	0,3	0,2	6,00	4,90	7,80	3,5	0,6	0,2
1,30	0,95	1,80	1,2	0,3	0,1	2,60	2,00	3,50	2,0	0,3	0,2	6,50	5,30	8,50	4,0	1,0	0,2
1,42	1,05	1,90	1,2	0,3	0,1	2,62	2,00	3,50	2,0	0,3	0,2	6,99	5,80	9,20	4,0	1,0	0,2
1,50	1,10	2,00	1,5	0,3	0,1	2,65	2,00	3,60	2,5	0,3	0,2	7,00	5,80	9,20	4,0	1,0	0,2
1,52	1,10	2,00	1,5	0,3	0,1	2,70	2,05	3,60	2,5	0,3	0,2	7,50	6,20	9,90	4,5	1,0	0,2
1,60	1,20	2,20	1,5	0,3	0,1	2,80	2,15	3,70	2,5	0,3	0,2	8,00	6,70	10,50	4,5	1,0	0,2
1,63	1,20	2,20	1,5	0,3	0,1	2,92	2,20	3,90	2,5	0,3	0,2	8,40	7,00	11,00	4,5	1,0	0,2
1,78	1,30	2,40	1,5	0,3	0,2	2,95	2,20	3,90	2,5	0,3	0,2	8,50	7,10	11,20	4,5	1,0	0,2
1,80	1,30	2,40	1,5	0,3	0,2	3,00	2,30	4,00	2,5	0,3	0,2	9,00	7,60	11,80	4,5	1,0	0,2
1,83	1,35	2,50	1,5	0,3	0,2	3,10	2,40	4,10	2,5	0,6	0,2	9,50	8,10	12,40	4,5	1,0	0,2
1,90	1,40	2,60	2,0	0,3	0,2	3,50	2,70	4,60	2,5	0,6	0,2	10,00	8,50	13,00	5,0	1,0	0,2
1,98	1,50	2,70	2,0	0,3	0,2	3,53	2,70	4,70	2,5	0,6	0,2	10,50	9,00	13,60	5,0	1,0	0,2
2,00	1,50	2,70	2,0	0,3	0,2	3,55	2,70	4,70	2,5	0,6	0,2	11,00	9,50	14,20	5,0	1,0	0,2
2,08	1,55	2,80	2,0	0,3	0,2	3,60	2,80	4,80	2,5	0,6	0,2	11,50	9,90	14,80	5,0	1,0	0,2
2,10	1,55	2,80	2,0	0,3	0,2	3,70	2,90	4,90	2,5	0,6	0,2	12,00	10,40	15,40	5,0	1,0	0,2
2,20	1,65	3,00	2,0	0,3	0,2	4,00	3,10	5,30	3,0	0,6	0,2	12,50	10,80	16,00	5,0	1,5	0,2

A3.2. Tabla de ranuras, estanqueidad estática de compresión radial.

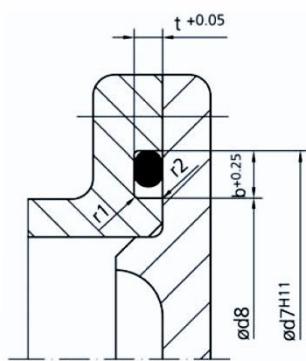
Transcripción de Anyseals.

Para el caso de estanqueidades axiales, he utilizado esta tabla:

Estanqueidad estática axial,
presión desde dentro:



Estanqueidad estática axial,
presión desde fuera:

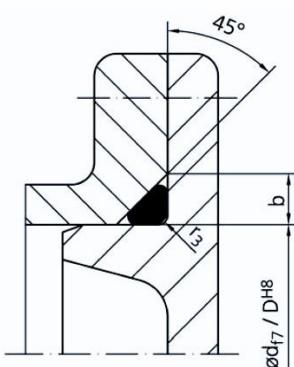


d_2	$t + 0,05$	$b + 0,25$	r_1	r_2				
0,50	0,35	0,70	0,3	0,1	3,50	2,70	4,80	0,6 0,2
0,74	0,50	1,10	0,3	0,1	3,53	2,70	4,80	0,6 0,2
1,00	0,70	1,40	0,3	0,1	3,55	2,70	4,90	0,6 0,2
1,02	0,75	1,40	0,3	0,1	3,60	2,80	5,00	0,6 0,2
1,20	0,85	1,70	0,3	0,1	3,70	2,90	5,10	0,6 0,2
1,25	0,90	1,70	0,3	0,1	4,00	3,10	5,40	0,6 0,2
1,27	0,90	1,80	0,3	0,1	4,30	3,40	5,80	0,6 0,2
1,30	0,95	1,80	0,3	0,1	4,50	3,50	6,00	0,6 0,2
1,42	1,05	1,90	0,3	0,1	5,00	4,00	6,60	0,6 0,2
1,50	1,10	2,10	0,3	0,1	5,30	4,30	7,10	0,6 0,2
1,52	1,10	2,10	0,3	0,1	5,33	4,30	7,10	0,6 0,2
1,60	1,20	2,20	0,3	0,1	5,50	4,40	7,40	0,6 0,2
1,63	1,20	2,20	0,3	0,1	5,70	4,60	7,50	0,6 0,2
1,78	1,30	2,60	0,3	0,2	6,00	4,90	7,80	0,6 0,2
1,80	1,30	2,60	0,3	0,2	6,50	5,30	8,50	1,0 0,2
1,83	1,35	2,60	0,3	0,2	6,99	5,70	9,60	1,0 0,2
1,90	1,40	2,70	0,3	0,2	7,00	5,70	9,60	1,0 0,2
1,98	1,50	2,80	0,3	0,2	7,50	6,20	10,10	1,0 0,2
2,00	1,50	2,80	0,3	0,2	8,00	6,60	10,70	1,0 0,2
2,08	1,55	2,90	0,3	0,2	8,40	7,00	11,10	1,0 0,2
2,10	1,55	2,90	0,3	0,2	8,50	7,10	11,30	1,0 0,2
2,20	1,60	3,10	0,3	0,2	9,00	7,60	11,80	1,0 0,2
2,26	1,70	3,10	0,3	0,2	9,50	8,10	12,40	1,0 0,2
2,30	1,75	3,10	0,3	0,2	10,00	8,50	13,10	1,0 0,2
2,34	1,75	3,10	0,3	0,2	10,50	8,90	13,70	1,0 0,2
2,40	1,80	3,30	0,3	0,2	11,00	9,40	14,30	1,0 0,2
2,46	1,85	3,40	0,3	0,2	11,50	9,90	14,80	1,0 0,2
2,50	1,90	3,40	0,3	0,2	12,00	10,40	15,40	1,0 0,2
2,60	2,00	3,50	0,3	0,2	12,50	10,80	16,00	1,5 0,2
2,62	2,00	3,60	0,3	0,2	13,00	11,30	16,60	1,5 0,2
2,65	2,00	3,70	0,3	0,2	13,50	11,80	17,20	1,5 0,2
2,70	2,05	3,70	0,3	0,2	14,00	12,20	17,80	1,5 0,2
2,80	2,10	3,90	0,3	0,2	14,50	12,70	18,40	1,5 0,2
2,92	2,20	4,00	0,3	0,2	15,00	13,20	19,10	1,5 0,2
2,95	2,20	4,00	0,3	0,2	13,50	11,80	17,20	1,5 0,2
3,00	2,30	4,00	0,3	0,2	14,00	12,20	17,80	1,5 0,2
3,10	2,40	4,10	0,6	0,2	14,50	12,70	18,40	1,5 0,2
3,50	2,70	4,80	0,6	0,2	15,00	13,20	19,10	1,5 0,2

A3.3. Tabla de ranuras, estanqueidad estática de compresión axial.
Transcripción de Anyseals.

Y en algún caso he utilizado una estanqueidad estática en ranura triangular:

Estanqueidad estática, ranura triangular:



d_2	b	Tol.	r_3					
1,50	2,05	+0,1	0,3	3,53	4,80	+0,2	0,8	
1,60	2,20	+0,1	0,3	3,55	4,80	+0,2	0,8	
1,78	2,40	+0,1	0,3	3,60	4,90	+0,2	0,9	
1,80	2,40	+0,1	0,3	3,70	5,00	+0,2	0,9	
1,90	2,60	+0,1	0,4	4,00	5,50	+0,2	1,2	
2,00	2,70	+0,1	0,4	4,30	5,90	+0,2	1,2	
2,20	3,00	+0,1	0,4	4,50	6,20	+0,2	1,2	
2,40	3,20	+0,15	0,4	5,00	6,80	+0,25	1,2	
2,50	3,40	+0,15	0,5	5,30	7,20	+0,25	1,4	
2,60	3,60	+0,15	0,5	5,33	7,30	+0,25	1,4	
2,62	3,60	+0,15	0,5	5,50	7,50	+0,25	1,5	
2,65	3,60	+0,15	0,5	5,70	7,80	+0,25	1,5	
2,70	3,70	+0,15	0,6	6,00	8,20	+0,3	1,5	
2,80	3,80	+0,15	0,6	6,50	8,80	+0,3	1,7	
3,00	4,10	+0,2	0,6	6,99	9,60	+0,3	2,0	
3,10	4,20	+0,2	0,6	7,00	9,60	+0,3	2,0	
3,50	4,80	+0,2	0,8	7,50	10,20	+0,3	2,0	

A3.4. Tabla de ranuras, estanqueidad estática triangular. Transcripción de Anyseals.

Búsqueda de juntas

Existen muchas empresas que se dedican a la fabricación y comercialización de este tipo de juntas. Algunas de las más importantes son:

- ✓ [Anyseals.](#)
- ✓ [Juntas Besma](#)
- ✓ [Epidor](#)

Todas las juntas utilizadas en el proyecto son de catálogo y se pueden encontrar en la página de Anyseals que dispone de un potente buscador:

The screenshot shows the Anyseals website's search interface for O-Rings. At the top, there is a navigation bar with the Anyseals logo and a search icon. Below the header, a table lists various O-Ring products with columns for Type, Product, Type, Description, Materials, Temperature, Speed, Pressure, Dimensions, and Technical Info. The table includes five rows of data, each with a small image of the O-Ring and a 'View' button. Below the table, there is a note: '(...) On request available in other materials'. At the bottom, there is a configuration section with dropdown menus for compound (FFKM, FKM, HNBR, NBR, PTFE, SI), shore (60, 70, 80, 90), colour (black), specials (none), and a 'please note' section featuring a large image of an O-Ring. There are also buttons for grouping (inner-Ø) and generating a configuration.

TYPE	PRODUCT	TYPE	DESCRIPTION	MATERIALS	TEMPERATURE [°C] min. – max.	SPEED [m/s]	PRESSURE [MPA] max.	DIMENSIONS (mm)	TECH. INFO
O-Ring	OR-10	-	-	NBR, FKM, EPDM, VMQ, HNBR, FFKM, FVMQ, FEPM, ACM, PTFE, PUR, CR, SBR, CSM, ECO, BR, IIR, IR, AU, EU, NR	-	-	-	DIN 3771-1, ISO 3601-1, SMS 1586, JIS B 2401, AS 568, BS 1806, BS 4518, NF 147-501, R 0 to R 27, R 28 to R 88	
O-Ring	OR-11	FEP encapsulated	-	FKM / FEP encapsulated	-	-	-		
O-Ring	OR-12	PTFE encapsulated	-	PTFE / Elastomer core	-	-	-		
O-Ring	OR-13	made from O-Ring cord, glued	NBR, FKM, EPDM, VMQ	-	-	-	-		
O-Ring	OR-14	made from O-Ring cord, vulcanised	NBR, FKM, EPDM, VMQ	-	-	-	-		

(...) On request available in other materials

compound: FFKM, FKM, HNBR, **NBR**, PTFE, SI
shore: 60, 70, 80, 90
colour: black
specials: none
please note:

grouping: inner-Ø
size section: 0.00 - 1.20 mm
 generate

A3.5. Catálogo web de juntas tóricas. Fuente Anyseals.

A-2.6. Tabla periódica

Tabla periódica de los elementos

Periodic Table Properties:

- masa atómica o número molar del isótopo más estable**: 55.845
- 1.º energía de ionización en kJ/mol**: 762.5
- número atómico**: 26
- símbolo químico**: Fe
- nombre**: Hierro
- configuración electrónica**: [Ar] 3d⁶ 4s²
- estados de oxidación más comunes están en negrita**: +2, +3, +4, +5, +6

Bloques de configuración electrónica

Notas

- 1 kJ/mol ≈ 96.485 eV.
- Todos los elementos tienen un estado de oxidación implícito cero.
- Los estados de oxidación de los elementos 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117 y 118 son predicciones.
- Las configuraciones electrónicas de los elementos 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117 y 118 son predicciones.

grupo 1	18
periodo 1	He
Hidrógeno H 1s ¹	Helio He 1s ²
periodo 2	Ne
Litio Li 1s ² 2s ¹	Berilio Be 1s ² 2s ²
Sodio Na [Ne] 3s ¹	Magnesio Mg [Ne] 3s ²
Kalio K [Ar] 4s ¹	Calcio Ca [Ar] 4s ²
Rubidio Rb [Kr] 5s ¹	Estroncio Sr [Kr] 5s ²
Cesio Cs [Xe] 6s ¹	Bario Ba [Xe] 6s ²
Francio Fr [Rn] 7s ¹	Radio Ra [Rn] 5f ¹ 6d ¹ 7s ¹
periodo 3	Sc
Titano Ti [Ar] 3d ² 4s ²	Vanadio V [Ar] 3d ³ 4s ²
Vanadio V [Ar] 3d ³ 4s ²	Cromo Cr [Ar] 3d ⁵ 4s ¹
Manganoso Mn [Ar] 3d ⁵ 4s ²	Hierro Fe [Ar] 3d ⁶ 4s ²
Cobalto Co [Ar] 3d ⁷ 4s ¹	Níquel Ni [Ar] 3d ⁸ 4s ¹
Cobre Cu [Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹	Zinc Zn [Ar] 3d ¹⁰ 4s ²
Molibdeno Mo [Ar] 3d ⁵ 4s ²	Ruthenio Ru [Ar] 3d ⁶ 4s ²
Tecnecio Tc [Ar] 3d ⁵ 4s ²	Ródio Rh [Ar] 3d ⁷ 4s ²
Puteno Ru [Ar] 3d ⁵ 4s ²	Paladio Pd [Ar] 3d ⁸ 4s ²
Molibdeno Mo [Ar] 3d ⁵ 4s ²	Plata Ag [Ar] 3d ¹⁰ 4s ²
Tecnecio Tc [Ar] 3d ⁵ 4s ²	Cadmio Cd [Ar] 3d ¹⁰ 4s ²
Níquel Ni [Ar] 3d ⁸ 4s ²	Indio In [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 5p ¹
Zirconio Zr [Kr] 4d ² 5s ²	Estano Sn [Kr] 4d ¹⁰ 5s ²
Níobio Nb [Kr] 4d ⁴ 5s ¹	Antimónio Sb [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ³
Molibdeno Mo [Kr] 4d ⁵ 5s ¹	Telurio Te [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵
periodo 4	Ti
Scandio Sc [Ar] 3d ¹ 4s ²	Vanadio V [Ar] 3d ² 4s ²
Cr	Manganoso Mn [Ar] 3d ⁵ 4s ²
Fe	Hierro Fe [Ar] 3d ⁶ 4s ²
Co	Cobalto Co [Ar] 3d ⁷ 4s ¹
Ni	Níquel Ni [Ar] 3d ⁸ 4s ¹
Cu	Zinc Zn [Ar] 3d ¹⁰ 4s ²
Zn	Ruthenio Ru [Ar] 3d ⁷ 4s ²
Ga	Ródio Rh [Ar] 3d ⁷ 4s ²
Ge	Paladio Pd [Ar] 3d ⁸ 4s ²
As	Plata Ag [Ar] 3d ¹⁰ 4s ²
Se	Cadmio Cd [Ar] 3d ¹⁰ 4s ²
Br	Indio In [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 5p ¹
Kr	Estano Sn [Kr] 4d ¹⁰ 5s ²
Xe	Antimónio Sb [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ³
Rn	Telurio Te [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵
Og	Yodo I [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁷
periodo 5	Tc
Rb	Zirconio Zr [Kr] 4d ² 5s ²
Sr	Níobio Nb [Kr] 4d ⁴ 5s ¹
Y	Molibdeno Mo [Kr] 4d ⁵ 5s ¹
Zr	Tecnecio Tc [Kr] 4d ⁵ 5s ²
Nb	Ruthenio Ru [Kr] 4d ⁵ 5s ²
Mo	Ródio Rh [Kr] 4d ⁷ 5s ¹
Tc	Paladio Pd [Kr] 4d ⁸ 5s ¹
Ru	Plata Ag [Kr] 4d ¹⁰ 5s ²
Rh	Cadmio Cd [Kr] 4d ¹⁰ 5s ²
Pd	Indio In [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹
Ag	Estano Sn [Kr] 4d ¹⁰ 5s ²
Cd	Antimónio Sb [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ³
In	Telurio Te [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵
Sn	Yodo I [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁷
Ge	periodo 6
As	Sn
Se	Ge
Br	As
Kr	Ge
Xe	Ge
Rn	Ge
Og	Ge
periodo 7	Tl
Fr	Tl
Ra	Pb
Lr	Bismuto Bi [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²
Rf	Polo Po [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²
Dubnio	Tl
Sg	Pb
Bh	Bismuto Bi [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²
Hs	Polo Po [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²
Mt	Tl
Ds	Pb
Rg	Bismuto Bi [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²
Cn	Polo Po [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²
Nh	Tl
Fl	Pb
Mc	Bismuto Bi [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²
Lv	Polo Po [Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²
Ts	Tl
Og	Pb
periodo 8	La
Ac	La
Th	Ce
Pa	Pr
U	Neodimio Nd [Xe] 4f ⁹
Np	Praseodimio Pm [Xe] 4f ¹⁰
Pu	Sm
Am	Eu
Cm	Europio Eu [Xe] 4f ¹²
Bk	Gadolinio Gd [Xe] 4f ¹³
Cf	Tb
Es	Dy
Fm	Disprosio Ho [Xe] 4f ¹⁴
Md	Er
No	Tm
Og	Yb

A3.6. Tabla de elementos químicos. Fuente Wikipedia.

A-3. Archivos del proyecto

A-3.1. [Memoria del proyecto](#)

A-3.2. [Archivos de modelado de piezas](#)

A-3.3. [Archivos de simulaciones](#)

A-3.4. [Presentación del proyecto](#)

A-3.5. [Video de defesa del proyecto](#)