

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

Ingeniería básica de una planta de producción de botellas de vidrio

Autor: Jose Ráez Escanciano.

Tutores: Mónica Rodríguez Galán

María Custodia Fernández Baco

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Agradecimientos

Quiero comenzar expresando mi más profundo agradecimiento a mis padres, quienes han sido mi roca y mi inspiración a lo largo de este viaje. Su apoyo incondicional y su sacrificio han sido la base sobre la cual he construido mi camino hasta aquí. A mi hermana, le agradezco por ser mi fuente de apoyo y motivación, siempre presente en cada paso del camino. A mis abuelos, tanto a los que aún están con nosotros como a los que ya no, les estoy agradecido por su amor incondicional y su eterno orgullo.

A mis amigos, tanto aquellos de toda la vida como aquellos que he conocido en la universidad, agradecerles el haber sido un pilar fundamental en mi vida ya que han estado a mi lado en los momentos más difíciles y han compartido conmigo las alegrías más grandes.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mis tutoras María Custodia Fernández Baco y Mónica Rodríguez Galán por toda la ayuda que me han ofrecido durante todo este tiempo, ya no solo en el proceso de elaboración del TFG, sino durante toda la carrera universitaria. Ojalá existieran más profesoras como ella en todos los niveles educativos.

Jose Ráez Escanciano,

Sevilla, 2024

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo la realización de una Ingeniería Básica de una planta de producción de botellas de vidrio, que tiene una capacidad de fabricación de 365.000.000 de botellas al año.

En primer lugar, se estudia el origen y la evolución del vidrio a lo largo de los años, así como sus características y propiedades principales. También se abordan diferentes clasificaciones atendiendo a diversos criterios, a parte de mostrar los principales usos y aplicaciones de este material. Por otra parte, se lleva a cabo un estudio de mercado detallado sobre la producción, la economía y la parte medioambiental de este producto.

Posteriormente, se desarrolla de forma detallada el proceso de producción, incluyendo un diagrama de proceso, y se señalan los aspectos medioambientales asociados con la fabricación del vidrio. Después, se asientan las bases de diseño y se realiza el balance de materia junto con el dimensionamiento de los equipos principales de la planta, cuyas características se indican en las hojas de especificaciones correspondientes.

Finalmente, se estiman las mediciones y el presupuesto de la inversión de la planta, así como su coste de producción anual. Además, se lleva a cabo una evaluación de la viabilidad económica del proyecto.

Abstract

The aim of this project is to carry out the Basic Engineering of a glass bottle production plant, which has a manufacturing capacity of 365,000,000 bottles per year.

Firstly, the origin and evolution of glass over the years is studied, as well as its main characteristics and properties. It also deals with different classifications according to various criteria, as well as showing the main uses and applications of this material. On the other hand, a detailed market study is carried out on the production, economics and environmental aspects of this product.

Subsequently, the production process is developed in detail, including a process diagram, and the environmental aspects associated with the manufacture of glass are pointed out. Then, the design basis is established and the material balance is carried out together with the dimensioning of the main equipment of the plant, the characteristics of which are indicated in the corresponding specification sheets.

Finally, the measurements and the investment budget of the plant are estimated, as well as its annual production cost. In addition, an assessment of the economic viability of the project is carried out.

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
ÍNDICE.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Objetivos y alcance.....	13
1.2. Origen y evolución.....	13
1.3. Características y propiedades.....	17
1.4. Clasificación y tecnologías de producción.....	19
1.5. Usos y aplicaciones.....	34
1.6. Estudio de mercado (producción, economía y medioambiente).....	37
2. MEMORIA DESCRIPTIVA Y JUSTIFICATIVA.....	46
2.1. Materias primas.....	46
2.2. Diagrama de proceso y proceso de producción.....	49
2.3. Aspectos medioambientales.....	65
3. MEMORIA DE CÁLCULO.....	76
3.1. Bases de diseño.....	76
3.2. Balance de materia.....	79
3.3. Dimensionamiento de los equipos.....	83
4. MEDICIONES Y PRESUPUESTO.....	91
4.1. Costes de inversión de la planta.....	91
4.1.1. Cálculo de los costes de los equipos.....	91
4.1.2. Cálculo de la inversión de la planta.....	94
4.2. Costes de producción de la planta.....	96

4.3. Análisis rentabilidad económica de la inversión de la planta.....	103
5. BIBLIOGRAFÍA.....	105

Índice de Tablas

Tabla 1. Propiedades alcanzadas a partir de la adición de diferentes elementos.

Tabla 2. Límites de composición en los vidrios comunes.

Tabla 3. Elementos utilizados en la coloración del vidrio.

Tabla 4. Compuestos emitidos y fuentes asociadas en el proceso de fusión.

Tabla 5. Intervalo de emisiones de los contaminantes más importantes (Condiciones: 273K; 101,3 kPa; 8% O₂)

Tabla 6. Concentraciones metales pesados y elementos traza.

Tabla 7. Composición frecuente del polvo para un vidrio sódico-cálcico.

Tabla 8. Especificaciones de la botella.

Tabla 9. Composición de la mezcla (sin vidrio reciclado).

Tabla 10. Composición de la mezcla (con vidrio reciclado).

Tabla 11. Cantidades necesarias de materias primas.

Tabla 12. Especificaciones del horno de fusión.

Tabla 13. Tabla de límites de producción máquina Heye IS de 5" DG.

Tabla 14. Dimensiones máquina Heye IS de 5" DG

Tabla 15. Requisitos del servicio máquina Heye IS de 5" DG.

Tabla 16. Hoja de especificaciones horno de recocido.

Tabla 17. Especificaciones de la trituradora TR 100 Coparm.

Tabla 18. Capacidad característica de cada equipo.

Tabla 19. Correlaciones para el cálculo del coste final del equipo.

Tabla 20. Coste final de cada uno de los equipos.

Tabla 21. Procedimiento del método de Chilton.

Tabla 22. Cálculo del coste total de inversión de la planta por el método de Chilton.

Tabla 23. Procedimiento estimación para calcular el coste total de producción de una planta química⁴

Tabla 24. Coste anual de las materias primas.

Tabla 25. Precios de los utilities.

Tabla 26. Coste anual de los utilities.

Tabla 27. Parámetros específicos de cada equipo para la estimación de operarios.

Tabla 28. Cálculo del coste total de producción anual de la planta.

Tabla 29. Ingresos por ventas anuales de la planta.

Tabla 30. Flujos de caja asociados a la inversión de la planta.

Índice de Figuras

- Figura 1. Representación de la técnica del soplado en el siglo I a.C.
- Figura 2. Evolución del vidrio a lo largo de la historia.
- Figura 3. Relación entre el grosor y el tamaño del vidrio.
- Figura 4. Jarra hecha de vidrio sódico-cálcico.
- Figura 5. Pantalla de protección en un hospital fabricada a partir de vidrio de plomo.
- Figura 6. Material de laboratorio obtenido a partir de vidrio boro-silicato.
- Figura 7. Tubos de vidrio de sílice.
- Figura 8. Pantalla protectora de móvil hecho a partir de vidrio aluminio-silicato.
- Figura 9. Proceso soplado-soplado.
- Figura 10. Proceso soplado-soplado.
- Figura 11. Técnica del soplado.
- Figura 12. Proceso prensado-soplado.
- Figura 13. Lámina de vidrio sobre piscina de estaño fundido.
- Figura 14. Proceso de enfriamiento.
- Figura 15. Proceso de fabricación del vidrio plano.
- Figura 16. Técnica colada.
- Figura 17. Bobinas y entrelazado de hilos de fibra de vidrio.
- Figura 18. Vitrina hecha a partir de vidrio templado.
- Figura 19. Superficie fabricada a partir de vidrio laminado.
- Figura 20. Diferencias entre la rotura del vidrio templado y laminado.
- Figura 21. Vidrio reflectante utilizado en la fachada de un edificio en Madrid.

Figura 22. Vidrio insulado.

Figura 23. Vidrio curvo utilizado en un edificio en Toronto, Canadá.

Figura 24. Vidrio esmerilado.

Figura 25. Número de empresas dedicadas a la fabricación del vidrio y derivados en España de 2008 a 2020.

Figura 26. Producción anual de vidrio en España de 2014 a 2021.

Figura 27. Mapa mundial de exportación de vidrio y sus manufacturas en 2022.

Figura 28. Mapa mundial de importación de vidrio y sus manufacturas en 2022.

Figura 29. Países importadores de vidrio y sus manufacturas, exportados por España en 2022.

Figura 30. Países exportadores de vidrio y sus manufacturas, importados por España en 2022.

Figura 31. Cifra de negocio total en España de 2014 a 2021.

Figura 32. Modelo de economía circular.

Figura 33. Diferencias entre la economía lineal y circular.

Figura 34. Evolución de toneladas de vidrio recicladas en España desde 2013 hasta 2021.

Figura 35. Intensidad energética en España desde 2014 hasta 2021.

Figura 36. Intensidad de CO₂ en España desde 2014 hasta 2021.

Figura 37. Óxido de silicio.

Figura 38. Carbonato de sodio.

Figura 39. Carbonato de calcio.

Figura 40. Diagrama del proceso de producción.

Figura 41. Entrada de la mezcla de materias primas al horno de fusión.

Figura 42. Horno regenerativo de llama transversal.

Figura 43. Funcionamiento de un horno regenerativo.

Figura 44. Horno regenerativo de llama de bucle.

Figura 45. Vista en planta de un horno regenerativo de llama de bucle.

Figura 46. Funcionamiento de un horno recuperativo.

Figura 47. Formas típicas de gotas según el proceso de conformación.

Figura 48. Equipo de distribución de gota.

Figura 49. Posiciones del punzón en el proceso de soplado.

Figura 50. Proceso soplado-soplado.

Figura 51. Proceso prensado-soplado.

Figura 52. Ejemplos de moldes.

Figura 53. Túnel de recocido.

Figura 54. Funcionamiento de un túnel de recocido.

Figura 55. Proceso de paletizado de las botellas de vidrio.

Figura 56. Esquema básico del proceso de producción.

Figura 57. Mecanismos de formación de NO.

Figura 58. Generación de NO en función de la temperatura.

Figura 59. Diseño de la botella.

Figura 60. Diagrama del proceso de producción.

Figura 61. Layout trituradora TR 100 Coparm.

Figura 62. Trituradora TR 100 Coparm.

Figura 63. Cuchilla trituradora de 2 ejes.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos y alcance.

El objetivo de este proyecto es el diseño de una Ingeniería Básica de una planta de producción de botellas de vidrio a partir de arena de sílice, sosa, caliza y vidrio reciclado, para obtener una producción de 365.000.000 de botellas de vidrio anuales, es decir, 1.000.000 de botellas diarias, lo que supone, una producción de 84.315 toneladas de vidrio al año, o lo que es lo mismo, 231 toneladas de vidrio al día.

Para poder llevar a cabo el diseño de la planta, se ha realizado un análisis de las diferentes tecnologías de producción de vidrio con el fin de elegir el proceso más adecuado y eficiente, y un estudio de mercado sobre la producción mundial y nacional del vidrio y sus aplicaciones.

A continuación, se ha realizado un diagrama de bloques que define la estructura del proceso, a partir del cual se ha desarrollado el proceso descrito, incluyendo una descripción completa de la instalación y los balances de materia y energía de la planta. Para el diseño de la planta, la realización del P&ID, la instrumentación y el control de la instalación, y el dimensionamiento de la red de tuberías quedan fuera del alcance del proyecto.

Posteriormente, se ha realizado el dimensionamiento y/o diseño de algunos equipos de la planta, generando a partir de este diseño las hojas de especificaciones correspondientes.

Por último, para estimar la viabilidad del proyecto, se realiza un análisis económico de la planta, estimando el coste total de inversión para su implantación, el coste total de operación y un análisis de viabilidad económica.

1.2. Origen y evolución.

El vidrio junto a la cerámica es el material más antiguo y utilizado para la conservación y el almacenamiento de productos.

En Siria, los comerciantes de natrón (material de sosa) fueron quienes descubrieron el vidrio durante su viaje a Egipto. Estos preparaban los alimentos en recipientes sobre rocas de natrón y se dieron cuenta de que el natrón al entrar en contacto con la arena y el calor, se había fundido. De esta forma, los comerciantes descubrieron un material brillante y duro, el vidrio fabricado.

Los restos más antiguos de vidrio fabricado se remontan a la época prehistórica, unos 3.500 años a.C. Se trataban de vidrios opacos y con colores brillantes, utilizados como joyas principalmente. Fueron encontrados en regiones de Asia Menor, Mesopotamia y el Antiguo Egipto.

En la Edad Antigua, los egipcios y los fenicios fueron los principales fabricantes y proveedores de vidrio. Los egipcios descubrieron el prensado de vidrio en moldes pero fueron superados por los fenicios quienes lograron mejorar la técnica y fueron capaces de crear el vidrio transparente e incoloro. Cuando Roma conquistó Egipto, las fábricas de vidrio se expandieron por todo el Imperio Romano y muchos vidrieros emigraron a Roma, donde utilizaron óxidos metálicos como colorantes e impulsaron su uso.

En Tirón en el siglo I a.C., se descubrió la técnica del vidrio soplado, que se extendió por todo el Imperio Romano. Esta técnica consistía en soplar en el interior del vidrio a través de un tubo metálico largo, que estaba hueco, denominado “caña” con el que se hacían burbujas en su interior y de esta manera se conseguía darle la forma deseada (figura 1). Esta técnica supuso que el proceso de fabricación fuese más sencillo, rápido y barato. También, le permitió a los sopladores de vidrio profesionales ser capaces de producir formas complejas y simétricas en la gota de vidrio fundido, o bien soplar el vidrio fundido en un molde.



Figura 1. Representación de la técnica del soplado en el siglo I a.C. [1]

Tras la caída del Imperio Romano, la fabricación del vidrio decayó en Europa y los vidrieros se desplazaron a Irán, Irak, Siria y Egipto.

Durante la Edad Media, los venecianos aprendieron el proceso de fabricación del vidrio, que había sido transmitido de generación en generación. El vidrio veneciano era famoso por sus formas brillantes y luminosas. Por ello, en el siglo XV, Venecia se convirtió en el productor principal de vidrio en Europa. A los vidrieros venecianos, que gozaron de un gran prestigio, se les prohibió salir de la isla de Murano, con la finalidad de evitar que los conocimientos de la fabricación del vidrio fueran transmitidos a otros.

En el siglo XVI, a pesar del esfuerzo de los venecianos, la fabricación de vidrios se extiende por toda Europa, especialmente en Francia, Inglaterra y Alemania. En estos países se mejoraron las técnicas de fabricación haciendo que fuese posible obtener láminas planas de vidrio más grandes y con superficies más lisas y homogéneas. El vidrio comenzó a utilizarse como elemento indispensable en la arquitectura.

A mediados del siglo XVII comenzó a popularizarse la botella tal y como la conocemos hoy en día. Conforme pasaron los años, se fue expandiendo debido al uso de los tapones de corcho, que hacían un uso más seguro e higiénico.

En 1790, el gobierno francés ofreció una recompensa a cualquier persona que pudiera encontrar una forma efectiva de almacenar alimentos para las tropas de Napoleón. El investigador Nicolas Apert encontró la solución: los alimentos que estaban envasados en recipientes de vidrio conservaban sus características después de ser sellados y calentados. Fue entonces cuando nació la industria alimentaria, que Pasteur perfeccionaría un siglo después. Esto dio lugar a la conservación de los alimentos mediante la técnica de la esterilización en vacío.

La Revolución Industrial hizo que el vidrio se empezara a utilizar en la construcción y que fuera accesible para toda la población. El hierro y vidrio a la par se convirtieron en la gran novedad de la arquitectura moderna.

La mecanización del proceso de fabricación supuso un aumento de la producción y de la capacidad para fabricar objetos simples reduciendo los costes de producción.

A principios del siglo pasado, después de numerosas pruebas, se introdujo en el mercado una rudimentaria máquina para la producción automática de envases de vidrio. Finalmente, en 1925 salió la primera máquina al mercado.

Debido al progreso industrial, la investigación y el desarrollo del conocimiento del vidrio, la producción de envases está muy automatizada hoy en día. Actualmente, las máquinas de fabricación de envases de vidrio son capaces de producir hasta 700.000 por día. La industria del vidrio se ha convertido en una industria global.

A continuación, en la figura 2 se muestra la evolución del vidrio a lo largo de la historia de forma esquemática.

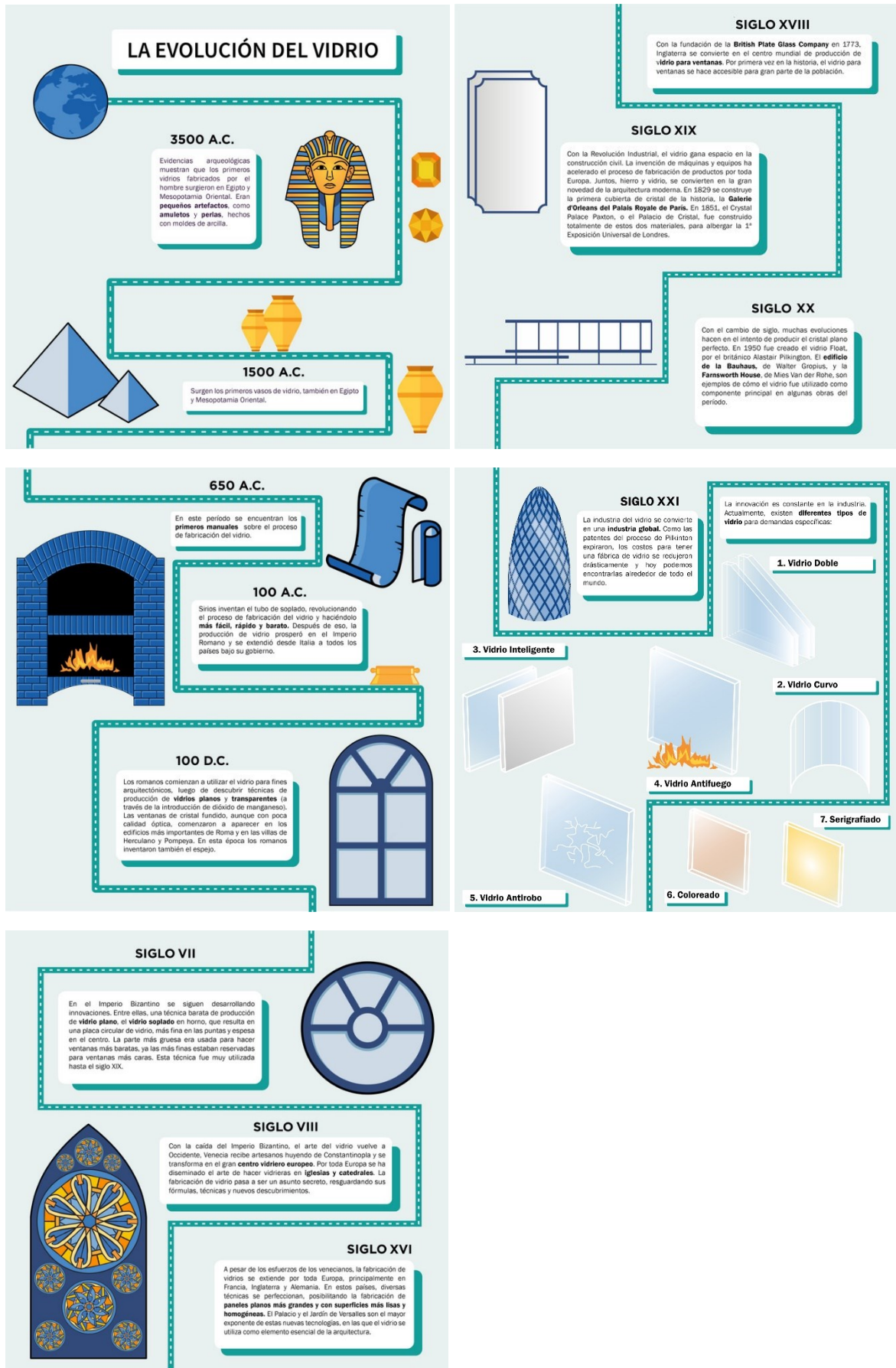


Figura 2. Evolución del vidrio a lo largo de la historia. [2]

1.3. Características y propiedades.

El vidrio es un material inorgánico, transparente, de gran dureza, pero de alta fragilidad, que no se encuentra de forma abundante en la naturaleza, por lo que es producido por el ser humano desde hace muchísimos años. Se usa para hacer ventanas, puertas, lentes, envases de todo tipo y una gran variedad de productos.

El vidrio se obtiene mezclando diversas sustancias minerales, como el carbonato de sodio (Na_2CO_3), la caliza (CaCO_3) y la arena de sílice (SiO_2), que se funden a altas temperaturas (alrededor de los 1500°C) y se enfrían de manera rápida para formar una estructura rígida.

En algunos países, el término “cristal” se utiliza como sinónimo de vidrio, aunque esto es incorrecto debido a que el vidrio es un sólido amorfo (su estructura está deformada de manera uniforme y no presenta un patrón ordenado) y no un sólido cristalino.

La naturaleza de las materias primas, la composición del vidrio y la velocidad de enfriamiento pueden variar con el objetivo de lograr las propiedades adecuadas para su correspondiente aplicación. Por ejemplo, las propiedades pueden ser modificadas y/o cambiadas al añadir otros compuestos, como se puede observar en la tabla 1.

ELEMENTO	PROPIEDADES
Óxido de aluminio	Mejora la resistencia química y aumenta la viscosidad cuando la temperatura es baja
Cerio	Absorbe rayos infrarrojos
Óxido de bario	Es menos pesado y con elevados índices de refracción
Flúor	Se forman pequeñas partículas cristalinas que proporcionan una mayor opacidad.

Tabla 1. Propiedades alcanzadas a partir de la adición de diferentes elementos. [50]

La composición química del vidrio se representa con los óxidos de los diferentes elementos químicos que lo forman. Se expresa en porcentaje en masa y a temperatura ambiente. Las composiciones varían en torno a los intervalos que se muestran en la tabla 2.

COMPONENTE	DESDE (%)	HASTA (%)
SiO_2	68,0	74,5
Al_2O_3	0,0	4,0
Fe_2O_3	0,0	0,45
CaO	9,0	14,0
MgO	0,0	4,0
Na_2O	10,0	16,0
K_2O	0,0	4,0
SO_3	0,0	0,3

Tabla 2. Límites de composición en los vidrios comunes. [49]

El vidrio se caracteriza por tener las siguientes propiedades:

- **Ópticas.**

El vidrio tiene la capacidad de refractar con facilidad la luz que incide en él, absorbiéndola y posteriormente transmitiéndola. Los vidrios que no presentan compuestos de hierro en su composición son los que tienen mayor capacidad de transmisión de la luz.

- **Color.**

El color del vidrio depende de los componentes que se añadan en el proceso de fabricación. Se pueden encontrar vidrios de color rojo azulado, el cual se obtiene al añadir óxido de cobalto; azulado que se consigue con el uso del óxido ferroso; y de color amarillo obtenido por la adición de óxido férrico.

- **Maleabilidad.**

El vidrio puede llegar a ser muy maleable en la etapa de fundición, donde se utilizan diferentes técnicas de moldeado, como por ejemplo el laminado, el prensado, el estirado y el soplado.

- **Corrosión.**

El vidrio tiene una gran resistencia a la corrosión, lo que supone que no se deteriore ni se oxide cuando está expuesto a elementos corrosivos. Existen cuatro compuestos contra los que el vidrio se puede romper: el ácido hidrociorhídrico, el ácido fosfórico, las concentraciones alcalinas a temperaturas elevadas y el agua a altas temperaturas.

- **Solubilidad.**

La solubilidad del vidrio es muy baja, lo que significa que no se disuelve en agua ni en la mayoría de disolventes. Esta propiedad cobra importancia en aplicaciones como los acuarios, donde las paredes de vidrio están continuamente en contacto con el agua. De esta forma, no se disuelven ni se liberan sustancias que puedan ser perjudiciales para los peces.

- **Biodurabilidad.**

La biodurabilidad consiste en la resistencia del vidrio a la degradación biológica. Por ejemplo, las botellas de vidrio permanecen intactas durante cientos de años en la naturaleza sin que los microorganismos las degraden.

- **Inercia química.**

La inercia química es una de las propiedades más importantes del vidrio ya que hace que no reaccione fácilmente con la mayoría de sustancias químicas. Esto convierte al vidrio en un material idóneo para almacenar líquidos y sustancias químicas sin que se produzcan reacciones no deseadas. Por ejemplo, los frascos de vidrio utilizados en los laboratorios para

contener sustancias químicas, y las botellas de vidrio que se usan para almacenar alimentos y bebidas.

- **Otras.**

El vidrio presenta una densidad de unos 2500 kg/m³ y una excelente viscosidad. Tiene una resistencia a la compresión que oscila entre los 800-1000 MPa y es capaz de resistir altos niveles de radiación sin sufrir daños importantes. Además, presenta una dureza de 470 HK.

También, se caracteriza por tener una alta conductividad, siendo capaz de conducir fácilmente el calor y el frío. Puede resistir temperaturas extremadamente altas sin fundirse ni deformarse, así como cambios bruscos de temperatura. Esto hace que el vidrio sea un material ideal para aplicaciones que requieren resistencia al calor.

- **Reciclaje.**

El vidrio es un material que se puede reciclar íntegramente en infinidad de ocasiones. Cuando se recicla, se ahorra hasta un 30% de energía y las propiedades siguen intactas. El reciclaje de envases de vidrio tiene grandes beneficios ambientales, ya que evita la extracción de materias primas naturales y disminuye la emisión de CO₂.

En el proceso de reciclaje, el vidrio es separado y clasificado según su color en tres grupos: verde, ámbar o café y transparente. A continuación, todo el material que no sea vidrio (tapas metálicas, etiquetas...) se separa. Después, el vidrio es triturado y fundido junto con las materias primas para fabricar nuevos productos que tendrán las mismas propiedades que el vidrio fabricado directamente con materias primas naturales.

En algunos casos, el vidrio es reutilizado (no reciclado), es decir, no se funde, sino que se vuelve a utilizar, lavándolo previamente. En acristalamientos, se puede aprovechar el vidrio cortándolo nuevamente (siempre que se requiera una unidad más pequeña).

1.4. Clasificación y tecnologías de producción.

Por lo general, los vidrios se clasifican atendiendo a tres criterios: la composición química, la aplicación y la tecnología de fabricación o el tratamiento aplicado.

Según su composición, se puede diferenciar: el vidrio sódico-cálcico, el vidrio de plomo, el vidrio de boro-silicato y el vidrio de sílice. Todos ellos son vidrios primarios, es decir, aquellos que se obtienen directamente del horno de fundición.

Vidrio sódico-cálcico

La composición del vidrio sódico-cálcico es aproximadamente 60-70% sílice (SiO₂), 12-18% soda (Na₂O) y 5-12% cal (CaO).

La sílice es la principal materia prima de cualquier tipo de vidrio, el sodio proporciona una mayor facilidad en el proceso de fundición y el calcio aporta una gran estabilidad química,

ya que sin este el vidrio sería soluble en agua. También se pueden añadir otros compuestos con el fin de obtener propiedades específicas para su aplicación posterior.

Este vidrio es fácilmente moldeable y el más barato y utilizado debido a la facilidad que ofrece en el proceso de fundición. Por eso, la mayor parte del vidrio incoloro y transparente tiene esta composición. Presenta una buena transmisión de luz para poder utilizarse como ventanas, permitiendo el paso de esta a una longitud de onda inferior a 400 nm (luz UV).

Las ventanas de las casas y edificios están hechas con este tipo de vidrio. La diferencia entre una y otra es el espesor. Existe una reglamentación para el tipo de vidrio que se debe utilizar en cada tipo de construcción respecto a la relación entre el grosor y el tamaño (figura 3).

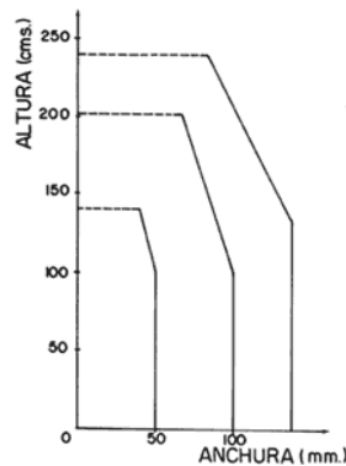


Figura 3. Relación entre el grosor y el tamaño del vidrio. [3]

La resistencia química del vidrio sódico-cálcico se ha mejorado en los últimos años al aumentar la proporción de la sílice en la composición ya que esta es poco reactiva.

La desventaja de este tipo de vidrio es que no es resistente a altas temperaturas ni cambios bruscos de esta. Por ello, se suele utilizar para fabricar objetos de uso cotidiano como botellas, vasos y jarras, como se puede apreciar en la figura 4.



Figura 4. Jarra hecha de vidrio sódico-cálcico. [4]

Vidrio de plomo

El vidrio de plomo está compuesto de sílice en un 54-65%, de óxido de plomo (PbO) en un 18-38% y de óxido de sodio en un 13-15%. Cuando el contenido de óxido de plomo es menor a 18% es conocido como cristal.

Cuando este tipo de vidrio presenta un alto contenido de óxido de plomo puede ser usado como vidrio de protección contra la radiación ya que el plomo absorbe considerablemente los rayos gama, los rayos UV, los rayos X y otros tipos de radiación (figura 5). De esta forma, es común encontrarlos en la industria nuclear.

Asimismo, cuando el plomo se encuentra en cantidades altas (mínimo 24%) el punto de fusión y la dureza disminuyen generando una superficie suave. Por otro lado, cuando el plomo se encuentra en cantidades moderadas la durabilidad aumenta.

La presencia del plomo en la composición hace que el vidrio tenga una mayor densidad e índice de refracción, proporcionándole un mayor brillo. El vidrio común tiene un índice de refracción de 1,5, mientras que la adición de plomo hace que este aumente hasta 1,7 o 1,8. El alto índice de refracción se correlaciona con una mayor dispersión. Como consecuencia, este tipo de vidrio se utiliza para fabricar lentes para cámaras fotográficas ya que, con una corrección mínima, dan luz de todos los colores y la enfocan de manera uniforme en el plano.

El vidrio de plomo al igual que el vidrio sódico-cálcico, es igual de transparente y no es resistente a altas temperaturas ni a cambios bruscos de esta. Su coeficiente de dilatación calorífica es muy elevado, lo que significa que se expande mucho cuando aumenta la temperatura.



Figura 5. Pantalla de protección en un hospital fabricada a partir de vidrio de plomo. [5]

Vidrio de boro-silicato

El vidrio de boro-silicato está formado principalmente de sílice en un 70-80%, de óxido de boro (B_2O_3) en un 7-13%, de pequeñas cantidades de alcalinos como el óxido de sodio y potasio (Na_2O y K_2O_3) en un 4-8% y de óxido de aluminio (Al_2O_3) en un 2-6%.

Este vidrio presenta un coeficiente de dilatación de aproximadamente un tercio del vidrio común. Esto le confiere una mayor resistencia al choque térmico y al calor. El boro también le proporciona una gran durabilidad y una mayor resistencia química y mecánica.

El vidrio boro-silicato tiene una densidad y un coeficiente de expansión inferior al vidrio común. Desde el punto de vista óptico, se caracteriza por tener un bajo índice de refracción y dispersión y una alta transparencia, ofreciendo una gran claridad y una transmisión de luz, sin distorsiones en un amplio espectro. La particularidad de este vidrio radica en no perder transparencia ni brillo sin la presencia de plomo.

Gracias a sus propiedades, este vidrio se utiliza principalmente en la industria química, la industria farmacéutica y en laboratorios, como se puede comprobar en la figura 6. También se usa en el hogar para platos de cocina y otros productos resistentes al calor.



Figura 6. Material de laboratorio obtenido a partir de vidrio boro-silicato. [6]

Vidrio de sílice

El vidrio de sílice, también llamado cuarzo, es un tipo de vidrio formado exclusivamente de sílice puro. El dióxido de silicio representa hasta el 99,9% de su composición.

Posee un coeficiente de expansión térmica prácticamente nulo, lo que significa que es extremadamente resistente a los choques térmicos. Cuando se calienta a temperaturas muy altas no se agrieta, aunque se enfríe rápidamente, razón por la cual este tipo de vidrio es el más cotizado.

Otras propiedades que caracterizan a este vidrio son la gran transparencia que tiene, la baja conductividad térmica y eléctrica, la alta transmitancia de rayos UV e IR y la gran resistencia a la compresión y tracción. También presenta una excelente resistencia química a la mayoría de sustancias (excepto al ácido fluorhídrico y el hidróxido de potasio). La desventaja que tiene es su baja resistencia a los álcalis.

Todas estas propiedades condicionan las aplicaciones del vidrio de sílice. Se suele utilizar como piezas de fuentes de luz, ventanas, contenedores para almacenar productos químicos, objetos que son sometidos a altas temperaturas y choques térmicos, etc.

En la figura 7 se puede observar una de las aplicaciones del vidrio de sílice.

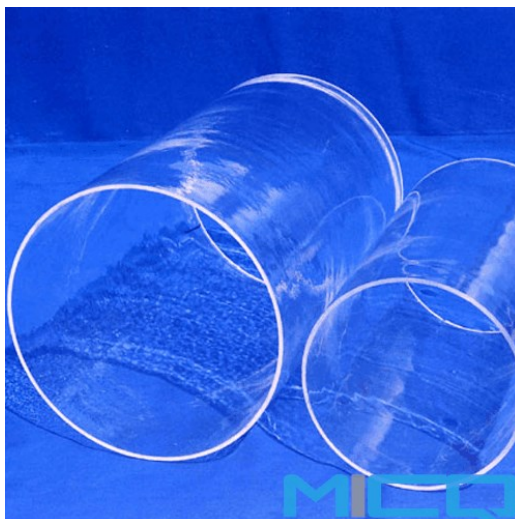


Figura 7. Tubos de vidrio de sílice. [7]

Vidrio de aluminio-silicato

El vidrio de aluminio-silicato está constituido en un 62% de sílice, en un 17% de óxido de aluminio (Al_2O_3) y en un 8%, 7% y 5% de pequeñas cantidades de óxido de calcio, óxido de magnesio y óxido de boro (CaO , MgO y B_2O_3) respectivamente.

Se caracteriza por tener una alta transparencia y una gran resistencia mecánica, lo que le confiere una mayor resistencia a impactos y a la tensión mecánica. En comparación con el vidrio boro-silicato, este presenta una mayor resistencia química (respecto al agua, ácidos, álcalis...) y térmica (mayor temperatura de uso). Debido a esta resistencia al calor, es mucho más difícil de fundir y, por lo tanto, de fabricar que el vidrio de boro-silicato.

El vidrio de aluminio-silicato se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones industriales y comerciales como, por ejemplo, su uso en pantallas de dispositivos móviles, tablets y televisores (figura 8); ventanas y parabrisas de automóviles; instrumentación y equipos de laboratorio (pipetas, tubos de centrífuga...).

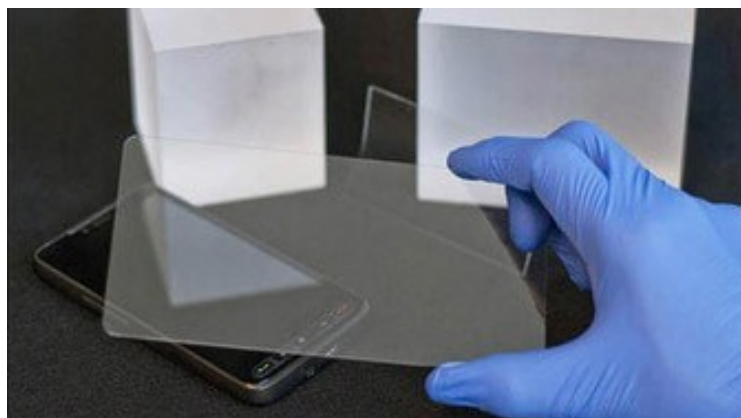


Figura 8. Pantalla protectora de móvil hecho a partir de vidrio aluminio-silicato. [8]

Según la tecnología de fabricación y su aplicación, se distinguen los siguientes tipos de vidrio: vidrio hueco, vidrio plano, vidrio colado y fibra de vidrio.

Vidrio Hueco

El vidrio hueco es un tipo de vidrio que, como resulta evidente, se utiliza para fabricar objetos huecos. Estos objetos son utilizados, en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, como envases de líquidos, alimentos, perfumes y cristalería de mesa: botellas, frascos, tarros, vasos, platos, etc.

Para fabricar estos envases se emplean dos métodos: método del soplado-soplado, utilizado para envases de boca estrecha (botellas), y el método prensado-soplado, utilizado para recipientes de boca ancha (tarros).

Tanto en un método como en el otro, la mezcla de materias primas se funde obteniéndose vidrio a su temperatura plástica (1100–1300°C). El vidrio fundido se corta con una hoja de cizallamiento para formar gotas de igual peso que el envase final. Estas gotas descenden por gravedad hasta llegar a los moldes de soplado o prensado.

En el proceso de soplado-soplado, una porción del vidrio fundido se vierte en un molde y se introduce aire, por la parte inferior, presionándolo sobre el molde (dando forma al cuello del recipiente). A continuación, se utiliza un deflector sobre la parte superior del molde para inyectar el aire a través del cuello. Estos envases parcialmente terminados se denominan “parisons”. Un brazo de inversión se encarga de llevar los “parisons” a un segundo molde, donde se introduce aire para que el vidrio adquiera su forma final (dando forma al cuerpo).

En las figuras 9 y 10 se muestra de forma visual el proceso de soplado-soplado paso a paso.

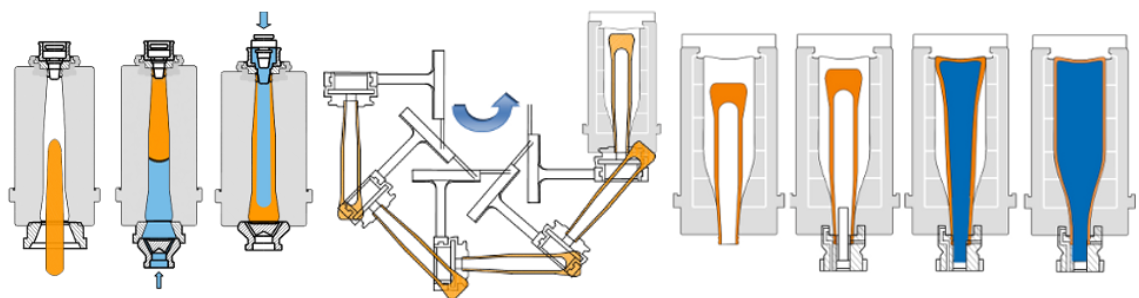


Figura 9. Proceso soplado-soplado. [9]

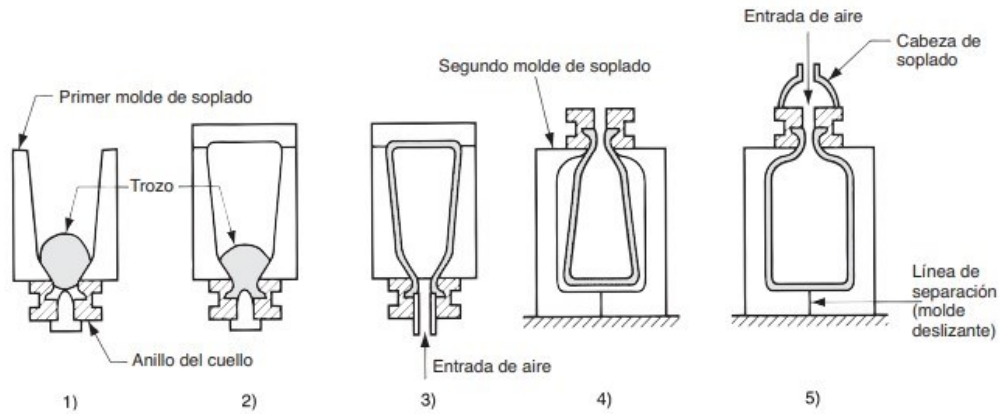


Figura 10. Proceso soplado-soplado. [10]

La técnica del soplado también puede ser artesanal. Se introduce un tubo o caña de soplar en el interior del vidrio fundido. Se sopla por el extremo opuesto al que se ha introducido, de forma que se obtenga una burbuja de vidrio (figura 11). Para darle la forma deseada a la burbuja se emplean movimientos de rotación y balanceo. Finalmente, se retira la caña de soplar, se elimina el vidrio que sobre y se deja enfriar.



Figura 11. Técnica del soplado. [11]

En el proceso de prensado-soplado, una porción de vidrio fundido se deposita en el molde de prensado. Un émbolo de metal largo impulsa el vidrio fundido hacia las paredes del molde formando lo que se conoce como “parison”. A continuación, el “parison” se transfiere al molde de soplado sostenido por un collar. Se introduce aire en el molde para que el vidrio adquiera la forma final. Esta segunda etapa es exactamente igual que en el método soplado-soplado.

En la figura 12 se muestra de forma visual el proceso de prensado-soplado.

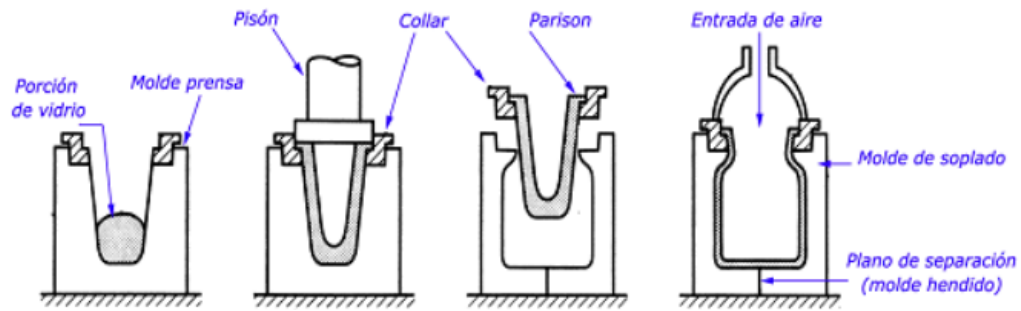


Figura 12. Proceso prensado-soplado. [12]

Vidrio Plano

Es el vidrio más utilizado en la construcción y arquitectura, empleándose en vehículos, edificios, casas, etc. Se emplea para fabricar ventanas, espejos, puertas, suelos, recubrimientos para muebles... Existen diferentes métodos para obtener este tipo de vidrio, pero el más utilizado es el método de flotación.

En este proceso, el vidrio fundido se extrae del interior del horno por una abertura (garganta), que proporciona una lámina con un espesor determinado. Esta lámina se extiende uniformemente sobre una piscina de estaño fundido, quedándose flotando sobre este, debido a la diferencia de densidades. Durante el desplazamiento, los rodillos se encargan de proporcionarle un grosor uniforme a la lámina. Para evitar la oxidación del estaño, la cámara contiene una atmósfera protectora compuesta de hidrógeno y nitrógeno.

En la figura 13, se puede observar cómo se extiende la lámina de vidrio sobre la piscina de estaño fundido.

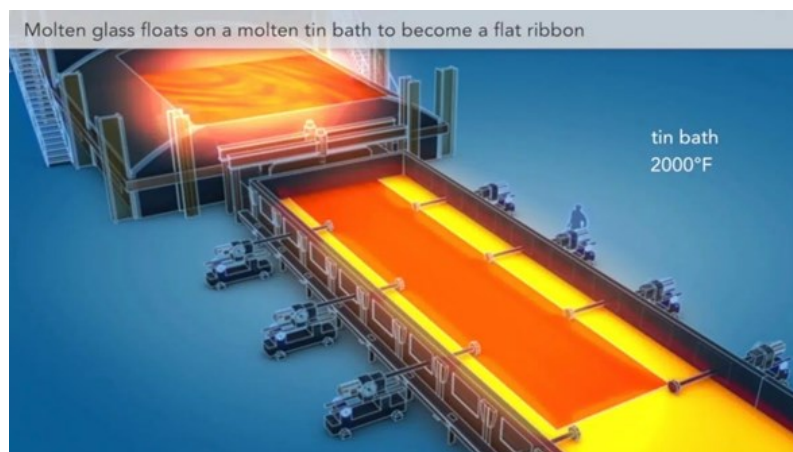


Figura 13. Lámina de vidrio sobre piscina de estaño fundido. [13]

Finalmente, el vidrio plano se somete a un proceso de templado y enfriamiento, es decir, pasa por un túnel en el que la temperatura va disminuyendo con la finalidad de que el vidrio se enfríe sin tensiones internas. Se utilizan cámaras infrarrojas (termográficas) que miden sólo en un rango espectral y controlan la temperatura del proceso sin necesidad de estar en contacto con el vidrio, como se aprecia en la figura 14.

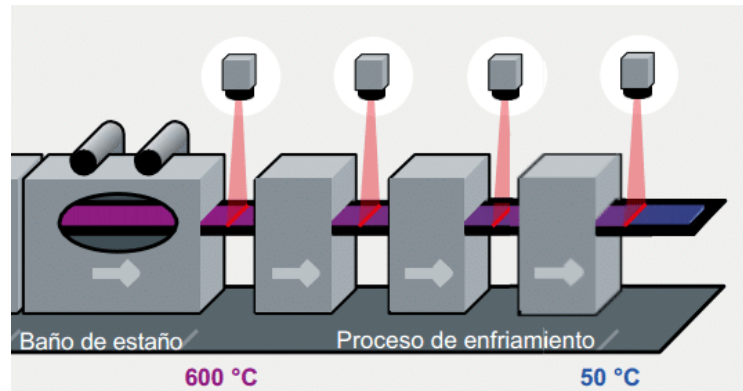


Figura 14. Proceso de enfriamiento. [13]

En la figura 15 se muestra el proceso de fabricación del vidrio plano de forma visual.

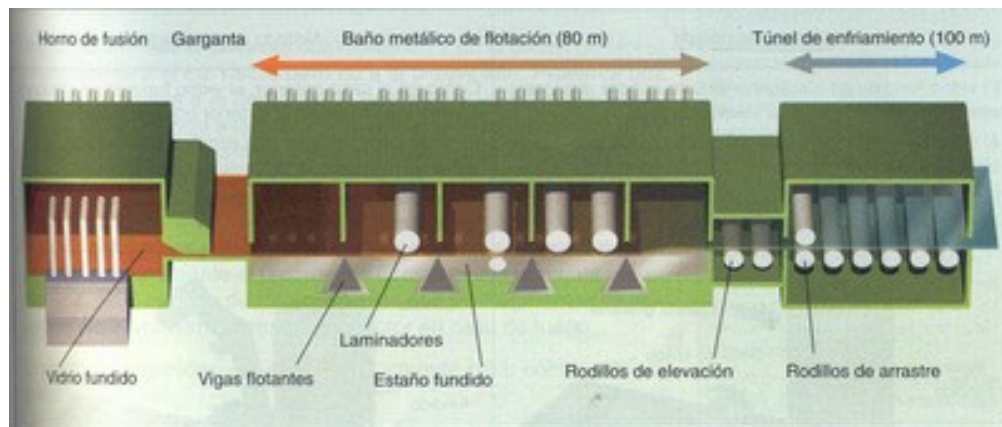


Figura 15. Proceso de fabricación del vidrio plano. [14]

Vidrio Colado

El vidrio colado se caracteriza por ser barato, diverso y muy demandado. Se emplea en muebles, ventanas, claraboyas, techos, objetos decorativos, pero sobre todo para obtener las grandes planchas de vidrio industrial. El vidrio colado, como su propio nombre indica, se obtiene mediante la técnica colada, que es de las más utilizadas en la escultura del vidrio. A esta técnica también se le denomina "hot casting".

El vidrio fundido se almacena en una cubeta giratoria y se extrae por la zona inferior de esta, depositándose sobre una mesa o molde, que dispone de un rodillo laminador (puede tener dibujos grabados) para darle una forma determinada. El grosor del vidrio dependerá de la distancia del rodillo a la mesa. El proceso de obtención del vidrio colado se conoce como técnica colada (figura 16)

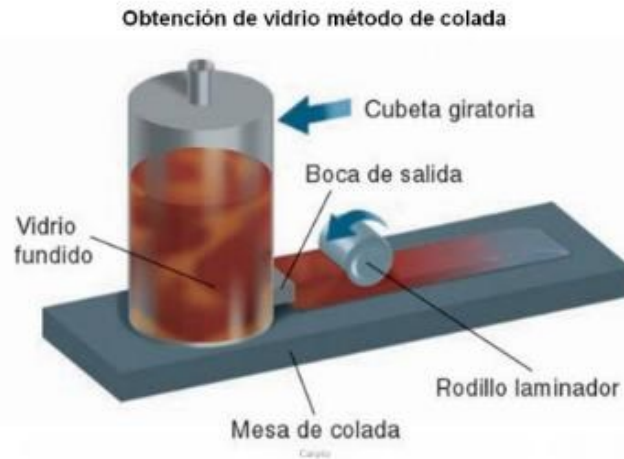


Figura 16. Técnica colada. [14]

Fibra de Vidrio

La fibra de vidrio es un material que está formado por hilos de vidrio muy delgados, que se entrelazan para formar una estructura (figura 17) como, por ejemplo, una malla o patrón, una tela, un tubo, una varilla, etc.

Estos hilos se obtienen con el paso del vidrio fundido a través de un recipiente llamado “espinerette”, una pieza muy resistente térmicamente, que contiene orificios pequeños de 2 mm de diámetro, a través de los cuales circula el vidrio fundido. De esta manera, se obtienen hilos muy finos de vidrio. Las fibras se pueden poner en contacto con resinas termoestables con el objetivo de reforzarlas y alcanzar un mayor endurecimiento de estas.

Las fibras de vidrio tienen multitud de aplicaciones como: la construcción (piscinas), la industria química, aeronáutica (barcos y yates), aeroespacial y textil. También se pueden emplear como materiales aislantes. Se caracterizan por su transparencia, su alta dureza, su flexibilidad y durabilidad.



Figura 17. Bobinas y entrelazado de hilos de fibra de vidrio. [15]

Según el tratamiento aplicado a los vidrios primarios, se pueden diferenciar los siguientes tipos de vidrio: vidrio templado, vidrio laminado, vidrio curvo, vidrio reflejante, vidrio insulado y vidrio esmerilado. Todos ellos son vidrios secundarios, los cuales se obtienen tras un segundo proceso de fabricación a partir de un vidrio primario.

Vidrio Templado

El vidrio templado es un tipo de vidrio procesado por tratamientos térmicos o químicos (menos usuales) para aumentar su resistencia mecánica y térmica (aumenta de 60°C a 240°C) respecto al vidrio común.

Se obtiene sometiendo al vidrio a un proceso de calentamiento (650°C) que plastifica la superficie e inmediatamente después se enfría utilizando aire consiguiendo poner las superficies exteriores en compresión y las superficies internas en tracción. Estos vidrios obtienen su forma final antes de entrar en el horno de templado, ya que después del templado no se puede realizar ninguna modificación o corte.

El vidrio templado es robusto y presenta una gran resistencia mecánica lo que hace que sea el vidrio más seguro, ya que cuando se rompe, el vidrio explota en pequeños fragmentos que no causan heridas cortantes. Se calcula que es unas cinco veces más resistente a la presión e impactos que el vidrio común. Es por ello que se suele utilizar con frecuencia en el ámbito de la seguridad y protección.

También es resistente a la compresión, a la torsión y a la flexión, además de que resiste cambios bruscos de temperatura y tensiones térmicas seis veces mayor que la de un vidrio sin temprar.

Se puede utilizar como barandillas y escaleras; encimeras de cocina y mamparas de ducha; escaparates y fachadas de locales; vitrinas con productos lujosos (figura 18); puertas de hornos y frigoríficos.



Figura 18. Vitrina hecha a partir de vidrio templado. [16]

Vidrio Laminado

El vidrio laminado está formado por dos o más hojas de vidrio de cualquier grosor, que se unen entre sí mediante láminas translúcidas de butiral de polivinilo (PVB), que tienen buena adherencia y elasticidad. A diferencia de la mayoría de materiales elásticos, el vidrio laminado conserva de forma intacta la transparencia y durabilidad.

Este tipo de vidrio no es capaz de aguantar con tanta facilidad temperaturas excesivamente elevadas como el vidrio templado debido a las láminas que lo constituyen. Sin embargo, sigue siendo más resistente que un vidrio común, puesto que cuando se rompe, las láminas de plástico evitan que los fragmentos de vidrio salgan disparados, quedándose unidos al butiral de polivinilo, proporcionando una mayor seguridad (figura 20).

También, es capaz de mejorar los efectos de la degradación del color, proporcionar una reducción del ruido de hasta un 30% respecto a un vidrio común del mismo espesor y filtrar la radiación ultravioleta (UV) en más de un 95% añadiendo óxidos metálicos en las capas internas.

Se utiliza en escalones y superficies sobre las que se camina (figura 19), en las ventanas y parabrisas de los vehículos, en las cabinas de aviones y en los vidrios antirrobo y antibalas, protegiendo de esta manera a las personas o bienes.



Figura 19. Superficie fabricada a partir de vidrio laminado. [17]



Figura 20. Diferencias entre la rotura del vidrio templado y laminado. [18]

Vidrio Reflectante

El proceso de fabricación consiste en depositar una fina capa de óxidos metálicos, mediante un sistema de pirólisis, sobre la superficie del vidrio utilizando tecnología CVD (deposición química de vapor) para formar capas con una alta reflectividad que producen un efecto “espejo”.

Los vidrios reflectantes controlan el exceso de calor reflejando la energía solar incidente y absorbiendo su calor. Se trata de un regulador de la temperatura que contribuye al ahorro de energía. Retienen hasta el 94% de la radiación UV y permiten la entrada de luz solar entre un 8 y un 31%.

También presentan una alta durabilidad, una gran resistencia al rayado y proporcionan una mayor privacidad desde el exterior. Otra característica de este material es que su revestimiento reflectante es uniforme, lo que significa que desde el interior se puede tener una visión clara del exterior.

Se utiliza en fachadas de casas y edificios (figura 21), en los escaparates y vitrinas de comercios, en ventanas y cortinas...



Figura 21. Vidrio reflectante utilizado en la fachada de un edificio en Madrid. [19]

Vidrio Insulado

El vidrio insulado está formado por dos o más vidrios que están separados entre sí por una cámara de aire o gas deshidratado (argón, kriptón o una mezcla de ambos), que se encuentra sellada herméticamente y cuyo espesor varía de 6 a 12 mm (figura 22). Alcanza un grado de aislamiento térmico excelente y constituye una barrera prácticamente impenetrable entre el interior y exterior.

Este vidrio reduce el ruido externo en hasta 42 dB y elimina la presencia de humedad en el interior de la cámara, evitando que se vea empañado. Reduce la radiación térmica (rayos UV) hacia el interior y, por consiguiente, aumenta el ahorro energético hasta un 70% reduciendo los costes de climatización. Elimina el efecto de pared “fría”.

El vidrio insulado es resistente a los cambios de temperatura y a la deformación, lo que le confiere una mayor durabilidad y ser menos propenso a romperse o deformarse con el tiempo. Además, presenta una mejor estética y un fácil mantenimiento.

Se utiliza principalmente como ventanas, domos y fachadas tanto en interiores como en exteriores. De todas sus aplicaciones destacan: estaciones de metro y trenes, oficinas, estudios de grabación, bibliotecas, aeropuertos, exposiciones de museos y galerías, etc.



Figura 22. Vidrio insulado. [20]

Vidrio Curvo

El vidrio curvo se fabrica principalmente mediante el doblado por gravedad, que consiste en depositar una placa de vidrio sobre un molde curvo. Una vez que se alcanza la plasticidad del vidrio, tras calentarlo a unos 600°C , se esparce por gravedad adoptando la forma del molde. El proceso termina una vez que el vidrio se ha enfriado lentamente, con el objetivo de evitar la aparición de tensiones internas en su estructura. Se trata de un proceso que requiere mucho tiempo.

Este vidrio puede ser distribuido como vidrio templado, laminado, insulado, etc. Hoy en día se pueden obtener todas las formas posibles de curvatura.

Se utiliza en fachadas de edificios (figura 23), diseño de interiores (muebles, mostradores de hostelería, mamparas baño, etc.), barandillas, ascensores, escaleras, puertas giratorias, etc.



Figura 23. Vidrio curvo utilizado en un edificio en Toronto, Canadá. [21]

Vidrio Esmerilado

El vidrio esmerilado, también denominado vidrio opaco, es un tipo de vidrio que ha sido sometido a un tratamiento de esmerilado. Este proceso consiste en pulir y abrillantar la superficie del vidrio con un mineral abrasivo llamado esmeril, proporcionándole un efecto translúcido, es decir, el vidrio dejar pasar la luz, pero no permite el 100% de visibilidad.

Una gran ventaja que tiene este tipo de vidrio es que la opacidad puede controlarse durante el proceso de producción. Otras de las características que definen a este material es su dureza y resistencia.

El vidrio opaco ofrece una mayor privacidad y una estética mucho más elegante. Se suele utilizar para fabricar elementos decorativos como lámparas, muebles o bombillas. También puede usarse en mamparas de baño, ventanas, puertas y como elemento de división en espacios interiores, como se puede apreciar en la figura 24.



Figura 24. Vidrio esmerilado. [22]

1.5. Usos y aplicaciones.

El vidrio es un material que tiene una enorme presencia en la vida cotidiana de las personas, además de ser uno de los materiales más utilizados en la industria debido a las excelentes propiedades que tiene y a la variedad de opciones que ofrece. De entre todas sus aplicaciones destacan.

- **Envases y vajilla.**

Una de las principales aplicaciones que tiene el vidrio es la fabricación de todo tipo de envases como frascos, botellas, tarros, etc. Las botellas de vidrio sirven para almacenar bebidas (principalmente alcohólicas). Los frascos de vidrio se utilizan para almacenar

perfumes y cosméticos. Los tarros sirven para guardar y conservar alimentos de todo tipo. También se producen envases para almacenar productos químicos y farmacéuticos.

Otro uso innovador ha sido la vitrocerámica, que consiste en un sistema cocción de alimentos en el que la fuente de calor y el recipiente que se quiere calentar están separados por vidrio.

El vidrio también se utiliza en la fabricación de vajillas como vasos, copas, platos, tazas, etc. El vidrio ha sido uno de los materiales principales que ha fomentado la sustitución de la cerámica en objetos de cocina.

- **Construcción.**

El vidrio es un material esencial en la construcción debido a que presenta una apariencia limpia y amplia en los espacios en los que se utiliza, además de las diferentes texturas y colores que puede tener. Se puede observar su uso en ventanas, puertas, fachadas de edificios, claraboyas, escaleras y estructuras de refuerzo, entre otros.

Hay que destacar que el vidrio es uno de los componentes principales en la fabricación de los focos, que proporcionan iluminación en todo tipo de espacios.

- **Diseño de interiores y mobiliario.**

El vidrio destaca por su uso en el diseño de interiores y en el mobiliario de los hogares y oficinas. Se utiliza para fabricar espejos, mamparas, estanterías, vitrinas, revestimiento de paredes y todo tipo de adornos. La ventaja de este material es que puede ser moldeado y cortado a gusto del consumidor.

- **Electrodomésticos y Electrónica.**

Propiedades características del vidrio como la resistencia térmica, eléctrica y química, hacen que pueda ser usado en electrodomésticos, equipos electrónicos y en el campo de la iluminación (principalmente en bombillas).

Respecto a los electrodomésticos, destacan las heladeras o frigoríficos, que utilizan separadores de vidrio. También, los microondas y los hornos incorporan un vidrio termorresistente que permite la visibilidad y el control de la cocción de los alimentos.

Por otra parte, los televisores, teléfonos móviles, tablets, entre otros equipos electrónicos, incorporan pantallas de vidrio con el fin de proteger y controlar el dispositivo. Además, existen derivados del vidrio que se utilizan como protectores de pantalla frente a golpes, rayones, etc.

Existe un tipo de vidrio, llamado vidrio dieléctrico, que se polariza con la presencia de un campo eléctrico. Es por ello, que se utiliza para fabricar cintas para condensadores electrónicos.

- **Automotriz y transporte.**

Otra aplicación importante que presenta el vidrio, es su uso en la industria automotriz y en el transporte. El vidrio forma parte de parabrisas, ventanas, espejos y de componentes ligeros de coches, barcos y aviones.

La combinación del plástico con fibra de vidrio origina un material que combina la flexibilidad del plástico junto con la resistencia del vidrio. Se utiliza habitualmente en la industria automovilística y naval donde se emplea para obtener carrocerías de coches y barcos.

- **Tecnología médica y vidrio óptico.**

Debido a la resistencia térmica pero principalmente química, el vidrio se emplea bastante en instrumentos y equipos de laboratorio, especialmente en la industria farmacéutica. De esta manera, forman parte de crisoles, tubos de ensayo, pipetas, matraces y multitud de recipientes químicos. De igual modo, se emplea como protección frente a la radiación de rayos X, gamma y ultravioleta.

El vidrio también se utiliza en aplicaciones ópticas, con el fin de fabricar equipos que se encarguen de la captación de la luz y de las imágenes, de corregir la visión y de progresar en el sector de la telecomunicación y de la informática. El vidrio se ha convertido en el material óptico por excelencia.

Respecto a las aplicaciones mencionadas anteriormente, se tiene como ejemplo: las cámaras, las grabadoras, las lentes, las gafas de sol, los microscopios o telescopios...

Existe un tipo de fibra de vidrio conocido como fibra óptica, que tiene un gran peso en la industria de la telecomunicación y el internet puesto que permite la transmisión de datos de manera más rápida y eficiente. Hoy en día, se usa para ofrecer internet de banda ancha a base de fibra óptica.

- **Energía renovable.**

El vidrio tiene un gran impacto en equipos para la producción de energía renovable, formando parte de paneles solares y turbina eólicas. Por ejemplo, en el caso de los paneles solares, el vidrio protege las células de silicio y es capaz de concentrar y captar la luz solar de forma más eficiente.

De cara al futuro, se está trabajando en lo que se conoce como vidrio fotovoltaico. Este material pretende captar la luz solar y convertirla en energía eléctrica para cargar aparatos electrónicos y proporcionar iluminación.

1.6. Estudio de mercado (producción, economía y medioambiente).

Los productos más utilizados en la industria del vidrio son: la fibra de vidrio, el vidrio plano, el vidrio hueco y productos específicos tales como lentes, fibras ópticas, etc. Los sectores que tienen una mayor demanda de vidrio son: la industria del envase, la automotriz y la construcción. El vidrio es un producto imprescindible para aumentar la fortaleza las economías, alcanzar los objetivos del Pacto Verde de la UE y conseguir la plena circularidad de los envases.

La industria del vidrio en España está constituida por empresas y fábricas que se dedican a su producción y transformación. Estas empresas emplean a miles de personas y contribuyen al desarrollo económico y tecnológico del país. Concretamente, la industria del vidrio española emplea a 11.000 personas, de las cuales 4.000 son empleos directos, otros 5.500 son empleos indirectos y los 1.400 restantes son inducidos. En particular, más del 95% de los 4.000 empleos directos son permanentes y duran hasta 15 años, el doble del promedio nacional.

Como se puede observar en la figura 25, el número de empresas que se dedican a la fabricación de vidrio y derivados de este en España, ha ido disminuyendo paulatinamente a lo largo de los años, excepto en 2013 y 2018, años en los que se registró un ligero aumento en el número de empresas. En 2008 había 1266 empresas, valor máximo del periodo comprendido entre 2008 y 2020, y en 2020 se alcanzó el segundo valor más pequeño, 939 empresas.

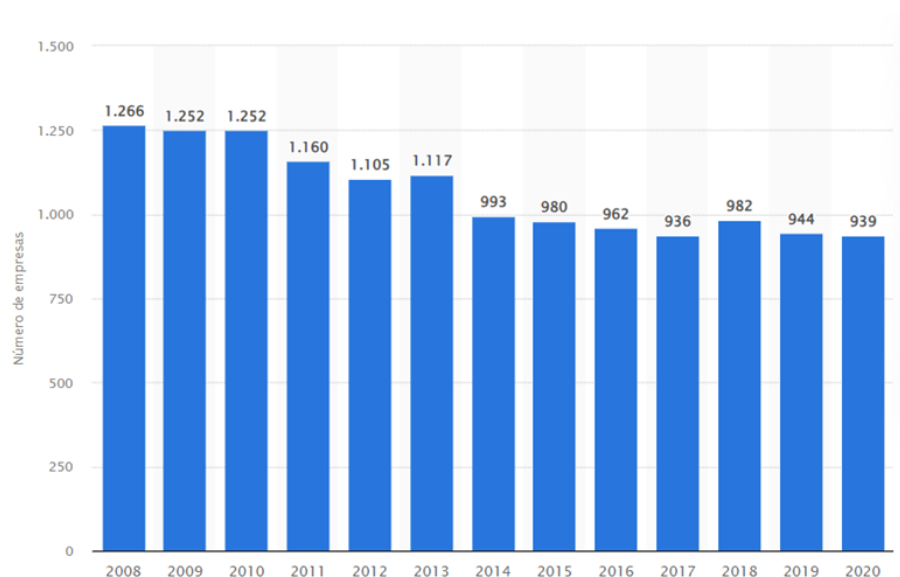


Figura 25. Número de empresas dedicadas a la fabricación del vidrio y derivados en España de 2008 a 2020. [23]

Los principales países productores de vidrio a nivel mundial son: China, Estados Unidos y Alemania. Estos países destacan por su gran producción y la calidad de sus productos.

China se ha convertido en el líder mundial gracias a la disponibilidad de tecnología y maquinaria avanzada y de materias primas para la producción de vidrio. Estados Unidos presenta una industria del vidrio bastante desarrollada, siendo el segundo país más importante en cuanto a la fabricación de vidrio. Por último, Alemania se ha convertido en uno de los principales productores de vidrio en los últimos años debido a su producción tan diversa.

En la figura 26, se muestra la producción anual de vidrio en España entre los años 2014 y 2021. Entre el 2014 y el 2019, la producción de vidrio alcanzó su valor máximo en 2019 con 3.797 millones de toneladas. En 2020, la pandemia de Covid-19 afectó significativamente a la producción de vidrio a nivel mundial. Por ello, la producción total se redujo en 2020 en un 6,8% (257.183 toneladas). Sin embargo, en 2021 se recuperaron los valores de 2019, superando los 3,8 millones de toneladas.

Producción anual de vidrio (t)

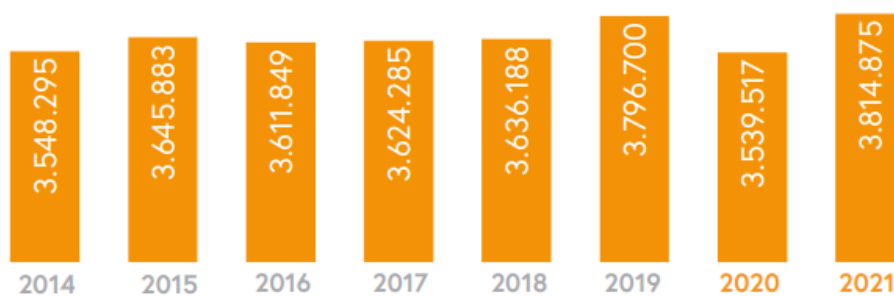


Figura 26. Producción anual de vidrio en España de 2014 a 2021. [24]

Respecto a la exportación de vidrio y sus manufacturas en 2022 (figura 27), los principales países exportadores son: China, EE.UU., Alemania, Francia, Italia y Corea del Sur. China es el líder con un valor exportado de 26.656.000\$, representando el 28,6% en las exportaciones mundiales de vidrio. Además, presenta una tasa de crecimiento entre 2018 y 2022 del 13%. El valor exportado por todos los países conjuntamente asciende hasta los 93.268.000 \$ con un crecimiento del 5% en los últimos 4 años. España se encuentra en la decimocuarta posición con un valor exportado aproximado de 1.834.000\$, lo que supone una tasa de crecimiento entre 2018 y 2022 del 5%.

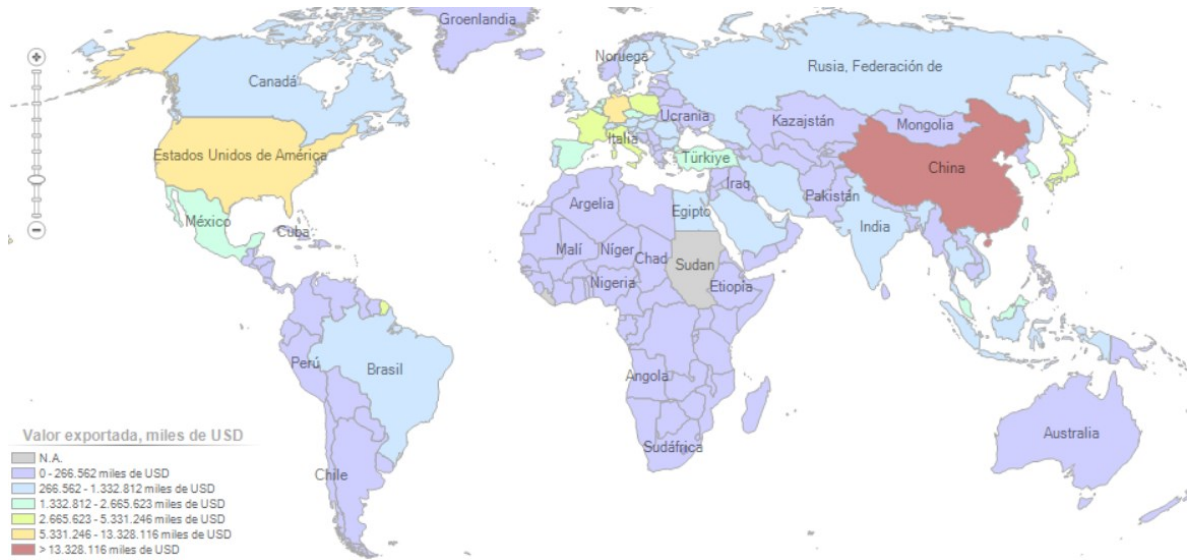


Figura 27. Mapa mundial de exportación de vidrio y sus manufacturas en 2022. [25]

Respecto a los principales países importadores de vidrio en 2022 (figura 28), destacan: EE.UU., China, Alemania, Francia, Italia y Japón. Estados Unidos es el líder con un valor importado de 10.689.000\$, representando el 11,8% en las importaciones mundiales de vidrio. También, presenta una tasa de crecimiento entre 2018 y 2022 del 6%. El valor importado por todos los países conjuntamente asciende hasta los 90.466.000 \$ con un crecimiento del 4% en los últimos 4 años. España se encuentra en la novena posición con un valor importado de 2.373.000\$, lo que supone una tasa de crecimiento entre 2018 y 2022 del 6%.

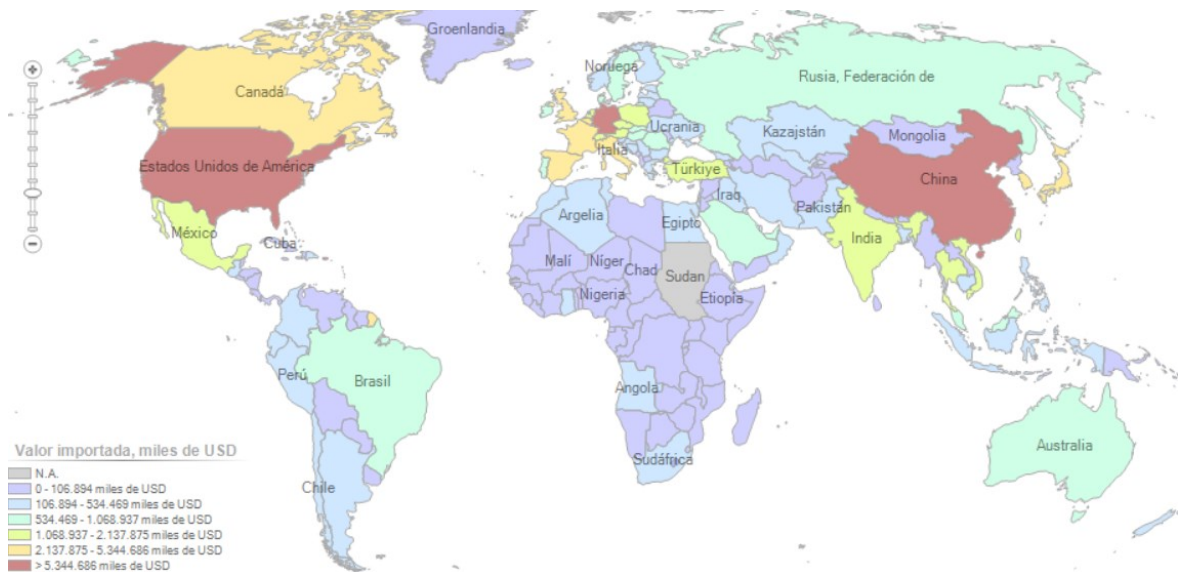


Figura 28. Mapa mundial de importación de vidrio y sus manufacturas en 2022. [25]

En 2022, la exportación de vidrio de España representó el 2% de las exportaciones mundiales de vidrio y sus derivados. De acuerdo con la figura 29, los principales países a los que exporta vidrio España son: Francia, Portugal, Alemania e Italia. Francia es el líder con un valor importado de 461.000\$, seguido de Portugal con 396.000\$. En cuanto a la tasa de crecimiento de las importaciones totales del país socio entre 2018-2022, destacan notablemente Italia y Marruecos con un 11% y un 10% respectivamente.

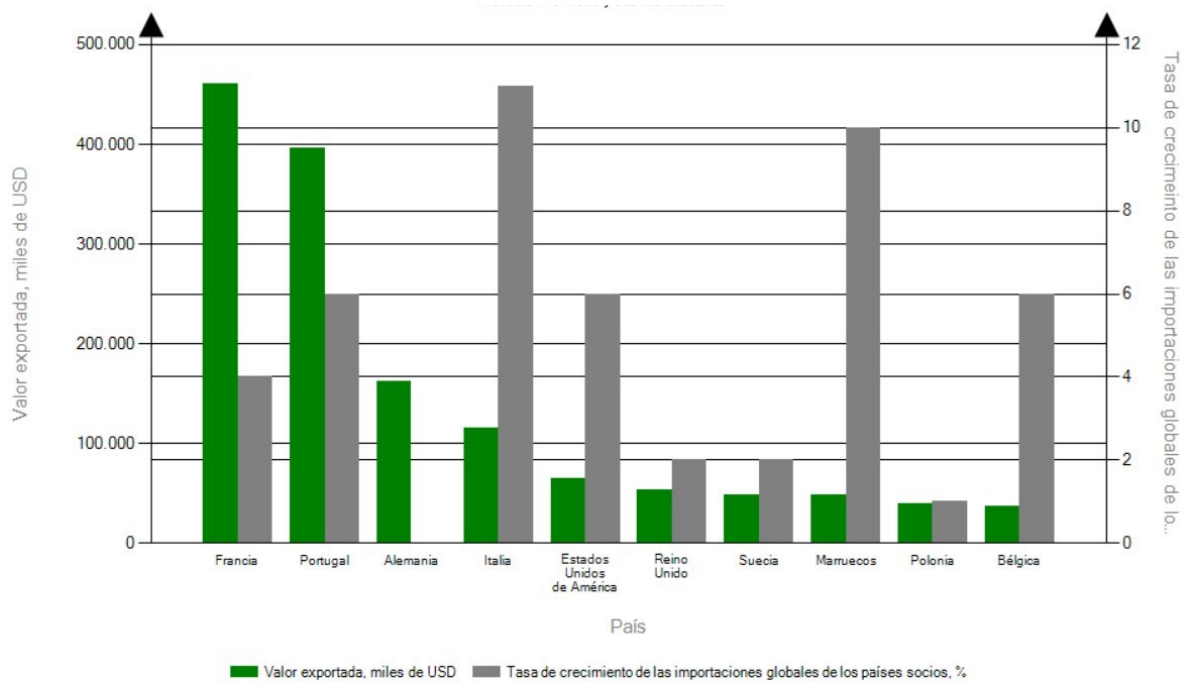


Figura 29. Países importadores de vidrio y sus manufacturas, exportados por España en 2022. [25]

En 2022, las importaciones de España representan 2,6% de las importaciones mundiales de vidrio y sus derivados. De acuerdo con la figura 30, los principales países a los que compra son: Francia, China, Alemania, Italia y Portugal. Francia es el líder con un valor importado de 331.000\$, seguido de China con 329.000\$. En cuanto a la tasa de crecimiento de las importaciones totales del país socio entre 2018-2022, destacan notablemente Bulgaria, China y Turquía con un 15% y 13% respectivamente.

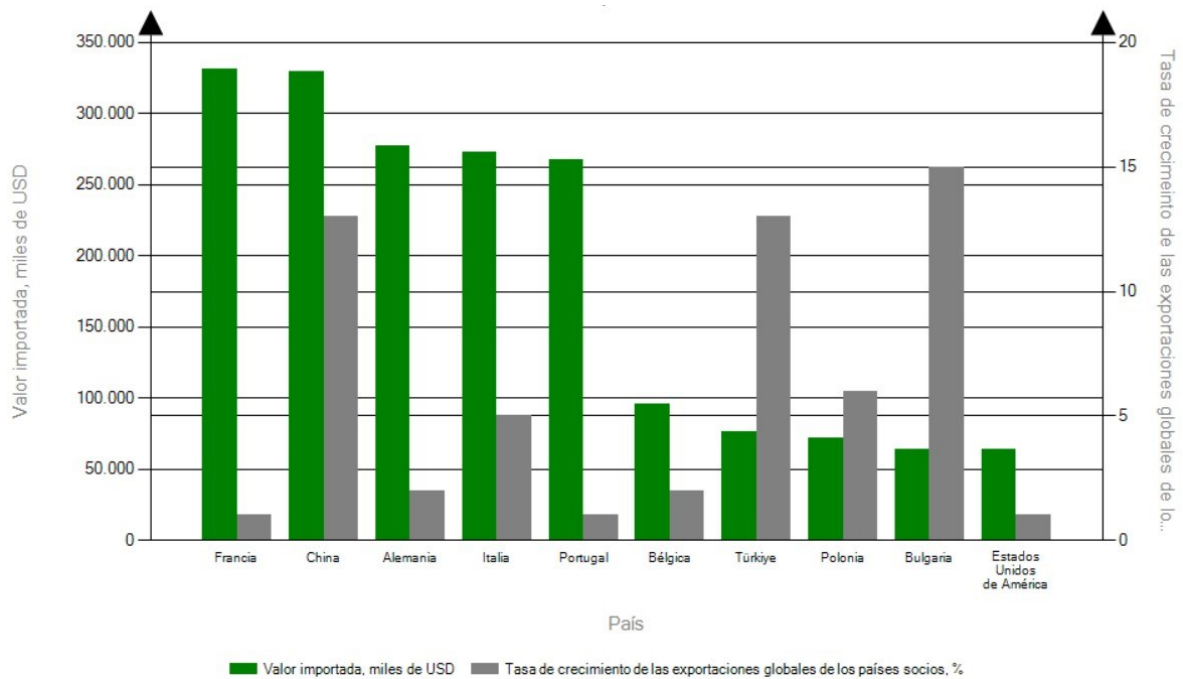


Figura 30. Países exportadores de vidrio y sus manufacturas, importados por España en 2022. [25]

En España, el 93% de las materias primas que se utilizan en la fabricación del vidrio provienen del territorio nacional. Además, el 79% de la producción de las empresas nacionales se vende en el mercado español, por lo que tiene un impacto notable en la economía española.

Según un estudio realizado por la consultora Ernst & Young, la industria del vidrio española contribuye con 860 millones de euros al PIB español. En la última década, las inversiones realizadas por las empresas que conforman la industria del vidrio, han ascendido hasta los 300 millones de euros, lo que supone una inversión aproximada de 30 millones anuales. El 54% de la inversión se ha utilizado para mejorar la eficiencia energética y reducir los niveles de emisión con el objetivo de mejorar las instalaciones ya existentes.

Respecto a la cifra de negocio de la industria del vidrio en España (figura 31), esta ha ido aumentando hasta alcanzar los 1.741 millones de euros en 2019. La crisis originada por el Coronavirus, disminuyó el valor en 231 millones euros en 2020. No obstante, en 2021 se recuperaron los valores de la cifra de negocio previos, alcanzándose los 1.730 millones de euros. Por otro lado, la industria del vidrio mundial genera unos beneficios de 68.500 millones de euros.

Cifra de negocio total (millones de euros)

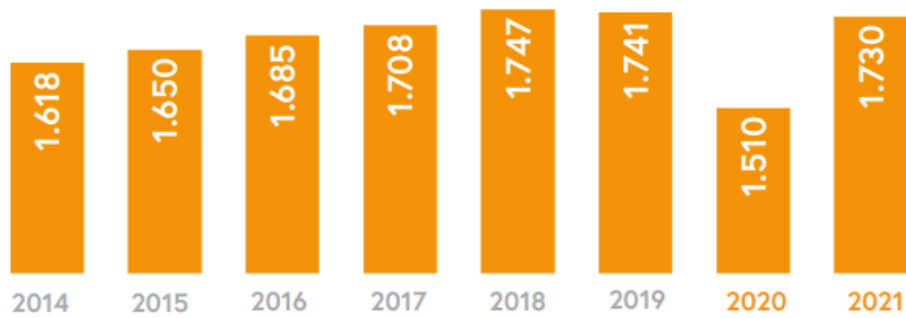


Figura 31. Cifra de negocio total en España de 2014 a 2021. [24]

El reciclaje del vidrio es un claro ejemplo de economía circular. La economía circular es un modelo de producción y consumo que consiste en reciclar y reutilizar los materiales y productos existentes durante el mayor tiempo posible para crear un valor añadido (figura 32).

De esta manera, se protege al medio ambiente reduciendo las emisiones, el consumo de materias primas y la generación de residuos; se favorece la independencia de los recursos materiales; se fomenta el empleo, promoviendo un mayor crecimiento económico; y se beneficia la economía nacional, reutilizando residuos como materia prima.

El objetivo de la economía circular es alargar el ciclo de vida de los productos aprovechando al máximo los recursos materiales de los que se disponen. De esta forma, se garantiza un crecimiento sostenible con el tiempo.



Figura 32. Modelo de economía circular. [26]

Este modelo se diferencia notablemente del modelo económico lineal (figura 33), basado en extraer, producir, consumir y tirar, que requiere grandes cantidades de energía y materiales, baratos y de fácil acceso. Se trata de un modelo tradicional que daña el medio ambiente y que agotará las fuentes de materias primas, tanto materiales como energéticas. Es un tipo de economía que depende fuertemente de las materias primas, lo que supone precios volátiles y elevados. Por todo ello, es necesario llevar a cabo una transición hacia el modelo económico circular.

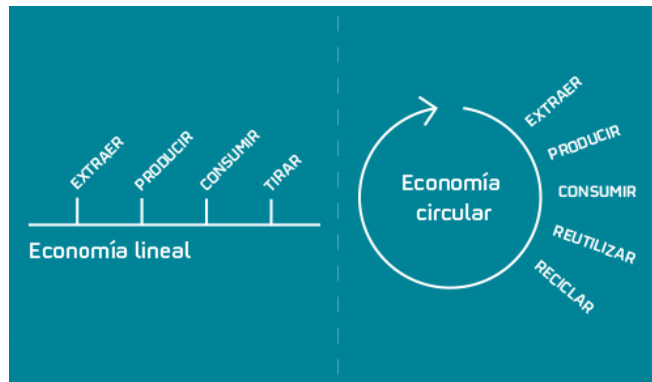


Figura 33. Diferencias entre la economía lineal y circular. [27]

Como se aprecia en la figura 34, en la última década en España, la cantidad de vidrio reciclado ha ido aumentando considerablemente hasta llegar a 2020, año en el que la cantidad que se recicló disminuyó 52.141 toneladas respecto al 2019 (958.939 toneladas), mientras que en 2021, aumentó hasta alcanzar las 950.552 toneladas de vidrio recicladas.

Evolución de las toneladas de vidrio recicladas en España

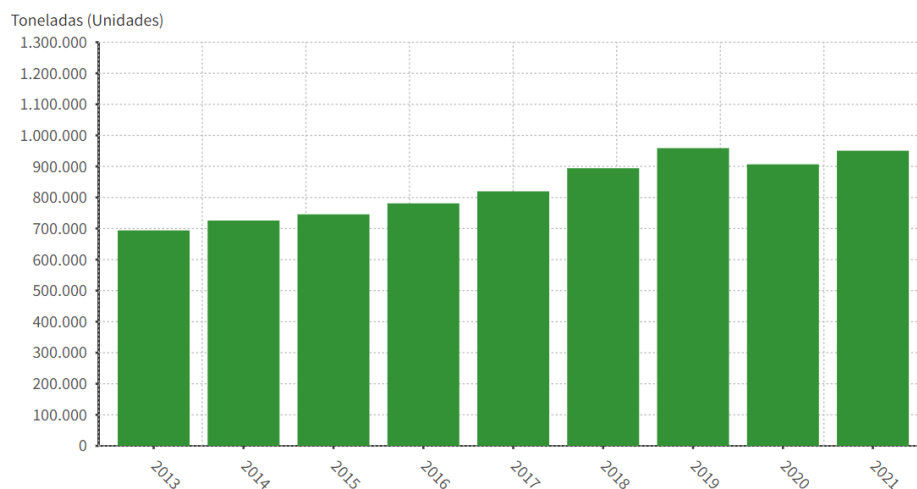


Figura 34. Evolución de toneladas de vidrio recicladas en España desde 2013 hasta 2021. [28]

En España se reciclan aproximadamente 9 millones de envases de vidrio al día y más de 6.000 por minuto, uno por cada 193 habitantes. De esta manera, se consigue ahorrar energía, disminuir las emisiones de CO₂ y reducir el uso de materias primas. En 2022, se logró ahorrar 723.351 MWh de energía, lo mismo que dos meses de consumo energético de todos los hospitales de España. También, se consiguió evitar la extracción de 1.215.000 toneladas de materias primas y la emisión de 587.432 toneladas de CO₂ a la atmósfera, equivalente a dar la vuelta al mundo en avión 150 veces.

Las fábricas de vidrio requieren un consumo energético muy elevado. Fundamentalmente, el consumo de energía está asociado al uso de combustibles fósiles (principalmente gas natural) en los hornos de fusión y a la electricidad utilizada tanto en los hornos como en el resto de la planta.

De acuerdo a la figura 35, en los cinco últimos años, la intensidad energética se ha reducido progresivamente desde 1,98 a 1,82 MWh/t (aproximadamente un 8%). La eficiencia energética sigue siendo fundamental ya que cualquier incremento en el coste de la energía supone un gran impacto en la rentabilidad.

Intensidad energética (MWh / t de producto)

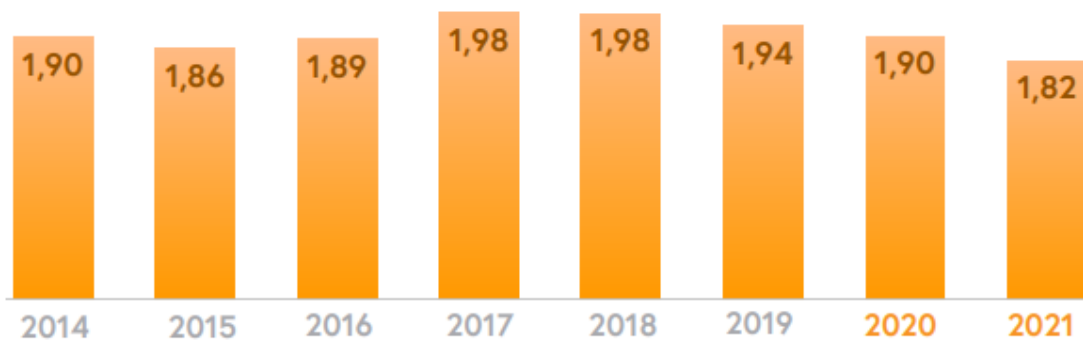


Figura 35. Intensidad energética en España desde 2014 hasta 2021. [24]

Los costes energéticos pueden llegar a alcanzar entre el 20% y el 30% de los costes de producción. Esto provoca una fuerte dependencia energética, lo que hace vulnerable a la industria del vidrio ante aumentos significativos en el precio de la energía, como el que se ha producido en 2022 a consecuencia del conflicto de Ucrania. Es por ello que muchas fábricas han tenido que paralizar la producción para evitar importantes pérdidas

Desde que empezó la crisis energética, los precios del vidrio han aumentado un 40%. Durante el primer semestre de 2023, los precios se han incrementado casi un 30%, llegando a oscilar entre un 30 y un 60% el coste energético respecto del coste total de producción.

Algunas fábricas han decidido instalar hornos eléctricos para sustituir a los hornos de gas y han aumentado el uso de energías renovables, con instalaciones fotovoltaicas y eólicas, para cubrir parte del consumo energético.

El uso de combustibles fósiles es el principal responsable de la emisión de CO₂ en las fábricas de vidrio. En relación a la intensidad de CO₂ (figura 36), durante el periodo comprendido entre 2014 y 2019, se ha conseguido mantener la intensidad de CO₂. Además, no solo se ha mantenido el valor, sino que en el año 2021 se ha reducido en un 7%, alcanzando un valor de 0,39 toneladas de CO₂ emitidas por tonelada de vidrio fabricado, lo que supone el valor más bajo de todo el periodo.

Intensidad de CO₂ (t emitidas / t de producto)



Figura 36. Intensidad de CO₂ en España desde 2014 hasta 2021. [24]

2. MEMORIA DESCRIPTIVA Y JUSTIFICATIVA.

2.1. Materias primas.

Las materias primas que se utilizan en la fabricación de botellas de vidrio deben cumplir tres requisitos fundamentales:

- Haber suficiente cantidad para asegurar una alimentación constante al horno.
- Tener la calidad requerida por las especificaciones para cada tipo de vidrio.
- Permita mantener los costes de producción.
- Fundirse y convertirse en fluidos a una temperatura adecuada para procesos industriales.

Por otra parte, el vidrio fundido debe tener la viscosidad adecuada para poder trabajar con él a temperaturas superiores al punto de solidificación, en el punto de congelación y por debajo del mismo, evitando la desvitrificación. Además, se requiere que sea químicamente estable y posea las propiedades físicas necesarias para su aplicación.

Según el tipo de vidrio y sus propiedades, la composición de las botellas de vidrio puede ser muy variable. Pequeñas alteraciones en la composición, pueden proporcionarle al vidrio propiedades totalmente diferentes. De la misma forma, variaciones en los parámetros de fusión pueden modificar las propiedades finales cuando se trata de composiciones similares.

Las materias primas que forman parte de las botellas de vidrio se pueden clasificar según el papel que desempeñan durante el proceso de fusión en:

- **Vitrificantes.**

Estas sustancias constituyen el componente principal de las botellas de vidrio y desempeñan un papel fundamental en la formación de la estructura vítrea. Se encargan de conferirle las propiedades principales, proporcionarle consistencia y transparencia, y representan el componente mayoritario (aproximadamente 70% respecto del total).

El óxido de silicio (llamado comúnmente sílice) es la sustancia vitrificante más utilizada, su fórmula química es SiO_2 (figura 37). Las principales fuentes del óxido de silicio son el cuarzo y la arena sílice, siendo esta última la más utilizada, presente en el lecho de los ríos y en las canteras. Todas las arenas de las que se obtiene el óxido de silicio contienen una pequeña cantidad de Fe_2O_3 , que es un agente colorante que tiñe el vidrio de color azul. También, presentan cantidades variables de arcilla, que debe ser eliminada a través de tratamientos de lavado, flotación o separación magnética.

Generalmente, el tamaño de los gránulos de la arena debe estar entre 0,1 y 0,3 mm, excepto en algunos casos, en los que se puede llegar a 1 mm como máximo. La velocidad de fusión y por consiguiente el consumo de energía dependen fuertemente de la granulometría.

Hay que tener en cuenta la acidez y la basicidad de un vidrio, ya que, si se encuentra en el límite de basicidad, la disminución del porcentaje de SiO_2 en la composición, puede conllevar la desvitrificación que se produce por la cristalización, principal causa de los defectos en la fabricación de botellas de vidrio. Sin embargo, el aumento de la acidez supone una fusión incompleta dando lugar a un vidrio más duro y difícil de trabajar.

Por lo general, la adicción de óxido de silicio aumenta, entre otras características, la elasticidad y dureza, propiedades fundamentales del vidrio.



Figura 37. Óxido de silicio. [29]

- **Fundentes.**

Estos compuestos favorecen la formación del vidrio, disminuyendo la temperatura de fusión y facilitando su elaboración. Tienen una composición aproximada del 15% respecto del total.

El carbonato de sodio es la sustancia fundente más utilizada cuya fórmula química es Na_2CO_3 (figura 38), ampliamente utilizado debido a sus propiedades vítreas y su precio económico. Una gran parte del carbonato sódico que se utiliza en la fabricación de botellas se obtiene mediante el método Solvay, que consiste en tratar el cloruro de sodio con bicarbonato de amonio para formar bicarbonato de sodio, el cual se somete a una descarbonatación.

Esta sustancia tiene doble efecto: en primer lugar, aumenta la facilidad con la que el vidrio se funde al disminuir la temperatura requerida para la fusión; en segundo lugar, amplía el rango de temperaturas en las que el vidrio puede trabajarse. Es crucial distinguir entre estos efectos, ya que uno está relacionado con la fusibilidad y el otro con la viscosidad y el proceso de trabajo. Es importante señalar que la reducción de la temperatura de fusión no necesariamente implica una disminución en la temperatura de afinado (el punto en el que se logra una mezcla perfecta en calidad y homogeneidad). Incluso es posible que la temperatura

de afinado haya aumentado si el incremento en la escala de fusibilidad retrasa la obtención de la fluidez necesaria para el afinado.

También se pueden añadir otros compuestos fundentes, pero en proporciones mucho menores, como: el óxido de magnesio (MgO), obtenido a partir de la dolomita, que se utiliza para elevar la viscosidad, aumentar el rango térmico de moldeabilidad, reducir la tendencia a la desvitrificación y mejorar la durabilidad y el óxido de potasio (K₂O), obtenido a partir de la silvina y la carnalita, que aumenta el brillo y la calidad del vidrio.



Figura 38. Carbonato de sodio. [30]

- **Estabilizantes.**

Estos componentes reducen la tendencia a la desvitrificación, aumentan la estabilidad química y mecánica del vidrio y evitan la solubilidad de la superficie del vidrio en agua. Presenta una composición aproximada del 10% respecto del total.

El carbonato cálcico (también llamado caliza) cuya fórmula química es CaCO₃ es de origen mineral y el estabilizante más utilizado (figura 39). Es un producto muy económico por lo que es bastante interesante sustituir otras materias primas por caliza para abaratar el proceso de producción de vidrio, además de que, al igual que la sosa, disminuye el punto de fusión de la mezcla. Sin embargo, el carbonato de calcio aumenta la tendencia a la desvitrificación por formación de silicato de cal que cristaliza bajo la forma de wollastonita. Esta es la principal causa por la que su empleo está limitado.

La presencia de caliza disminuye la solubilidad del vidrio en agua en condiciones frías, lo que resulta en una mayor resistencia a la lluvia y la humedad para las botellas de vidrio calcáreas. Asimismo, la caliza contribuye a hacer el vidrio menos frágil, incrementando su resistencia tanto mecánica como elástica. Además, la caliza confiere un brillo al vidrio superior al proporcionado por los álcalis.

También se pueden añadir otras sustancias estabilizantes como el óxido de aluminio (Al₂O₃), que mejora la estabilidad química, la resistencia mecánica del vidrio y la resistencia al coque térmico.



Figura 39. Carbonato de calcio [31]

- **Compuestos secundarios.**

Dentro de este grupo se encuentran los afinantes, colorantes, decolorantes, opacificantes, etc.

- Afinantes: Se emplean con el fin de homogenizar el vidrio que contiene numerosas inclusiones vítreas y burbujas generadas durante el proceso de fusión. El agente afinante más comúnmente usado es el sulfato de sodio (SO_4Na_2), que tiene la ventaja de descomponerse únicamente a una temperatura de 1240°C , por lo que la vaporización está muy limitada.
- Colorantes: Son compuestos utilizados con el propósito de conferir color al vidrio o de hacerlo incoloro, neutralizando la tonalidad verde inherente en él. La coloración en el vidrio resulta de la adición de óxidos de elementos de transición de la tabla periódica u otros compuestos, como se puede apreciar en la tabla 3. La cantidad añadida suele ser pequeña, pero varía según la intensidad de la coloración deseada.

Compuesto Químico	Coloración
Óxidos de Hierro	Verde
Óxidos de Cromo	Verde, café, azul
Sulfito de fierro	Amarillo a café-rojo
Óxidos de Níquel	Gris a verde
Óxidos de Manganeso	Violeta
Óxidos de Cobalto	Azul a violeta
Óxidos de Cobre	Azul Turquesa Rojo – Azul a verde
Selenio	Naranja a rojo
Sulfito de Cadmio	Amarillo
Oro	Rubí a rojo
Plata / Óxido de Uranio	Amarillo
Óxidos de Manganeso / Sodio – Selenio + Óxido de Cobalto	Incoloro

Tabla 3. Elementos utilizados en la coloración del vidrio. [32]

- **Decolorantes:** Son aditivos utilizados para neutralizar los efectos de color causados por impurezas en las materias primas. La pirolusita, también conocida como dióxido de manganeso (MnO_2), es la más destacada, reconocida desde tiempos antiguos como "jabón vidriero" debido a su capacidad decolorante. Al reducir los compuestos férricos a ferrosos, se puede emplear en una cantidad moderada de 250 gramos por cada 1000 kilogramos de arena.
- **Opacificantes:** Facilitan la dispersión de la luz mediante el efecto Tyndall, a través de la dispersión de pequeños cristales en la matriz vítrea, generando vidrios que son opacos.

- **Casco de vidrio.**

El vidrio es un material reciclable de manera ilimitada, permitiendo el uso predominante de vidrio reciclado en la mezcla introducida en los hornos, lo supone un ahorro de energía, de materias primas y reduce en gran parte las emisiones. Además, el casco de vidrio actúa como catalizador, acelerando la reacción entre los componentes vitrificantes y fundentes, anulando tanto el calor de reacción como el latente de fusión.

El vidrio reciclado proviene de residuos, de contenedores de reciclaje y del proceso de fabricación, en el que se producen botellas de vidrio que no se pueden comercializar, ya que porque tienen defectos o no se ha obtenido el color requerido. Se lleva a cabo un proceso de reciclaje interno para que estas botellas, una vez trituradas, se vuelvan a introducir en el horno.

Es relevante destacar que, durante periodos de producción baja, como vacaciones o reducción de la demanda, el vidrio almacenado juega un papel crucial al permitir que los hornos continúen operando sin tener que recurrir a otras materias primas.

En la actualidad, las botellas no se fabrican con un contenido del 100% de vidrio reciclado debido a que existe una gran limitación: el color. El tono verde esmeralda permite la incorporación de un mayor porcentaje, siendo este del 80-85%. Sin embargo, para el vidrio verde oscuro se añade un 50-55%, y para el color ámbar, un 45-50%. En contraste, el vidrio transparente generalmente no contiene más de un 15% de vidrio reciclado. Por lo general, las botellas de vidrio suelen tener aproximadamente un 40-45% de vidrio reciclado, de los cuales el 10% suele estar asociado a las botellas defectuosas en el proceso de fabricación, mientras que el resto proviene de vidrio reciclado externo.

2.2. Diagrama de proceso y proceso de producción.

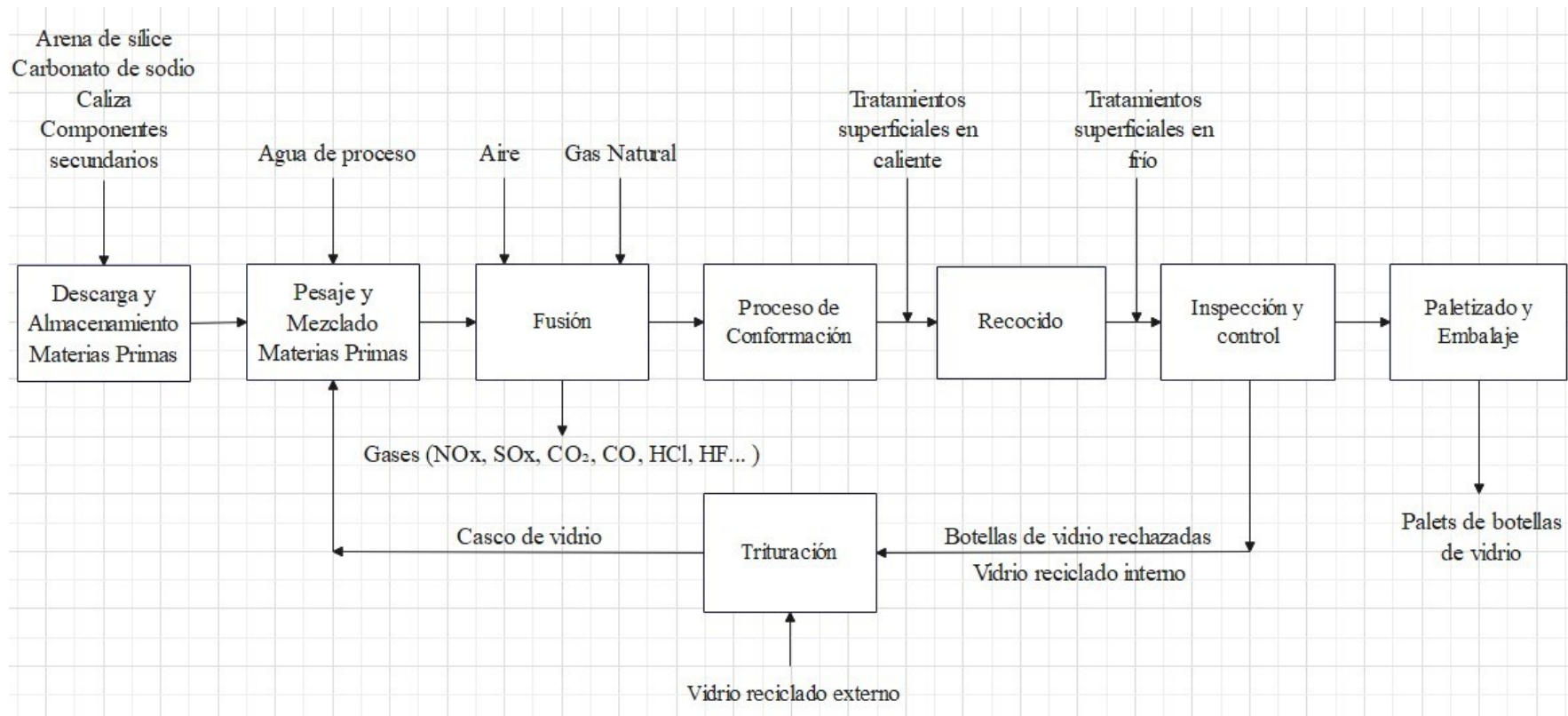


Figura 40. Diagrama del proceso de producción. [37;45;46;47]

El proceso de producción está constituido principalmente por 3 etapas: la recepción y preparación de las materias primas, el proceso en caliente y el proceso en frío. En la primera etapa, las materias primas se descargan, se almacenan en silos y posteriormente se pesan en las proporciones correspondientes y se mezclan. En la segunda etapa, las materias primas se funden en los hornos dando lugar al vidrio fundido, al cual se le dará forma mediante las máquinas conformadoras, obteniéndose las botellas de vidrio. En la última etapa, las botellas se someten a una serie de tratamientos en caliente y en frío, a un proceso de recocido, a una inspección y control mediante máquinas especializadas y por último se embalan para ser distribuidas.

El proceso de producción de botellas de vidrio es de tipo continuo, es decir, los hornos trabajan las 24 horas del día, los 365 días del año durante un periodo de 10 a 12 años (duración típica de la vida útil de un horno). Al finalizar este periodo, se realiza una parada para poder repararlo o sustituirlo por uno nuevo, incluso en algunos casos, se aprovecha para implementar nuevas modificaciones para adaptarse a las condiciones del mercado.

No existen tecnologías alternativas para la fabricación de botellas de vidrio, sólo pequeñas diferencias en la elección del tipo de horno y el proceso de conformación.

Primera etapa

Recepción y preparación de las materias primas

Por lo general, las materias primas se compran a granel y se transportan en camiones. La descarga se lleva a cabo en tolvas de recepción mediante un sistema de cilindros hidráulicos que elevan e inclinan 60° cada uno de los camiones. La parte inferior de las tolvas se comunican con una cinta transportadora que lleva las materias primas hacia un elevador de cangilones, el cual se encarga de depositarlas en los silos de almacenamiento, donde permanecen hasta su uso. Los silos tienen capacidad para 5 días de producción.

A continuación, se pesan cada una de las materias primas de forma automática en básculas electrónicas para obtener las proporciones adecuadas con el fin de conseguir una buena mezcla. Después de ser pesadas, se envían a las tolvas en donde, se mezclan totalmente durante un tiempo determinado con el objetivo de garantizar una mezcla perfecta. Las porciones de cada una de las materias primas en el proceso de mezclado tienen que ser precisas para garantizar una calidad constante. Los colorantes y otros componentes secundarios que se emplean en pequeñas cantidades, se pesan por separado en balanzas electrónicas. Por último, la mezcla de materias primas se envía mediante cintas transportadoras y elevadores a los silos, donde permanecerán para ser introducidas al horno (figura 41).

Las fábricas tienen sistemas de control de calidad de las materias primas para verificar el cumplimiento de las especificaciones, garantizándose de esta forma un control técnico y operativo. El control de calidad de las materias primas para la fabricación de botellas de vidrio consiste en supervisar tres parámetros principales: análisis químico, composición mineralógica y granulometría.

El análisis químico se realiza mediante plasma inductivo o absorción atómica para determinar la cantidad de sustancias que interesan, que deben superar los valores mínimos, y detectar la presencia de impurezas (como el contenido de hierro en la arena de sílice), que no deben superar los valores máximos. Aunque la composición mineralógica es importante, su determinación no es muy común en las especificaciones de compra.

La granulometría, es decir, el tamaño que deben tener los gránulos, también es esencial para asegurar una fusión rápida y controlable ya que el calor necesario para fundir la mezcla disminuye cuando se reduce el tamaño y se aumenta la superficie específica de los gránulos de las materias primas. Se han establecido límites tanto superiores como inferiores para el tamaño de partículas, generalmente mediante especificaciones de mallas de tamices estandarizados. El análisis granulométrico implica determinar la distribución del tamaño de las partículas, expresada en porcentajes según la cantidad retenida en cada tamiz, siguiendo la normativa UNE 43-751-78. Además, se deben controlar otros factores como la forma, la textura y la superficie específica de las materias primas, aunque su relevancia es menor.

También se controla el grado de humedad, que alcanza su valor óptimo cuando el porcentaje de agua se encuentra entre el 4 y el 5%. Contenidos de agua superiores serían perjudiciales, ya que no solo afectarían negativamente a su capacidad para homogeneizar, sino que también implicarían un gasto innecesario de energía para su evaporación.



Figura 41. Entrada de la mezcla de materias primas al horno de fusión. [33]

Segunda fase

Fusión

Tras la recepción y preparación de las materias primas, se lleva a cabo el proceso de fusión, es decir, la mezcla de materias primas se introduce a través de bandas transportadoras por uno de los extremos del horno, para convertirse en vidrio fundido, que se extrae por el otro extremo del horno. Mientras que la mezcla se funde, la materia orgánica se va quemando.

No todas las materias primas se funden a la vez, sino que, al suministrarle calor a la mezcla, los compuestos que tienen menor punto de fusión pasan a estado líquido más rápido que los que tienen mayor punto de fusión (sílice: 1600°C; casco: 1100°C; carbonato de calcio: 825°C; caliza: 1340°C). Los gases generados en el proceso de combustión son expulsados por la chimenea a unos 1300°C.

La masa de vidrio fundido que contiene el horno se mantiene constante, y el tiempo medio que se encuentra en su interior ronda las 20 horas. El volumen del vidrio fundido es del 35-50% del volumen de las materias primas iniciales de la mezcla debido a la pérdida de gases y a la eliminación de espacios intersticiales. Finalmente, se disminuye la temperatura del vidrio gradualmente (con lo que aumenta su viscosidad) de tal forma que, el vidrio llegue a los alimentadores en un estado óptimo para poder moldearlo con facilidad en la etapa de conformación. Se denomina acondicionamiento del vidrio, al hecho de controlar la temperatura del vidrio fundido desde el canal de distribución hasta el orificio refractario (alimentador). Según el tamaño del horno y las capacidades de las máquinas conformadoras, pueden existir varios canales de distribución.

Durante el proceso de fusión, se generan burbujas de gas debido al dióxido de carbono que se libera por la descomposición del carbonato de sodio y de la caliza, y en menor medida, del aire que se encuentra en las materias primas. El dióxido de carbono tiene una solubilidad limitada en el vidrio fundido, por lo que estas burbujas que se generan deben ser eliminadas del vidrio fundido antes de que comience el proceso de conformación, ya que pueden causar imperfecciones en las botellas, lo que afecta al aspecto y a la resistencia mecánica de estas. De esta forma, se utilizan agentes químicos afines para eliminarlas, siendo el más utilizado el sulfato sódico (Na_2SO_4), el cual se descompone dando lugar al óxido sodio (Na_2O) (que se incorpora al vidrio), a óxidos de azufre y a oxígeno a una temperatura de 1450°C.

Debido al gran consumo energético que tiene la fabricación de vidrio, el método de recuperación de calor, la eficiencia energética del proceso de fusión y tipo de combustible utilizado, son parámetros importantes que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar el horno de fusión. Se pueden utilizar 3 fuentes de energía: gas natural, fuel oil y electricidad.

Muchos hornos están diseñados para funcionar tanto con gas natural como con fuel oil, siendo necesario un cambio de inyectores. Los contratos de suministro de gas se suelen firmar de forma que, en las épocas de máxima demanda, el suministro de combustible sea ininterrumpido, lo que requiere poder cambiar de combustible. La inestabilidad de los precios de los combustibles es el principal motivo para poder alternar entre el gas natural y el fuel oil. En algunas ocasiones se utiliza un pequeño porcentaje de energía eléctrica como refuerzo, aunque también se pueden dar casos de fusión totalmente eléctrica (poco frecuente)

El gas natural se caracteriza por su alto grado de pureza y por el incremento de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x). En comparación con el fuel oil, el gas natural no necesita instalaciones de almacenamiento y reduce las emisiones de óxidos de azufre (SO_x).

Por otra parte, la electricidad se puede utilizar como única fuente de energía o en combinación con combustibles fósiles. La electricidad puede proporcionar energía de tres formas: calentamiento resistivo, proceso en el que se pasa una corriente a través del vidrio fundido; calentamiento inductivo, en el que se induce calor mediante un campo magnético circundante; y el uso componentes de calentamiento. La electricidad también se emplea para

generar aire comprimido, propulsar los compresores de aire y ventiladores, transportar materiales y en ciertos procesos de calentamiento, como el boosting.

Los hornos eléctricos, son equipos con revestimiento refractario, soportados por un cuerpo de acero, que proporcionan calor haciendo pasar una corriente eléctrica a través de electrodos situados en el fondo. La energía utilizada para la fusión es proporcionada por el calentamiento resistivo. Respecto a la viabilidad económica de los hornos eléctricos, estos dependen enormemente del coste de la electricidad. La supresión de los combustibles fósiles del horno elimina la formación de productos de combustión. La fusión con combustibles fósiles y electricidad puede ser de dos tipos: combustión predominantemente con combustible fósil con un refuerzo eléctrico, o calentamiento eléctrico predominantemente con combustibles fósiles, siendo este el método menos utilizado.

Los hornos están diseñados para fundir grandes cantidades de vidrio a una temperatura de unos 1600°C durante 10-12 años de forma continua. Tienen una capacidad de producción de entre 20 y 600 toneladas de vidrio al día y están contruidos con materiales refractarios, que son resistentes al deterioro producido por las llamas y el vidrio fundido.

El tipo de horno que se utiliza en la fabricación de botellas de vidrio depende de la capacidad de la planta:

- Instalaciones de gran capacidad (más de 500 t/día). Se utilizan hornos regenerativos de llama transversal.
- Instalaciones de media capacidad (entre 100-500 t/día). Se suelen emplear hornos regenerativos de llama de bucle, aunque también pueden utilizarse en ocasiones los hornos recuperativos y de oxicomustión.
- Instalaciones de pequeña capacidad (entre 25-100 t/día). Se emplean hornos recuperativos, hornos de oxicomustión y los hornos regenerativos de llama de bucle.

Los hornos regenerativos de llama transversal utilizan sistemas de recuperación de calor (figura 42). Como se observa en la figura 43, presentan dos cámaras regenerativas, en la que una de ellas se calienta a partir de los gases producidos por la combustión, y la otra se encarga de precalentar el aire que se introduce en el horno para el proceso de combustión. Esto se consigue haciendo pasar los gases de combustión por una de las cámaras revestidas de material refractario, por lo que es capaz de absorber el calor. El horno sólo calienta por un lado cada vez, por lo que cada 20 minutos, el ciclo de combustión del horno se invierte y el aire de combustión pasa a través de la cámara previamente calentada por los gases de combustión. Se pueden llegar a alcanzar temperaturas de precalentamiento de hasta 1.300°C, lo que supone eficacias térmicas muy elevadas.

El elevado coste de los hornos regenerativos hace que solo sean viables económicamente cuando la producción es superior a 100 t/día. Para producciones superiores a 500 t/día, se emplean hornos regenerativos de tipo transversal para conseguir un mejor control del calor a lo largo de todo el horno.

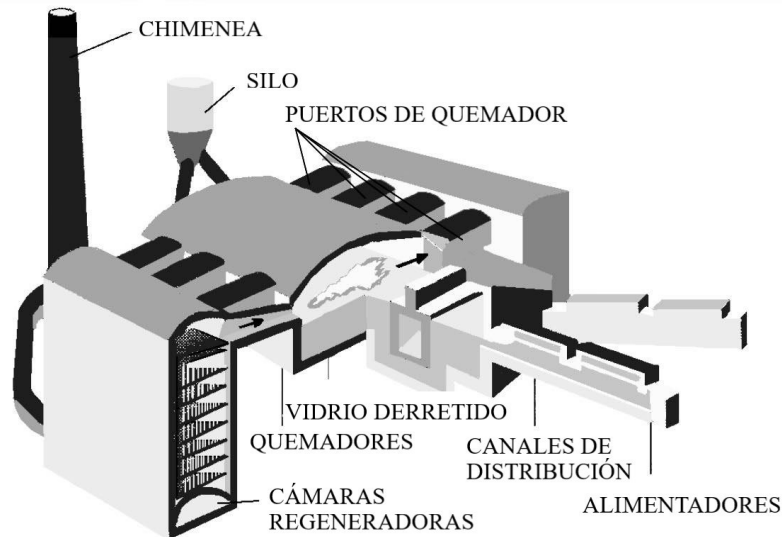


Figura 42. Horno regenerativo de llama transversal. [34]

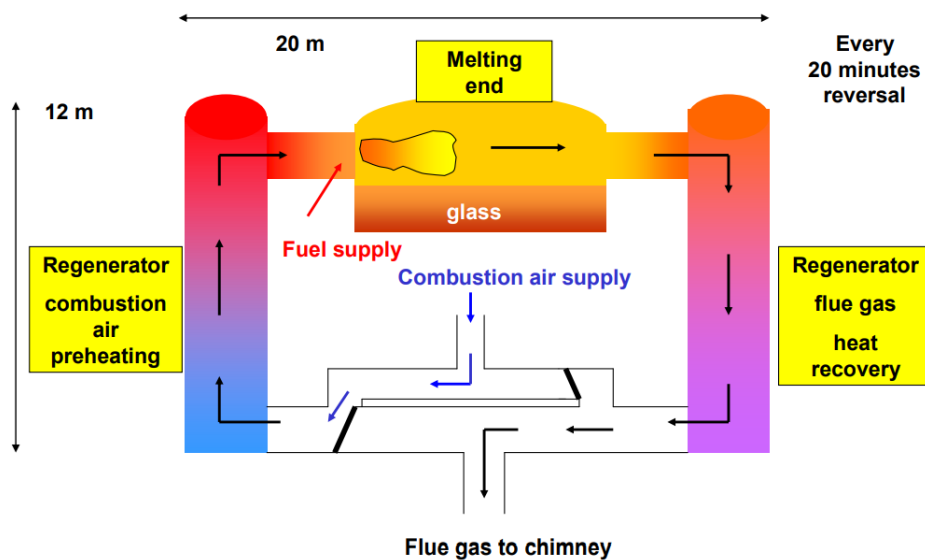


Figura 43. Funcionamiento de un horno regenerativo. [34]

En los hornos regenerativos de llama de bucle (figura 44 y 45), las dos cámaras regenerativas se sitúan en cada uno de los extremos del horno con un solo pórtico. El recorrido de las llamas tiene forma de U y vuelve al regenerador adyacente a través del segundo pórtico. Esta distribución hace que la regeneración sea más eficaz que en el horno de llama transversal, aunque tiene menos flexibilidad para ajustar el perfil de temperatura del horno y por lo tanto se utiliza menos en instalaciones de gran capacidad. Este tipo de hornos tienen una mayor eficiencia energética y produce menores emisiones que los de llama transversal.

La gran mayoría, más del 95%, de la producción de botellas de vidrio tiene lugar en hornos regenerativos que emplean gas natural, a veces complementado con energía eléctrica

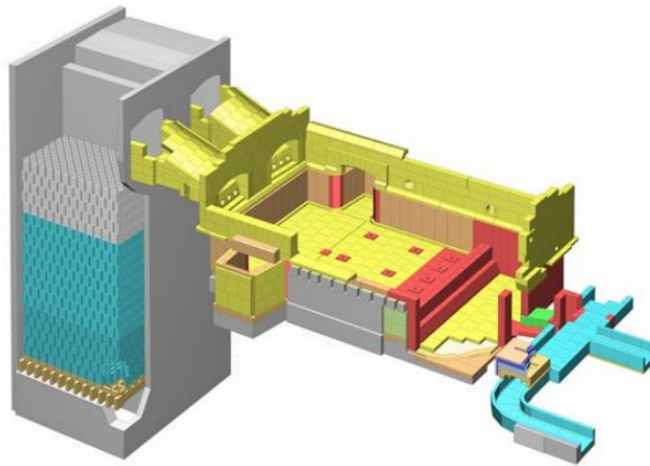


Figura 44. Horno regenerativo de llama de bucle. [34]

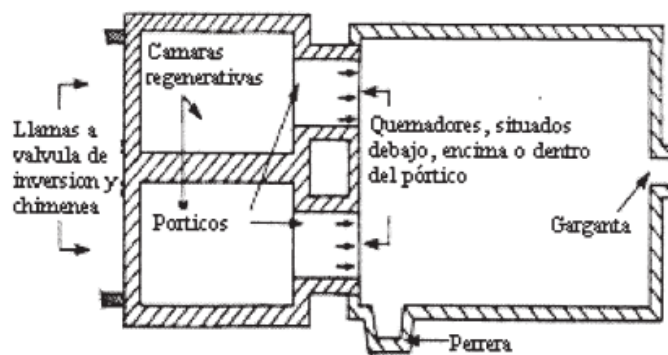


Figura 45. Vista en planta de un horno regenerativo de llama de bucle. [36]

En los hornos recuperativos, se utilizan intercambiadores de calor como sistemas de recuperación de calor. El aire de combustión que entra al horno se precalienta en un intercambiador con los gases originados por la combustión, como se observa en la figura 46. La temperatura de precalentamiento del aire está limitada a unos 800°C, por lo que el calor recuperado por este tipo de hornos es menor que en los hornos regenerativos. Esta eficiencia energética menor puede compensarse implantando nuevos sistemas de recuperación de calor de los gases de combustión, para precalentar las materias primas o producir vapor. La fusión específica de los hornos recuperativos también está limitada respecto a los hornos regenerativos (un 30% menor), por lo que la falta de capacidad de fusión se puede compensar con el refuerzo eléctrico.

Estos hornos se utilizan cuando se necesita una elevada flexibilidad de operación con una inversión mínima y para instalaciones de pequeña capacidad, aunque en algunas ocasiones se utilizan en instalaciones de mayor capacidad (hasta 400 t/día).

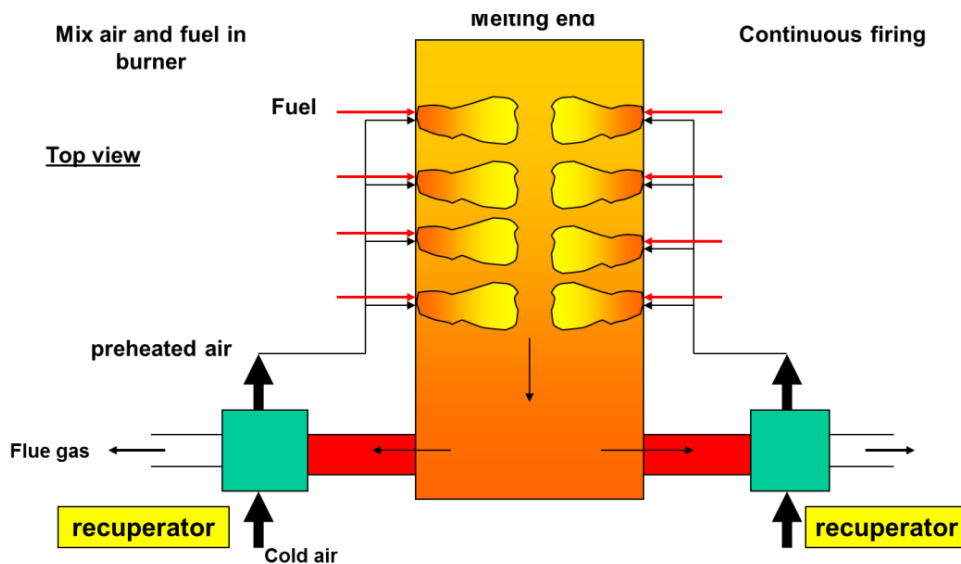


Figura 46. Funcionamiento de un horno recuperativo. [34]

Los hornos de oxicomcombustión consisten en la utilización de oxígeno, con una pureza mayor del 90, en vez de aire para quemar el combustible. Al utilizar oxígeno y no introducir el nitrógeno del aire, se reduce la producción de NOx (eficacia de eliminación del 20-45%), el volumen de nitrógeno presente en el aire, lo que provoca una mejora en la transferencia de calor y, por lo tanto, se reduce el tiempo de fusión. De esta manera se puede ahorrar energía en el horno, ya que no es necesario calentar el nitrógeno. También, el oxígeno permite conseguir una mejor cristalización del vidrio y aumentar la productividad en un 15-20% con respecto a la combustión tradicional. Esto permite aumentar la producción sin tener que invertir más recursos.

Desde el punto de vista medioambiental, el oxígeno resulta mucho más beneficioso puesto que se reduce drásticamente las emisiones de NOx. Los hornos de oxicomcombustión tienen el mismo diseño básico que el resto de hornos de fusión, con varios quemadores en los laterales y una chimenea para expulsar los gases de combustión. No obstante, los hornos que utilizan oxígeno no presentan sistemas de recuperación de calor para precalentar el oxígeno a los quemadores.

En la fabricación de botellas de vidrio, el tipo de horno de fusión más utilizado es el horno regenerativo de llama de bucle, debido a la versatilidad y el amplio rango de producción que presenta. Este tipo de hornos puede llegar a ser el más eficiente si se dispone de “boosting” y se utiliza como combustible el gas natural.

El “boosting” es una técnica que consiste en generar una mayor cantidad de calor en el horno haciendo pasar una corriente eléctrica por los electrodos que se sitúan en el fondo de la cuba. Este método se utiliza bastante en la industria del vidrio cuando la demanda aumenta, de esta forma se incrementa la producción del horno sin tener que asumir los costes fijos de operación de un horno de mayor tamaño. La técnica puede instalarse mientras el horno está en funcionamiento. El “boosting” también se utiliza como una alternativa para reducir los niveles de los gases emitidos por el horno, reemplazando la combustión por un calentamiento eléctrico. Por lo general, el “boosting” suele proporcionar entre un 5% y un 20% de la energía

total, aunque se pueden llegar a conseguir valores más elevados. Sin embargo, estos porcentajes elevados no son recomendables a largo plazo por los altos costes que suponen.

Conformación

Para la fabricación de envases de vidrio se utilizan dos métodos: el soplado-soplado, utilizado para la fabricación de envases de boca estrecha (botellas), y el prensado-soplado, utilizado principalmente para la obtención de envases de boca ancha (tarros), aunque también se puede utilizar para envases boca estrecha.

En ambos métodos, el alimentador de gotas se encarga de cortar el vidrio fundido a su temperatura plástica (1.000-1.200°C) mediante una hoja de cizallamiento, generando gotas de vidrio del mismo peso y forma (figura 47). El control de la forma, el peso y la velocidad de la gota dependen de la viscosidad, y ésta a su vez depende de la temperatura, por lo que es necesario un control estricto de esta. Las gotas de vidrio fundido descenden por gravedad desde la cubeta del alimentador hasta los pre-moldes de soplado o prensado de las máquinas conformadoras, a través del equipo distribuidor de gotas. Este dispositivo mecánico consta de tres componentes principales: una cuchara, un conducto y un deflector, como se aprecia en la figura 48. Estos elementos han sido sometidos a un tratamiento físico en sus superficies para mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas. Además, necesitan refrigeración para garantizar un desempeño óptimo y una vida útil prolongada. Esta configuración permite que la transferencia de la gota desde la cubeta de los alimentadores hasta las máquinas moldeadoras se realice en no más de medio segundo.

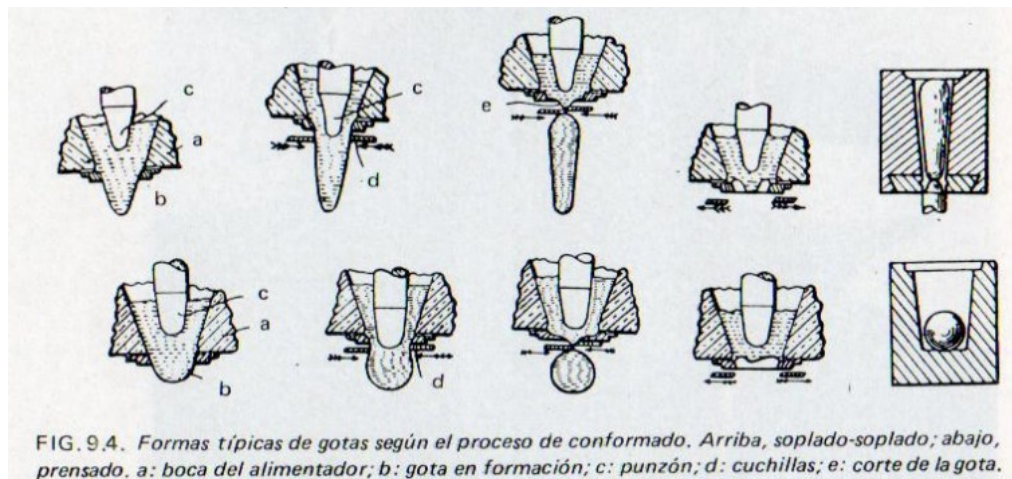


Figura 47. Formas típicas de gotas según el proceso de conformación. [35]

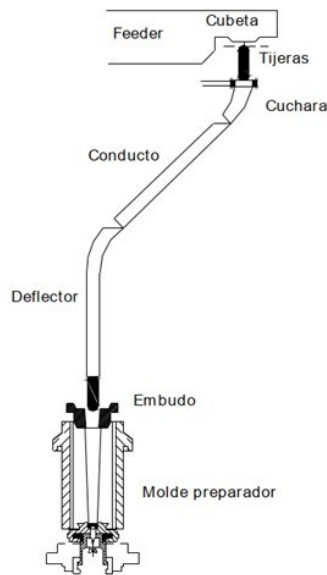


Figura 48. Equipo de distribución de gota. [47]

El proceso de soplado-soplado consta de 2 etapas. En la primera de ellas, los pre-moldes, dispuestos de forma invertida, reciben las gotas de vidrio fundido y son obturados por la parte superior por un deflector, a través del cual, se inyecta aire comprimido para empujar a la gota hasta el fondo para que adopte la forma del pre-molde, donde el anillo del cuello está sellado mediante un punzón (figura 49), dando forma a la boca de la botella. Seguidamente, en la parte inferior del pre-molde, el punzón se retira ligeramente y se inyecta una corriente de aire a través de él, dando lugar a la preforma de la botella, denominada "parisón".

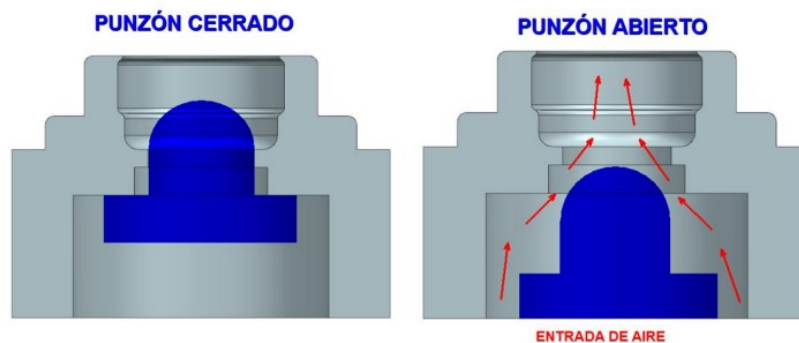


Figura 49. Posiciones del punzón en el proceso de soplado. [43]

En la segunda etapa, se abre el pre-molde y un brazo mecánico se encarga de coger la preforma por la boca, invirtiendo su posición (giro de 180°) y depositándola en el molde final. Se recalienta la preforma contenida en el molde, se le inyecta aire para definir completamente su forma y se enfría lo suficiente para evitar cualquier deterioro de la botella. Los pre-moldes (moldes utilizados en la primera etapa) forman todos los detalles de la boca de la botella, mientras que el cuerpo todavía no ha adquirido la forma final. Por último, se

abre el molde y se llevan las botellas terminadas en la cintra transportadora, a una temperatura controlada, al archa de recocido tras aplicarle un recubrimiento que mejora sus propiedades.

En la figura 50, se muestra visualmente el proceso de soplado-soplado paso a paso.

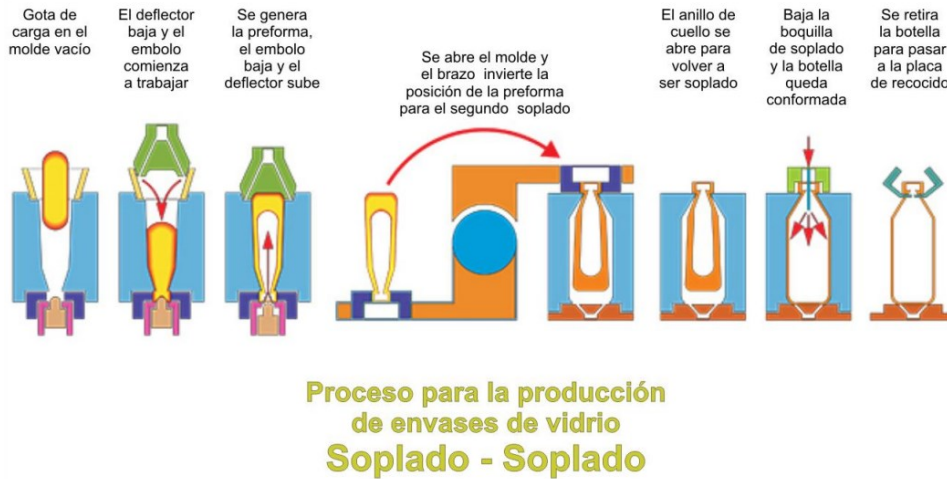


Figura 50. Proceso soplado-soplado. [35]

El proceso de prensado-soplado también consta de 2 etapas. En la primera etapa, a diferencia del proceso anterior, el "parison" se forma por la elevación de un émbolo de metal largo que impulsa vidrio fundido hacia las paredes del pre-molde y el anillo (prensado), en lugar de mediante soplado. De esta forma, se lleva a cabo un reparto más uniforme del vidrio y por lo tanto, los espesores de las paredes de las botellas serán más precisos. La segunda etapa del proceso es exactamente igual que en el proceso soplado-soplado.

En la figura 51, se muestra visualmente el proceso de prensado-soplado paso a paso.

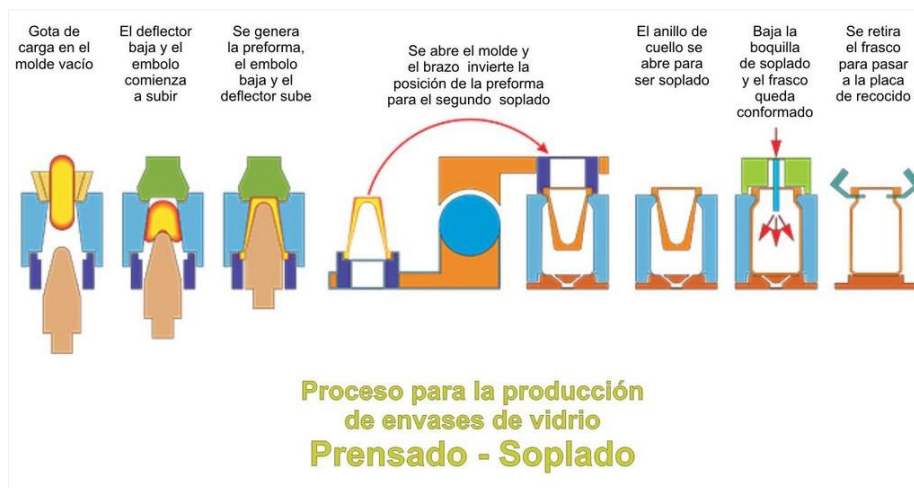


Figura 51. Proceso prensado-soplado. [35]

Tras terminar el proceso de conformación, las botellas se envían a una banda metálica a unas temperaturas de entre 500 y 600°C. A la superficie de la banda metálica se le aplica fuego para precalentarla, con el objetivo de que cuando el fondo de las botellas entre en contacto con la superficie de la banda, no se rompan por el choque térmico. También, a lo largo de la banda metálica se inyecta aire para seguir enfriando las botellas y evitar fracturas.

Las máquinas conformadoras son aquellas que se encargan de controlar y mover todas las piezas para dar forma a las botellas, destacando las máquinas de sección independiente o individual (IS), que son las más utilizadas en la fabricación de botellas de vidrio. Son impulsadas por aire comprimido (de alta presión y de baja presión), proporcionado por los compresores de los que disponen las fábricas. Están constituidas por varias secciones que funcionan de forma independiente y que pueden pararse mientras las demás siguen trabajando.

Normalmente, constan de 6, 8, 10, 12, 16 o 20 secciones, que pueden trabajar en simple gota (un envase por sección), doble gota (dos envases por sección), triple gota (tres envases por sección) y cuádruple gota (cuatro envases por sección). La configuración de la máquina conformadora dependerá de la capacidad de la planta, por ejemplo, una máquina con 20 secciones que trabaja en simple gota, tiene una capacidad de producción de más 800.000 botellas al día.

Las máquinas conformadoras y los moldes requieren un engrase constante, ya sea de forma manual o automática, para que el vidrio fundido no se quede pegado. Generalmente, los operarios engrasan todos los moldes cada 15 o 20 minutos. Los moldes suelen presentar una refrigeración continua por agua de refrigeración o por aire.

Por lo general, los moldes se compran a terceros (figura 52), aunque muchas fábricas tienen talleres para llevar a cabo el mantenimiento y reparación de los mismos. Debido a su alto coste, los moldes reciben un mantenimiento especial para aumentar su vida útil lo máximo posible. Los moldes utilizados para la fabricación de botellas presentan un grado de detalle bastante elevado, tanto en dimensiones como en acabados. Todos ellos son fabricados a partir de diferentes aleaciones metálicas y se caracterizan por sus propiedades mecánicas (resistencia a los choques térmicos), térmicas (baja capacidad calorífica y elevada conductibilidad) y químicas (elevada duración, facilidad de pulido, reducida tendencia a la formación de óxidos a las temperaturas de operación...).



Figura 52. Ejemplos de moldes. [35]

Tratamientos en caliente y en frío

Las botellas de vidrio reciben una serie de tratamientos superficiales para mejorar su resistencia mecánica y química. Cuando estos tratamientos se llevan a cabo sobre la cinta transportadora que lleva las botellas desde las máquinas de conformado hasta el túnel de recocido, se denominan tratamientos en caliente. Sin embargo, cuando se aplican a la salida del arca de recocido, antes de pasar por el control de calidad, se denominan tratamientos en frío.

Los tratamientos en caliente consisten en añadir una capa muy delgada de óxidos o cloruros de estaño, con el fin de evitar la aparición de microfisuras en la superficie, darle mayor resistencia al vidrio y conseguir un aumento de un 20% en la presión interna. Esta capa se forma sobre la superficie de la botella tras 2 o 3 segundos de aplicarse una deposición química del vapor elegido, en la que es necesario que las botellas se encuentren a temperaturas superiores a los 500°C. La cantidad de gas que se utiliza generalmente es de 40 C.T.U. (Coating Thickness Units, unidades de espesor de recubrimiento). Según A.G.R. un C.T.U. es aproximadamente un A° (Amstrong, 10-7 mm). Esta capa es la base para lograr una buena adhesión del tratamiento superficial en frío, el cual se aplica sobre esa primera capa. Los óxidos o cloruros de titanio son más baratos que el estaño, pero el efecto que produce aparece con un recubrimiento de espesores menores que los obtenidos con el estaño, siendo un tratamiento más difícil de mantener bajo control.

Las botellas que contienen bebidas alcohólicas también reciben un tratamiento en caliente para mejorar la resistencia química de su interior, denominado desalcalinización. Esta técnica consiste en aplicar un sulfuro o un gas que contenga flúor, los cuales se suelen inyectar junto con el aire comprimido en el proceso de soplado. Este tratamiento consigue que las botellas sean más resistentes a las disoluciones de álcalis, que pueden aumentar el pH del producto y degradarlas.

Los tratamientos en frío consisten en aplicar una pequeña capa de ácidos oleicos o parafinas en suspensión acuosa, mediante pulverización con el objetivo de aumentar la resistencia mecánica de las botellas de vidrio. También se aplica un segundo tratamiento en frío, que consiste en añadir una capa de polietileno, aplicada a través de una emulsión de agua. Esto permite mejorar la resistencia a la abrasión, mejorar su manejo en las líneas de producción y proporcionar una superficie prácticamente irrayable.

Si no se lleva cabo un adecuado recubrimiento en frío, el recubrimiento en caliente se cae fácilmente. Los tratamientos superficiales en frío proporcionan una mayor lubricidad y duración cuando se aplican sobre un recubrimiento en caliente de alta calidad.

Tercera fase

Recocido

Tras los tratamientos en caliente, las botellas se introducen en un túnel de recocido (arca), a una temperatura de unos 500°C, para evitar la formación de tensiones residuales internas debido a un enfriamiento rápido y desigual. De acuerdo a la figura 54, las botellas circulan por este túnel de 20-25 metros de longitud (conocido como Lehr, figura 53), en el que se recalientan primero a unos 600°C durante 10 minutos, y después se enfrían de manera lenta

y controlada durante más o menos 30 minutos, dependiendo del grosor del vidrio. Este enfriamiento se lleva a cabo primero, suministrando aire frío a través de unos conductos y después, inyectando aire desde arriba y abajo. Las botellas de vidrio salen del arca de recocido a una temperatura aproximada de 60°C. De esta manera, el vidrio pasa de un estado plástico a uno rígido para que su estructura consiga el mismo volumen específico en todos sus puntos, obteniéndose una mayor resistencia y minimizando el estrés. A lo largo del horno de recocido se utilizan cámaras de infrarrojos para controlar, sin contacto alguno, la temperatura del proceso de enfriamiento.



Figura 53. Túnel de recocido. [38]

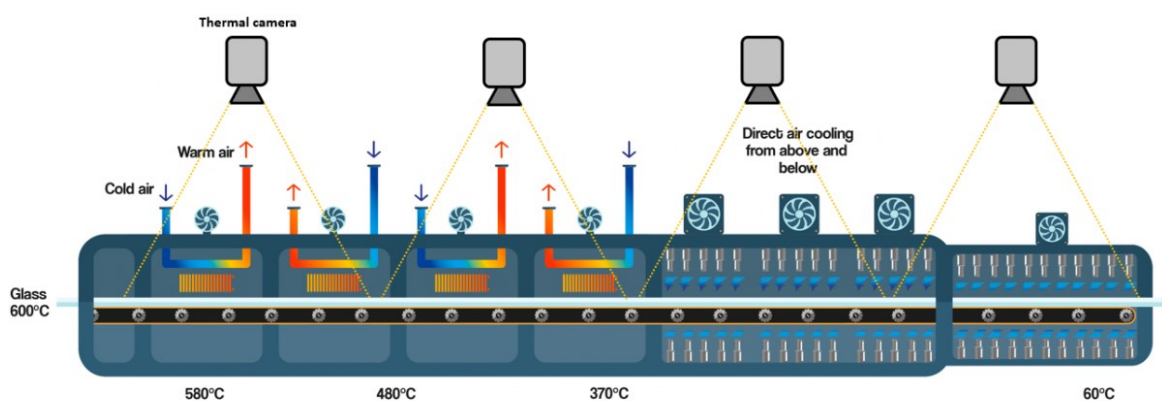


Figura 54. Funcionamiento de un túnel de recocido. [39]

Inspección y control

A la salida del túnel de recocido, las botellas de vidrio son inspeccionadas y controladas mediante máquinas optoelectrónicas y automáticas, que se encargan de realizar controles dimensionales y funcionales para detectar imperfecciones como, por ejemplo, pequeñas

grietas, gránulos de arena que no se han fundido correctamente, paredes excesivamente delgadas, como ocurre en el proceso de prensado-soplado cuando el émbolo y el molde no están correctamente alineados. En este caso, el vidrio se adhiere a las paredes del molde causando defectos en las botellas. Además, también se realizan inspecciones visuales para detectar cualquier defecto o imperfección en las botellas.

Estas máquinas, son las que determinan las botellas que no cumplen con las exigencias de calidad previstas, por lo que son retiradas a través de un soplo de aire automático para volverlas a fundir, ya que estos defectos provocan que las botellas se rompan con mayor facilidad. Por ejemplo, las botellas pueden llegar a explotar cuando se vuelven a calentar, puesto que se generan grandes cantidades de tensión térmica.

Todas estas máquinas optoelectrónicas están vinculadas a un sistema de ordenadores que recaban y almacenan toda la información necesaria. Gracias a este sistema, el equipo de inspección y control elabora una serie de estudios estadísticos que se facilitan a los operarios, para retirar los moldes que están provocando fallos en el proceso de fabricación. Esto es posible, debido a que cada molde marca las botellas que fabrica con un código de puntos.

Mediante este sistema electrónico se verifica el control de la boca, las dimensiones, el grosor y la existencia de grietas, piedras y/o burbujas, entre otras cosas. Además, existe un control muestral que permite conocer en cada momento propiedades como la resistencia a la presión interna, resistencia al rayado y el ángulo de desligamiento.

La industria del vidrio está destinando un gran porcentaje de sus inversiones en conseguir una mayor calidad en sus envases, por lo que está comprando equipos de control automáticos de última generación. Hoy en día, las líneas de producción disponen de:

- Una máquina de control de anillos (diámetro interno del cuello)
- Un simulador de tensión para retirar las botellas frágiles.
- Una máquina de control que evalúa los defectos de ovalización, de espesor o de microfisuras en la superficie.
- Una máquina de control del aspecto para eliminar suciedad, partículas de vidrio, granos, burbujas, etc.

Reciclado

Las fábricas tienen un circuito de reciclaje interno para poder reciclar todas las botellas de vidrio que se han rechazado en las líneas de producción por el personal y las máquinas optoelectrónicas. Se utiliza como materia prima el vidrio reciclado interno junto con el casco de vidrio proveniente del exterior, de esta forma se ahorra en materias primas. El vidrio reciclado se funde a una temperatura más baja, así que por cada 10% de vidrio reciclado en la mezcla, la fábrica gasta un 2,5% de energía menos para producir las botellas. También, acelera el proceso de fusión y abarata los costes de producción.

Una vez llega el vidrio reciclado a la fábrica, una pala gigante lo coge y lo vierte en una tolva, que canaliza todo el vidrio hacia una cinta transportadora. A lo largo de la cinta, los operarios se encargan de eliminar residuos como papeles hasta que el vidrio llega a una trituradora, de esta forma el vidrio queda limpio y triturado en pequeños trozos para

convertirlo en casco de vidrio. A esta triturado, también llevan mediante una banda transportadora todas las botellas que han sido rechazadas en el proceso de inspección y control.

El vidrio molido pasa por medio de un alimentador vibratorio y por la banda transportadora a un separador magnético provisto de potentes imanes, que se encargan de separar los metales del vidrio. A continuación, el vidrio pasa a una máquina lavadora, donde se lava con agua caliente y a la salida de la máquina, el vidrio molido se separa del agua por decantación. Por último, el vidrio se introduce en la tolva en la proporción adecuada para que se mezcle con el resto de materias primas.

Paletizado y embalaje

En primer lugar, las botellas se envían una detrás de otra a una máquina (stacker), que se encarga de agrupar las botellas en filas, para luego ser transportadas y depositadas en máquinas automáticas denominadas paletizadoras, las cuales se encargan de preparar las botellas para su expedición, como se observa en la figura 55.

Existe un brazo mecánico encargado de impulsar los envases hacia la paletizadora, la cual agarra las filas de botellas cuando alcanzan un determinado nivel. Este procedimiento se repite hasta que se tienen todas las filas de botellas. Posteriormente, los envases son elevados y colocados en palets de 1,2 metros cuadrados, que contienen aproximadamente 1600 botellas cada uno.

Las empresas de paletizado realizan estudios detallados para determinar la manera más eficaz de embalar cada tipo de producto, teniendo en cuenta la velocidad de paletizado requerida, la cual está directamente relacionada con la velocidad de producción de la planta.

Una vez paletizadas, los pallets son cargados por un elevador automático, que los transporta hasta la máquina plastificadora, donde son envueltos por una funda de plástico retráctil. Se aplica una corriente de aire caliente que ejerce la presión necesaria para que los envases queden perfectamente fijados y protegidos del polvo u otro elemento. Para terminar, los palés son etiquetados y almacenados para su distribución.



Figura 55. Proceso de paletizado de las botellas de vidrio. [40]

En la figura 56, se muestra un esquema del proceso de producción de botellas de vidrio.

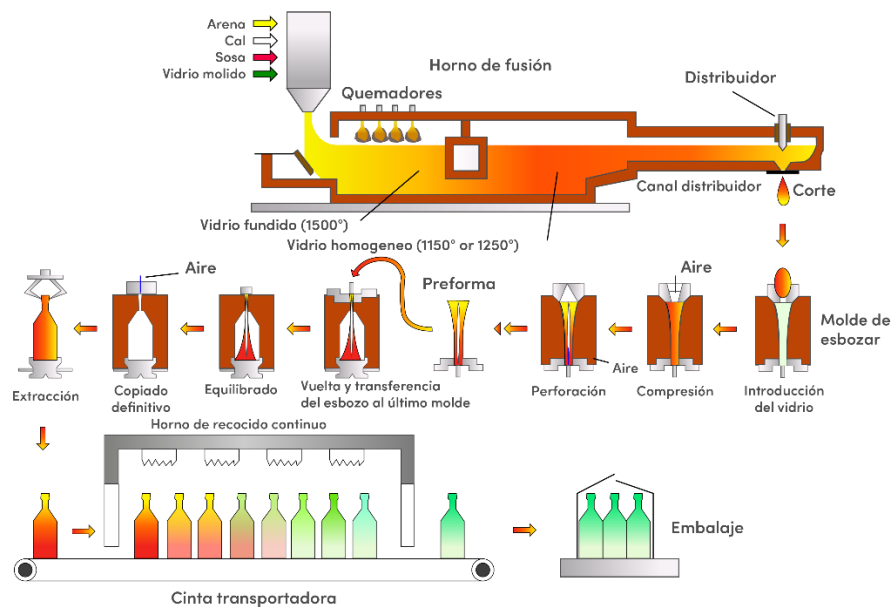


Figura 56. Esquema básico del proceso de producción. [41]

2.3. Aspectos medioambientales.

Para fabricar envases de vidrio se utilizan materias primas naturales (más del 80%) o sintéticas no tóxicas, como la arena, el carbonato de sodio y la caliza entre otras, que generan pocos residuos. Sin embargo, para la producción de envases de vidrio, el principal problema medioambiental es el alto consumo de energía debido a las elevadas temperaturas en el horno de fusión, lo que conlleva un control exhaustivo de los residuos en esta etapa.

La fabricación de vidrio es un proceso que consume una gran cantidad de energía. Por lo general, más del 75% de los requisitos energéticos totales de la fabricación de envases de vidrio corresponde al proceso de fusión, por lo que el control de este proceso y las mejoras en su eficiencia son de suma importancia. Otros procesos que requieren también una cantidad importante de energía son el proceso de conformación, el recocido y los servicios generales de la planta.

El consumo energético de una planta suele variar en un rango de 4,5 a 7 GJ/t V^o F^o (equivalente a 1,25-1,95 MWh/t V^o F^o) y de 6,5 a 9 GJ/t de producto acabado. Para productos de muy alta calidad, este consumo puede ser significativamente mayor.

Como se ha señalado anteriormente, el mayor desafío ambiental en la industria del vidrio hueco está relacionado con su alto consumo de energía. Se han implementado diversas medidas primarias a lo largo del tiempo para reducir este consumo y prevenir la formación de contaminantes como, por ejemplo, utilizar más vidrio reciclado como materia prima, lo que ha supuesto que por cada 10% de vidrio reciclado que se utilice de más se reduce un 2,5% el consumo de energía en el horno. Por lo tanto, las medidas primarias, al abordar el problema desde su origen, son las más efectivas en términos de soluciones ambientales.

Aunque algunas medidas secundarias pueden reducir ciertas emisiones, también pueden generar otros impactos ambientales. En general, estas medidas secundarias tienden a aumentar el consumo energético, lo cual debe considerarse en el balance global de la situación.

Desde la perspectiva medioambiental, las plantas de producción de envases de vidrio tienen en cuenta cuatro aspectos fundamentales: el aire, el agua, los residuos, el ruido.

Aire

Este proceso genera emisiones de dióxido de azufre, dióxido de carbono, vapor de agua derivado de la combustión, oxígeno derivado del exceso de aire, nitrógeno molecular y óxidos de nitrógeno, polvo y trazas de sodio, cloruros, fluoruros y metales pesados, como se observa en la tabla 4 y 5. El dióxido de carbono proviene de la combustión y de la descomposición de los carbonatos (sosa y caliza), y el dióxido de azufre proviene de la combustión y de la descomposición de los sulfatos, utilizados para fomentar el afinado del vidrio. En el caso de combustión incompleta, también se emite monóxido de carbono. Respecto a los óxidos de nitrógeno, estos provienen de la oxidación del nitrógeno atmosférico a elevada temperatura. Se trata de gases que no se pueden despreciar cuantitativamente ya que pueden llegar a alcanzar los 200 kilogramos por tonelada de vidrio fundido.

Por otra parte, el sodio desempeña un papel importante en la formación de polvos, sin embargo, se puede despreciar respecto a la cantidad introducida. Los fluoruros y cloruros están presentes como impurezas en los combustibles y en las materias primas. Por último, el polvo proviene de la volatilización y condensación de las materias primas. Para vidrios especiales, también se pueden encontrar elementos como el boro, el plomo, el arsénico y el antimonio en los humos de los hornos de fusión.

Emisión	Fuente / Comentarios
Partículas	Condensación de componentes volátiles de la mezcla. Arrastre de material fino en la mezcla. Producto de la combustión de algunos combustibles fósiles.
Óxidos de nitrógeno	NO _x térmico debido a las elevadas temperaturas del horno de fusión. Descomposición de los compuestos de nitrógeno de la mezcla. Oxidación del nitrógeno contenido en los combustibles.
Óxidos de azufre	Azufre en el combustible. Descomposición de los compuestos de azufre de la mezcla Oxidación del sulfuro de hidrógeno en las operaciones con cubilotes.
Cloruros / HCl	Presentes como impurezas en algunas materias primas, particularmente carbonato sódico y vidrio de desecho externo. NaCl usado como materia prima en algunos vidrios especiales.
Fluoruros / HF	Presentes como impurezas menores en algunas materias primas, incluido el vidrio de desecho. Agregados como materia prima en la producción de frita de esmalte para conferir determinadas propiedades al producto acabado. Agregados como materia prima en la industria de la fibra de vidrio de filamentos continuos, o para producir ciertas propiedades en el vidrio, como la opalescencia. Cuando se agregan fluoruros a la mezcla, normalmente como espato flúor, las emisiones incontroladas pueden ser muy elevadas.
Metales pesados (Ej. V, Ni, Cr, Se, Pb, Co, Sb, As, Cd)	Presentes como impurezas menores en algunas materias primas, vidrio de desecho de consumo y combustibles. Utilizados en fundentes y agentes colorantes en la industria de fritas (predominantemente plomo y cadmio). Utilizados en algunas formulaciones de vidrio especial (Ej. vidrio al plomo y algunos vidrios coloreados). El selenio se utiliza como colorante (vidrios rosa, gris y bronce), o como agente decolorante en algunos vidrios transparentes.
Dióxido de carbono	Producto de combustión. Emitido tras la descomposición de carbonatos en las materias de la mezcla (Ej. carbonato sódico, piedra caliza).
Monóxido de carbono	Producto de combustión incompleta, particularmente en cubilote.
Sulfuro de hidrógeno	Formado a partir del azufre en las materias primas o el combustible en los cubilotes, debido a las condiciones reductoras encontradas en partes del cubilote.

Tabla 4. Compuestos emitidos y fuentes asociadas en el proceso de fusión. [36]

CONTAMINANTE	VALOR ^(a)
Partículas totales ^(b)	150-300 mg/Nm ³ seco
NO _x	1.500-3.000 mg/Nm ³ seco
SO _x (fuel)	1.500-1.800 mg/Nm ³ seco
SO _x (gas)	800-1.000 mg/Nm ³ seco
HCl	6-9 mg/Nm ³ seco
HF	< 5 mg/Nm ³ seco
Cr (VI)	150-5.000 µg/Nm ³ seco
Pb	500-5.000 µg/Nm ³ seco

Tabla 5. Intervalo de emisiones de los contaminantes más importantes (Condiciones: 273K; 101,3 kPa; 8% O₂) [37]

Estos intervalos están relacionados con el tipo de combustible utilizado, las condiciones de operación, así como el tipo de horno y el tiempo de funcionamiento. También hay que destacar las emisiones de CO₂, las cuales varían entre 400 y 800 g/ kg V^o F^o.

En cuanto a los metales pesados (tabla 6), las concentraciones de estas emisiones pueden ser muy importantes en algunos procesos, y suelen estar presentes principalmente en el polvo.

Metal	Vidrio para envases
Vanadio (al quemar fuel-oil)	hasta 4 mg/Nm ³
Níquel (al quemar fuel-oil)	hasta 0,5 mg/Nm ³
Cromo (vidrio verde)	hasta 3 mg/Nm ³
Selenio	hasta 1 mg/Nm ³
Selenio, gaseoso (cristal hueco de sílex)	hasta 14 mg/Nm ³
Plomo	hasta 4 mg/Nm ³
Cadmio	hasta 0,3 mg/Nm ³

Tabla 6. Concentraciones metales pesados y elementos traza. [36]

Existen dos métodos para reducir las emisiones a la atmósfera:

- Las medidas primarias. Consisten en evitar la formación de contaminantes.
- Las medidas secundarias. Consisten en eliminar los contaminantes mediante una serie de tratamientos.

En términos generales, es preferible reducir los residuos contaminantes mediante medidas primarias, ya que existen soluciones bastante simples y económicas. Por el contrario, las medidas secundarias requieren inversiones significativas y conllevan altos costes operativos. Por último, el consumo de reactivos en las medidas secundarias será menor a medida que se reduzca la concentración de contaminantes mediante las medidas primarias.

• Polvo

El polvo está formado principalmente por sulfato de sodio no tóxico, generado mediante el siguiente proceso a altas temperaturas: al salir del horno, los gases contienen vapores alcalinos, como resultado de la evaporación del óxido de sodio presente en el vidrio. Cuando estos gases se enfrían al entrar en contacto con los materiales refractarios de los regeneradores, se produce la siguiente reacción dando lugar a finísimas partículas de polvo:



Si la combustión se lleva a cabo de forma adecuada, no se genera hollín en la chimenea, y se puede observar que la composición de los polvos difiere sustancialmente de los que se obtienen en instalaciones de combustión convencionales, como se observa en la tabla 7.

Na₂SO₄	89,2 %
K₂SO₄	2,2 %
CaSO₄	6,3 %
NaHSO₄	1,5 %
V₂O₅	0,8 %

Tabla 7. Composición frecuente del polvo para un vidrio sódico-cálcico. [44]

Para un vidrio borosilicato, los elementos presentes en los humos no son idénticos, ya que se observa una mayor presencia de boratos en los polvos. De la misma manera, el vidrio de plomo contiene óxidos de plomo para evitar la dispersión de polvo por la acción del viento.

Para reducir la emisión de partículas de polvo, se emplean diversas medidas tanto primarias como secundarias. Entre las medidas primarias destacan: mantener el material constantemente húmedo en la zona de carga, cubrirlo con fundas de lona, plástico u otros materiales, o protegerlo mediante la instalación de barreras contra el viento, almacenar el material pulverulento en silos cerrados equipados con sistemas de recolección y eliminación de polvo, para evitar el almacenamiento al aire libre. También, es fundamental que el recorrido que sigue la mezcla esté completamente sellado, no solo para prevenir la emisión de polvo al ambiente, sino también para evitar la pérdida de materias primas.

De todas formas, la volatilización de las materias primas, como los gránulos de sílice contenidos en la arena, suele ser escasa y está rigurosamente controlada mediante la regulación de la granulometría y el enfornado de la mezcla.

Una combinación adecuada de estas medidas primarias deriva en una disminución drástica de las emisiones durante el proceso. Respecto a las medidas secundarias, la solución más eficaz sería utilizar filtros de mangas o filtros electrostáticos.

En cuanto a las medidas secundarias, sobresalen el precipitador electrostático (electrofiltro) y el filtro de mangas. El electrofiltro crea un campo electrostático que carga negativamente las partículas en el aire, lo que las hace migrar hacia las placas colectoras cargadas positivamente. Estas placas se limpian periódicamente por vibración. Por lo general, se requiere un pre-tratamiento de los humos con un agente alcalino para neutralizar los gases ácidos que podrían afectar la filtración y la durabilidad del electrofiltro. La eficiencia de eliminación de partículas es del 70-90% y varía según la concentración inicial y el número de campos del filtro.

Los filtros electrostáticos se utilizan en instalaciones de mayor envergadura y que demandan menos mantenimiento. En el caso de fábricas que contengan varios hornos, sería más óptimo conectar todos los hornos a un único sistema de filtración.

El filtro de mangas utiliza membranas textiles permeables para retener las partículas de los humos. El gas se filtra del exterior al interior de la manga, y el polvo retenido se elimina para evitar la acumulación mediante flujo inverso, agitación, vibración o aire comprimido. En algunos casos, este equipo puede trabajar en conjunto con un scrubber seco o semiseco para gases ácidos. La eficiencia de eliminación de partículas es del 85-95%, dependiendo de la concentración inicial del humo a tratar.

Es más económico para hornos de menor tamaño, aunque requiere la refrigeración de los humos a temperaturas entre 220°C y 130°C, dependiendo del material de las mangas. Los costes de mantenimiento son relativamente altos, y la duración de las mangas es un factor crítico para la rentabilidad operativa. Otro inconveniente es el uso de combustibles ricos en azufre, ya que se producen pérdidas de carga significativas y un consumo considerable de energía.

- **NO_x**

Las emisiones de óxidos de nitrógeno se componen principalmente de NO (entre el 90% y el 95%), siendo el resto NO₂. Al entrar en contacto con la atmósfera, el NO se oxida rápidamente para formar dióxido de nitrógeno. El N₂O, que se produce en algunas instalaciones de combustión, es prácticamente inexistente en las fábricas de vidrio debido a las altas temperaturas presentes en los hornos.

Existen tres mecanismos principales para la formación de NO (figura 57):

- NO térmico: Se forma cuando el nitrógeno molecular del aire y el oxígeno reaccionan a altas temperaturas. Dado que los hornos de vidrio alcanzan temperaturas extremadamente altas, este mecanismo es el predominante en su formación.
- NO del combustible: Se produce a partir de compuestos nitrogenados presentes en el combustible, como cianuros (principalmente HCN) y aminas (principalmente NH₃), liberados durante la combustión. La concentración de oxígeno desempeña un papel crucial en la conversión de este nitrógeno en NO. Es relevante señalar que el gas natural a veces contiene nitrógeno molecular.
- NO naciente: Este mecanismo está relacionado con la presencia de radicales libres de hidrocarburos en el frente de la llama, la región principal de oxidación. Algunos de estos radicales reaccionan con el nitrógeno molecular para formar NO.

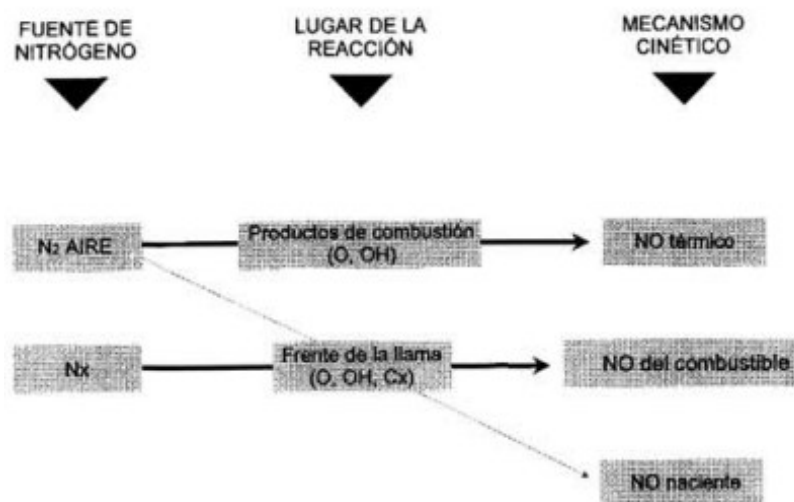


Figura 57. Mecanismos de formación de NO. [44]

La generación de NO en la llama está directamente influenciada por la temperatura (figura 58), el tiempo de exposición de las sustancias en la zona de combustión y la concentración de las mismas, siguiendo los principios de cualquier reacción química.

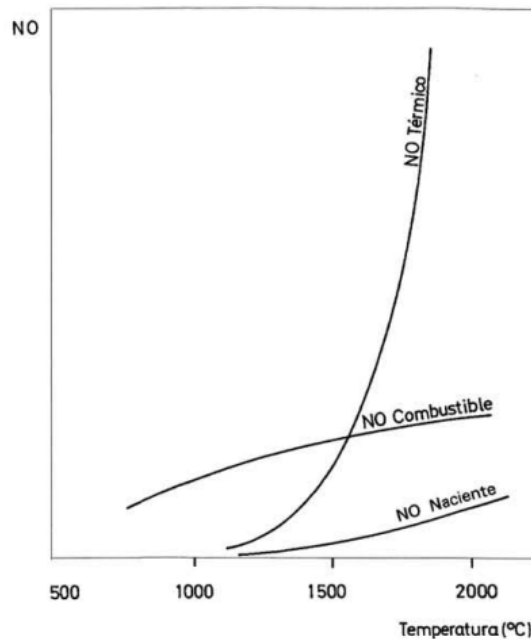


Figura 58. Generación de NO en función de la temperatura. [44]

Para reducir las emisiones de NO_x, se pueden aplicar diversas técnicas primarias, como:

- Reducción del ratio aire/combustible.
- Reducción de la temperatura del aire de combustión.
- Combustión por etapas.
- Uso de quemadores de baja emisión de NO_x.
- Selección cuidadosa del tipo de combustible.
- Reducción del tiempo de residencia de la mezcla en la zona de combustión.
- Aplicación del boosting eléctrico.
- Incremento en el uso de vidrio reciclado como materia prima.
- Implementación de la oxicomustión.

La eficacia en la reducción de NO_x puede alcanzar hasta un 70%, dependiendo del número de técnicas aplicadas y la concentración inicial de los humos.

Además de las técnicas primarias, se pueden emplear técnicas secundarias, como la reducción selectiva con catalizador (SCR), en la que se hace reaccionar los NO_x con amoníaco en un lecho catalítico en presencia de un catalizador a temperaturas comprendidas entre los 200 y 500°C, siendo la temperatura óptima de reacción diferente para cada catalizador. Los catalizadores más comunes son TiO₂ y V₂O₅ depositados en un sustrato metálico o cerámico. La eficiencia de eliminación de NO_x mediante SCR varía entre el 70% y el 90%.

- **SO_x**

Respecto a los óxidos de azufre, la principal medida primaria es utilizar gas natural en el horno de fusión. Sin embargo, el gas natural tiende a generar más óxidos de nitrógeno (NO_x) debido a las temperaturas más altas que alcanza en comparación con otras fuentes de

combustible. Una alternativa viable es recurrir a medidas secundarias, como la instalación de un lavador por vía seca o semihúmeda. Este sistema implica la introducción de un material absorbente en el gas a tratar, el cual reacciona con los óxidos de azufre (SO_x) para formar un sólido que luego se recoge mediante un precipitador electrostático o un filtro de mangas.

En el proceso de lavado en seco, se utiliza un absorbente en polvo seco, como el Ca(OH)₂, NaHCO₃ o Na₂CO₃, dispersado en el gas mediante aire comprimido. Por otro lado, en el método semiseco, el absorbente (Na₂CO₃, CaO o Ca(OH)₂) se añade en forma de solución o dispersión, y la evaporación del agua enfría la corriente de gas. En la industria del vidrio, el enfoque más común es el proceso en seco, utilizando Ca(OH)₂, junto con un precipitador electrostático, a una temperatura de aproximadamente 400°C.

El lavador o scrubber también puede instalarse para proteger otros equipos contra los gases ácidos. La eficacia en la eliminación de estos gases puede variar dependiendo del tipo y la cantidad de reactivo utilizado, la temperatura del proceso de tratamiento del gas y el tipo de gas a tratar. Se estima que las emisiones de SO_x pueden reducirse entre un 80% y un 90%, y en el caso de HCl y HF, hasta un 95%.

- **Fluoruros (HF) y Cloruros (HCl)**

Los componentes gaseosos como los fluoruros y cloruros se expresan principalmente en forma de fluoruro de hidrógeno (HF) y cloruro de hidrógeno (HCl), respectivamente. Estas emisiones se originan mayormente en las impurezas presentes en las materias primas utilizadas en la mezcla o en materiales seleccionados específicamente por su contenido de estas sustancias para conferir ciertas cualidades al producto final.

Aunque la mayoría de materias primas contienen niveles insignificantes de flúor o cloro, algunas pueden tener cantidades significativas de estos elementos como impurezas. Entre las principales fuentes destacan:

- Carbonato sódico, con un contenido de entre 0,05-0,15% de NaCl.
- Vidrio reciclado externo, que contiene sobre todo cloruros, fluoruros y metales.
- El polvo reciclado del equipo de eliminación, que contiene sales, fluoruros y cloruros.
- Algunos combustibles contienen cloruros.

Para minimizar estas emisiones, se emplean diversos métodos como, la selección meticulosa de materias primas y la aplicación de técnicas para reducir la volatilización, como la disminución de temperaturas, el control del flujo de aire y la reducción de turbulencias. Entre estas técnicas se incluyen:

- Mayor uso de casco de vidrio.
- Refuerzo eléctrico.
- Mejora en el diseño y la geometría del horno.
- Posición de los quemadores.
- Reducción de la relación aire-combustible.
- Fusión con oxidación
- Fusión eléctrica.

Las técnicas principales para abordar estas emisiones son el lavado seco y semiseco. La elección del absorbente es crucial, ya que a veces se debe decidir entre reducir el dióxido de azufre (SO₂) o los fluoruros y cloruros. Esto depende de varios factores, incluidos los niveles relativos de contaminantes en el gas residual. Otra opción económicamente viable, especialmente para procesos a pequeña escala, es el lavado húmedo, utilizando una solución alcalina en un lavador de lecho relleno, aunque esto genera una corriente residual acuosa como desventaja principal.

- **CO y CO₂**

Los óxidos de carbono, que incluyen el dióxido de carbono (CO₂) y el monóxido de carbono (CO), son compuestos importantes en las emisiones de las industrias de envases de vidrio. El CO se produce como producto de una combustión incompleta y rara vez alcanza niveles preocupantes para el medio ambiente. Por otro lado, el CO₂ se origina tanto de la combustión de combustibles fósiles como de la descomposición de materiales orgánicos, así como de la descomposición de carbonatos presentes en las materias primas utilizadas.

Los carbonatos, como el carbonato sódico y la piedra caliza, son las principales fuentes de óxidos de metales alcalinos y alcalinotérreos en la fabricación de vidrio. Las únicas alternativas reales a estas fuentes son los residuos de vidrio reciclado y los residuos de proceso.

Aunque el CO₂ está asociado con efectos ambientales conocidos, no figura como una de las principales sustancias contaminantes. El aumento en el uso de vidrio reciclado como materia prima en la industria del vidrio busca principalmente reducir el consumo energético y los residuos, siendo su impacto en la reducción de emisiones de carbono un beneficio adicional.

Muchas de las técnicas que se han comentado tienen implicaciones importantes en las emisiones de CO₂, por lo que no se presentan otras técnicas adicionales, más allá de aquellas destinadas a reducir el consumo energético y otros contaminantes.

Agua

En términos generales, la producción de envases de vidrio no genera grandes problemas respecto a la contaminación del agua. La principal demanda de agua es la refrigeración de los equipos, representando más del 70% del consumo total. Estos sistemas suelen funcionar en circuitos cerrados, donde las pérdidas por evaporación son reemplazadas. Otros usos minoritarios del agua en la producción de envases de vidrio, son la limpieza de las instalaciones (menos del 30% del consumo), la preparación de la carga del horno (humidificación de la arena) y diversos tratamientos superficiales para acabados o procesos especiales. El consumo promedio de agua en las fábricas varía entre 0,3-2 m³/t V^o F^o.

En el caso del agua utilizada para la refrigeración de los envases rechazados, la contaminación se debe mayoritariamente a minerales procedentes de los gránulos de vidrio y a compuestos orgánicos derivados de aceites (aceites solubles utilizados en la refrigeración de las tijeras y aceites de lubricación de las máquinas). Con un tratamiento relativamente

sencillo, como la decantación y desaceitado, es posible recuperar tanto los gránulos de vidrio como los aceites.

Para reducir el consumo y la contaminación del agua, se está utilizando sistemas en circuito cerrado, aunque también se pueden adoptar otras técnicas para controlar las emisiones al agua, como, por ejemplo:

- Sistemas automáticos de control y detección de fugas y derrames.
- Venteos y puntos de llenado en el interior de los cubetos.
- Sistemas de depuración de las aguas residuales (sedimentación, centrifugación, filtración, precipitación y coagulación, floculación, etc.)

Residuos.

En la fabricación de envases de vidrio, los niveles de residuos son muy bajos. En las últimas décadas ha habido un crecimiento significativo del uso de vidrio reciclado. En la Unión Europea, el porcentaje medio de utilización de casco de vidrio es de alrededor del 50% del total de materias primas, con algunas instalaciones llegando hasta un 90% de vidrio reciclado. Una ventaja destacada del vidrio sobre otros materiales de envasado es su facilidad para la reutilización y el reciclaje. Su incorporación permite reducir el consumo del resto de materias primas convencionales y minimizar las emisiones a la atmósfera.

Por otra parte, al finalizar el ciclo de operación de un horno, toda su estructura refractaria se desmonta y se reemplaza. Este proceso genera entre 500 y 2.000 toneladas de materiales refractarios residuales, que se clasifican y se valorizan. En la medida de lo posible, se recuperan para su reutilización o se eliminan en vertederos autorizados, aunque una pequeña cantidad, no apta para valorización, puede requerir tratamiento especial antes de su eliminación en vertederos.

Por último, los residuos de las operaciones de embalaje (plástico, cartón y madera) generalmente se reutilizan o reciclan a través de proveedores u otros canales adecuados. Los restantes residuos provienen de la manipulación de materias primas, sistemas de purificación de aire y captura de partículas, sistemas de filtrado de gases de escape y residuos de sulfatos en los hornos. La generación de residuos peligrosos en la industria del vidrio hueco varía entre 0.7 y 1 kg/t V° F°, mientras que la de residuos no peligrosos oscila entre los 5 y 6 kg/t V° F°.

Ruido

La problemática del ruido en la industria del vidrio se manifiesta principalmente durante las etapas de fusión, conformación y enfriamiento, así como en las zonas en las que se encuentran los compresores. Por otro lado, las fases de inspección y control, paletizado y embalaje experimentan mínimas molestias por ruido. En términos generales, la regulación del ruido establece un límite que no debe excederse, en el caso de las fábricas de vidrio este límite se sitúa en 65 dB durante el día y 55 dB durante la noche.

Actualmente, si se sobrepasan los límites, la solución que se suele adoptar consiste en el aislamiento acústico mediante el cerramiento de estos sistemas, aplicado según las circunstancias y procesos específicos, con el objetivo de reducir los niveles de ruido.

3. MEMORIA DE CÁLCULO

3.1. Bases de diseño.

El diseño de botellas de vidrio es un proceso esencial en la industria de los envases, donde la estética, la funcionalidad y la seguridad juegan un papel importante. Se va a realizar un diseño de botellas de vidrio de color topacio, las cuales han ganado popularidad por su capacidad para proteger el contenido de los efectos nocivos de la luz ultravioleta, especialmente en productos sensibles como cervezas, licores y productos farmacéuticos (figura 59).

Las botellas de vidrio se caracterizan por tener: un peso de 220 gramos, una capacidad de 330 ml, una altura total de 227 mm y un diámetro de 59.4 mm, con una boca tipo “Corona 26 Alta”.

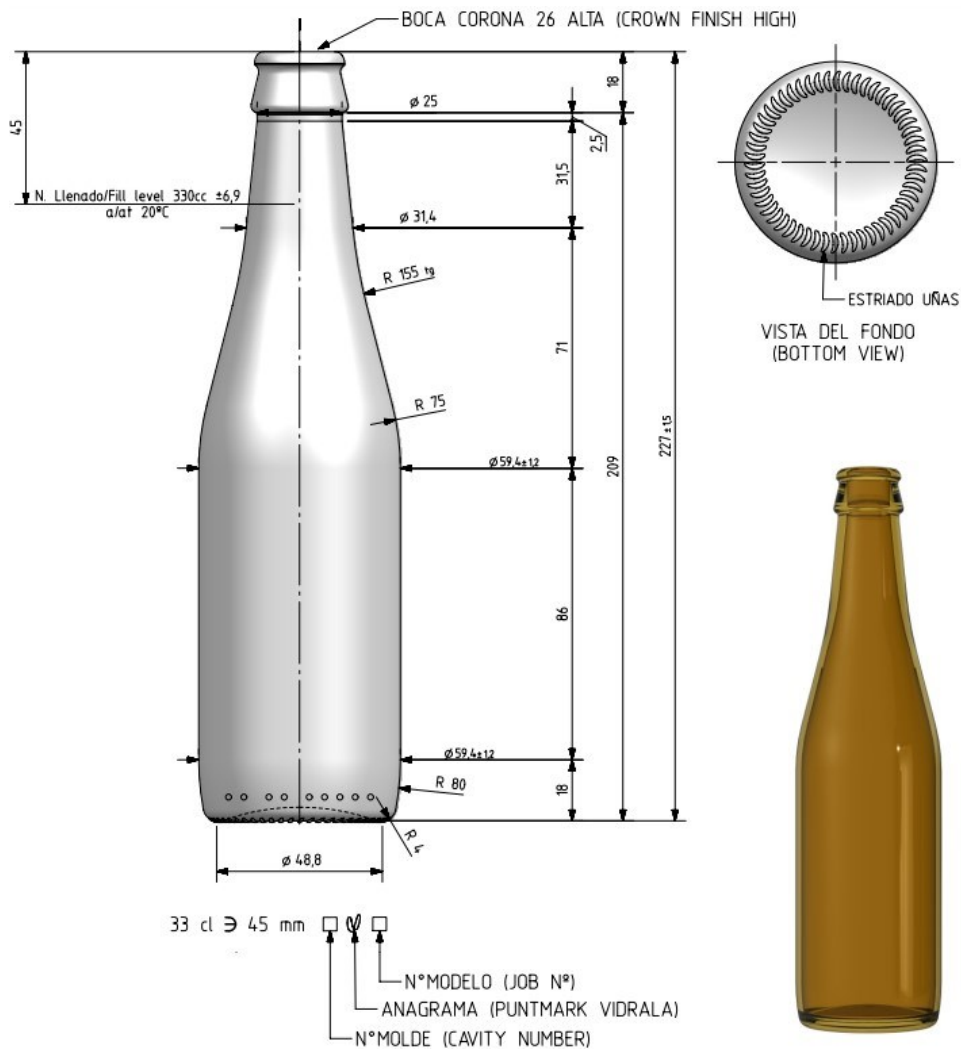


Figura 59. Diseño de la botella. [42]

Este diseño se ha hecho desde una perspectiva integral que abarca tanto aspectos estéticos como funcionales, con el objetivo de ofrecer una solución óptima que satisfaga las necesidades del producto y las expectativas del consumidor.

En la tabla 8, se muestra las especificaciones características de la botella de vidrio diseñada.

Peso aprox / Weight approx	220 g		
Capacidad N. llenado / Fillpoint Capacity	330 ml± 6,9	a	45 mm
Capacidad a verter / Brimfull Capacity	344 ml± aprox		
Cámara expansión / Vacuity	4,2 %		14 ml
Recipiente medida / Meas cap	SI		
Angulo de volcado / Tilt angle	16,7°		
Carbonatación / Gas vol	3,5		Vol.CO2 max
Presión larga duración/Long term pressure:	7,00 Bar max	Páster	NO
Resistencia. choque térmico / Thermal Shock max:			42 °C

Tabla 8. Especificaciones de la botella. [42]

La capacidad de la planta viene definida por la demanda del mercado, lo que determina la capacidad de producción de los hornos. Evidentemente, no se puede moldear ni recocer más vidrio del que producen los hornos. Estos tienen que ser capaces de satisfacer la cantidad de vidrio requerida sin operar al máximo de su capacidad. La velocidad de salida del vidrio de los hornos puede ajustarse en cierta medida para alinearse con el ritmo de producción del resto de la planta.

Se estima que la demanda del mercado alcanzará aproximadamente 1.000.000 de botellas de vidrio diarias, cifra que se encuentra dentro del rango habitual de capacidad de una planta de producción de botellas de vidrio.

Los porcentajes de cada materia prima en la mezcla de fusión no son exactos puesto que pueden variar según el tipo de vidrio y la planta de producción. Sin embargo, estos porcentajes se mantienen dentro de rangos definidos. En la planta, la composición de la mezcla a fundir se corresponde con la de la tabla 9.

MATERIAS PRIMAS	PORCENTAJE (%)
Arena de sílice	70
Sosa	15
Caliza	10
Compuestos secundarios	5

Tabla 9. Composición de la mezcla (sin vidrio reciclado). [47;48]

La adición de casco de vidrio (vidrio reciclado triturado) como materia prima contribuye a esta inexactitud en los porcentajes de cada materia prima, ya que es difícil conocer con precisión la composición del casco de vidrio. Hoy en día, el vidrio se fabrica con un elevado porcentaje de vidrio reciclado puesto que debido reduce el impacto sobre el medio ambiente y el consumo de materias primas y energía. Además, la calidad de los envases no disminuye por el uso del casco de vidrio, por lo que se intenta utilizar la máxima cantidad de vidrio reciclado.

En la actualidad, las botellas no se fabrican con un contenido del 100% de vidrio reciclado debido a que existe una gran limitación: el color. Las botellas de vidrio de color topacio suelen tener 50% de casco de vidrio, el cual proviene del vidrio reciclado de los contenedores (reciclado externo) y de las botellas defectuosas en el proceso de fabricación (reciclado interno).

De esta manera, la tabla 10 muestra como quedaría la composición final de la mezcla.

MATERIAS PRIMAS	PORCENTAJE (%)
Arena de sílice	35
Sosa	7,5
Caliza	5
Compuestos secundarios	2,5
Casco de vidrio	50

Tabla 10. Composición de la mezcla (con vidrio reciclado).

En relación al funcionamiento de la planta, se detallan los siguientes parámetros:

- La operación de la planta se desarrolla las 24 horas del día, distribuidas en tres turnos de 8 horas cada uno, durante los 365 días del año, de manera ininterrumpida.
- La producción se centra en la fabricación de botellas de vidrio de 330 ml de color topacio.
- La capacidad de producción de la planta se sitúa en 1.000.000 unidades por día.
- La capacidad total de la fábrica está principalmente determinada por la capacidad de los hornos. Esto se debe a que el horno es el equipo más caro de la planta con gran diferencia y su capacidad define el límite de producción. Sobredimensionar otras áreas de la fábrica resulta más económico que reemplazar o modificar el horno.

- Respecto al combustible que se utiliza en el horno, existen diferentes opciones que van desde la electricidad hasta el gas natural, pasando por fuel oil. Para este caso, y siguiendo las tendencias actuales, se ha optado por un horno regenerativo de llama transversal, que funcionará con gas natural como combustible.
- En cuanto al proceso de conformación, se va a utilizar una máquina conformadora de sección independiente (IS) que consta de 12 secciones y que trabaja en doble gota (DG).
- Para satisfacer las fluctuaciones de la demanda, es crucial que la planta cuente con un adecuado sistema de almacenamiento.

Para determinar esta capacidad se ha tomado como referencia el stockaje de empresas del sector, estableciendo que el almacenamiento de productos terminados debe ser suficiente para cubrir un periodo de 14 días de producción.

Considerando que la producción diaria es de 1.000.000 botellas, la producción para 14 días será de:

$$1.000.000 \text{ botellas} \times 14 \text{ días} = 14.000.000 \text{ botellas.}$$

Cada palet puede contener 1.450 botellas, por lo que se necesitará:

$$14.000.000 \text{ botellas} / 1.450 = 9.655 \text{ palets}$$

Por lo tanto, se requerirán aproximadamente unos 9.655 palets. Considerando que la superficie de cada palet es de 1,2 m² cada uno, y que se pueden apilar hasta una altura de 4 palets, el área total necesaria para el almacenamiento sería:

$$(9.655 \text{ palets} \times 1,2 \text{ m}^2) / 4 = 2.896,5 \text{ m}^2$$

Se aumenta esta cantidad en un 25% para dejar espacio para pasillos de transporte y de seguridad. De esta forma, se obtiene un área de almacenamiento de 3.621 m².

3.2. Balance de materia.

Para realizar el balance de materia se ha tomado como referencia los siguientes datos, característicos de las plantas de producción de envases de vidrio:

- Producción de la planta: 1.000.000 de botellas/día
- Rendimiento en el proceso de fusión: 85%. El 15% restante está asociado a las pérdidas por ignición en el horno.
- Porcentaje de botellas que son rechazadas en el proceso de inspección y control de calidad: 5%.

En primer lugar, se calcula la cantidad de botellas que hay que fabricar, considerando el porcentaje de botellas que se desechan en el proceso de inspección y control de calidad:

$$1.000.000 \text{ botellas/día} \times 0,05 + 1.000.000 \text{ botellas/día} = \underline{\underline{1.050.000 \text{ botellas/día}}}$$

En segundo lugar, se determina la cantidad de vidrio fundido que se tiene que producir al día para cumplir el objetivo de producción, conociendo el peso que tiene la botella de vidrio:

$$1.050.000 \text{ botellas/día} \times 0,220 \text{ kg vidrio/botella} = \underline{231.000 \text{ kg vidrio fundido/día}}$$

$$231.000 \text{ kg vidrio fundido/día} \times 10^{-3} \text{ t vidrio/kg vidrio} = \underline{231 \text{ t vidrio fundido/día}}$$

A continuación, se calcula la cantidad de mezcla de materias primas que se requiere, teniendo en cuenta el rendimiento en el horno:

$$231.000 \text{ t vidrio fundido/día} \times (100/85) \approx \underline{271,76 \text{ t mezcla/día}}$$

La diferencia entre la cantidad de mezcla que se introduce en el horno y la cantidad de vidrio fundido que se produce, está asociada a las pérdidas por ignición producidas en el horno:

$$271,76 \text{ t mezcla/día} - 231 \text{ t vidrio fundido/día} = \underline{40,76 \text{ t gases/día}}$$

Posteriormente, se determinan la cantidad de cada una de las materias primas que se necesita para obtener los 271,76 t mezcla/día, teniendo en cuenta los porcentajes de cada una de ellas en la mezcla:

MATERIAS PRIMAS	CANTIDAD (t/día)
Arena de sílice	95,12
Sosa	20,38
Caliza	13,59
Compuestos secundarios	6,79
Casco de vidrio	135,88
MEZCLA	271,76

Tabla 11. Cantidades necesarias de materias primas.

Para conocer la cantidad de vidrio reciclado externo que se requiere como materia prima, es necesario determinar la cantidad de vidrio que se rechaza dentro de la planta:

$$(1.000.000 \text{ botellas/día} \times 0,05) = \underline{50.000 \text{ botellas rechazadas/día}}$$

$$50.000 \text{ botellas rechazadas/día} \times 0,220 \text{ kg vidrio/botella} = \underline{11.000 \text{ kg vidrio/día}}$$

$$11.000 \text{ kg vidrio/día} \times 10^{-3} \text{ t vidrio/kg vidrio} = \underline{11 \text{ t vidrio rechazado/día}}$$

A continuación, se calcula la cantidad de vidrio reciclado proveniente del exterior, sabiendo que se requieren 135,88 t casco de vidrio/día y que se desechan en la fábrica unas 11 t vidrio/día:

$$135,88 \text{ t casco de vidrio/día} - 11 \text{ t vidrio rechazado/día} = \underline{124,11 \text{ t vidrio reciclado/día}}$$

Por último, se determina el número de palets que se necesitan para embalar 1.000.000 de botellas diarias, sabiendo que en un palet caben 1.600 botellas aproximadamente:

$$1.000.000 \text{ botellas/día} / 1.600 \text{ botellas/palet} = \underline{625 \text{ palets/día}}$$

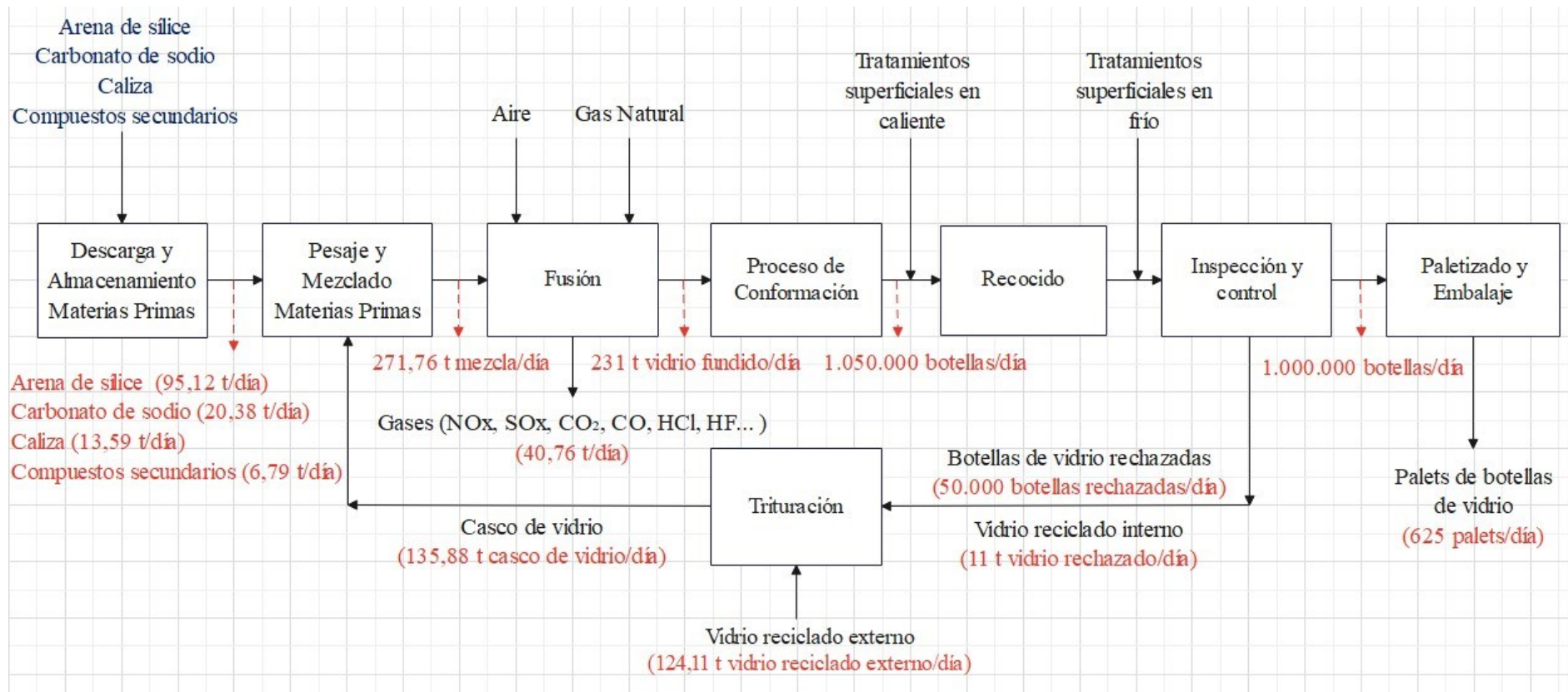


Figura 60. Diagrama del proceso de producción.

3.3. Dimensionamiento de los equipos

A continuación, se va a llevar a cabo el dimensionamiento de los equipos principales de la planta: el horno de fusión, la máquina conformadora, el horno de recocido y la trituradora. Este proceso tiene una importancia fundamental, ya que determinará la capacidad y eficiencia de la planta, asegurando así la calidad y el rendimiento óptimo en la fabricación de botellas de vidrio.

Horno de fusión

Se ha llevado a cabo una búsqueda exhaustiva para la adquisición del horno de fusión, sin embargo, no se ha podido encontrar ninguno que cumpla con los requisitos de la planta y que tenga la información técnica suficiente. De esta forma, se ha decidido elaborar una hoja de especificaciones, la cual se muestra a continuación:

HORNO DE FUSIÓN	
Tipo	Horno regenerativo de llama transversal
Capacidad	231 t/día
Combustible utilizado	Gas natural
Temperatura de operación	1600°C
Funcionamiento	Continuo (durante 10-12 años)
Certificado	CE

Tabla 12. Especificaciones del horno de fusión.

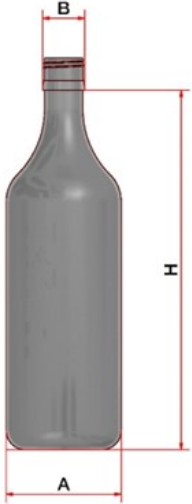
Máquina conformadora

Como se mencionó durante el proceso de producción en el apartado de conformación, una máquina conformadora IS, que dispone de 20 secciones y trabaja en simple gota (SG), tiene la capacidad de fabricar más de 800,000 botellas al día. Para cumplir con el requisito de producción de 1.050.000 botellas diarias establecido para la máquina conformadora, se ha decidido optar por una máquina conformadora de 12 secciones que trabaje en doble gota (DG), con el fin de alcanzar la capacidad deseada.

Después de una detallada búsqueda, se ha encontrado una máquina que satisface estos criterios y se ajusta perfectamente a nuestras necesidades. Se trata de la máquina Heye IS de 5" DG de Heye International.

A continuación, se indican las especificaciones de la máquina:

TABLA DE LÍMITES DE PRODUCCIÓN	
PROCESO (SOPLADO-SOPLADO)	MÁQUINA CONFORMADORA 5" DG
A: Diámetro máximo del cuerpo (VAS)	95 mm
A: Diámetro máximo del cuerpo (Refrigeración Axial)	90 mm
H: Altura máxima bajo acabado	326 mm
H: Altura mínima bajo acabado	91 mm
B: Diámetro máximo de acabado	48 mm



El diagrama muestra un vaso gris con tres dimensiones clave marcadas con líneas rojas y letras: 'A' indica el diámetro máximo del cuerpo del vaso; 'B' indica el diámetro máximo del acabado superior; y 'H' indica la altura máxima del vaso.

Tabla 13. Tabla de límites de producción máquina Heye IS de 5" DG. [54]

DIMENSIONES	
MÁQUINA CONFORMADORA 5" DG (12 SECCIONES)	
E: Transportador offset CL	2436+x*1 mm
F: Parte superior del embudo	4432 mm
G: Altura del interceptor Gob	4603 mm
H: Altura de la cama	425 mm
I: Distancia lecho-orificio	309 mm
J: Anchura total	3366 mm
N: Longitud total	9772 mm
O: Desplazamiento	1159 mm
P: Posición del pie de la máquina	3505 mm
Q: Posición del pie de la máquina	489 mm
R: Posición del pie de la máquina	1630 mm
S: Borde superior de la rejilla de protección	4564 mm
T: Parte superior de la viga	4378 mm
U: Solapa abierta de la viga cuchara	533 mm





^{*1} Desplazamiento del empujador x

Tipo de empujador	Desplazamiento en mm
2157	x = 0
2154	x = 15
2158	x = 30

Tabla 14. Dimensiones máquina Heye IS de 5" DG. [54]

REQUISITOS DEL SERVICIO		
MÁQUINA CONFORMADORA 5" DG		
Parámetros	Presión (bar)	Consumo por sección (Nm³/h)
Aire de operación de baja presión	2,2	110
Aire de operación de alta presión	3	130
Aire piloto	3,4-4	6
Pusher	2-5	6
Molde de soplado al vacío	0,845	66
Aire de refrigeración	0,08	1000
Agua de refrigeración	2,5-5	0,6-0,9
<ul style="list-style-type: none"> - El aire de operación debe estar limpio, seco y exento de aceite. - Aire de operación con presión constante $\pm 0,2$ bar. - Aire piloto mín. 0,5 bar por encima del aire de operación. - El aire piloto debe estar seco, limpio y filtrado por un microengrasador a una presión constante de $\pm 0,2$ bar. - Temperatura máx. del aire comprimido 45°C. - Dureza del agua no superior a 6° dH. - El aire de refrigeración del molde debe estar limpio y exento de aceite. 		

Tabla 15. Requisitos del servicio máquina Heye IS de 5" DG. [54]

Horno de recocido

Después de una minuciosa búsqueda, no se ha podido encontrar un horno de recocido, comúnmente llamado "Annealing Lehr", que satisfaga plenamente los requisitos de capacidad y que proporcione la información necesaria como para proceder con su adquisición. Por esta razón, se ha elaborado una hoja de especificaciones que servirá como guía para la futura compra del equipo, tomando como referencia las características asociadas a este tipo de equipos en plantas de producción de botellas de vidrio.

A continuación, se muestra la hoja de especificaciones del horno de recocido:

HORNO DE RECOCIDO	
Potencia	230-270 kW
Fuente de alimentación	Trifásica, 380 V, 50 Hz
Precisión control de la temperatura	± 1-2°C
Longitud del horno	15-35 m
Ancho de la correa de la malla	1000-6000 mm
Altura de la correa de la malla (superior/suelo)	900-1000 mm
Material correa de la malla	Acero inoxidable
Velocidad correa de la malla	150-650 mm/min
Altura de paso en el túnel	250-500 mm
Estructura del horno	Modular
Calentamiento (temperatura máxima admisible)	600-650°C
Enfriamiento	Temperatura ambiente + 20°C
Capacidad	1.050.000 botellas/día
Certificado	CE

Tabla 16. Hoja de especificaciones horno de recocido. [52,53,55]

Trituradora

La trituradora tiene que cumplir con las necesidades de la planta, es decir, tiene que tener una capacidad de procesamiento de aproximadamente 6 toneladas por hora. Esta capacidad permitirá gestionar de manera eficiente el flujo de botellas de vidrio recicladas, garantizando un ritmo de producción compatible.

Tras un exhaustivo análisis de mercado y considerando las diferentes opciones disponibles, la trituradora que mejor se adapta a nuestras necesidades es: la trituradora TR 100 de Coparm.

Esta trituradora, con una capacidad media-alta y cuchillas contra-rotativas, es idónea para procesar grandes volúmenes de residuos voluminosos y similares. Destaca por su versatilidad, siendo útil para triturar una gran variedad de residuos sólidos. Incorpora una amplia cámara de trituración que, combinada con su potencia y capacidad de torsión, la hace adecuada para satisfacer una amplia gama de requisitos, incluyendo la trituración de neumáticos.

Además, la empresa cuenta con certificación de cumplimiento de la norma ISO-9001:2015, la cual muestra la calidad y capacidad para cumplir con las necesidades de los clientes, y la norma ISO-14001:2015, la cual muestra un sistema de gestión medioambiental eficaz.

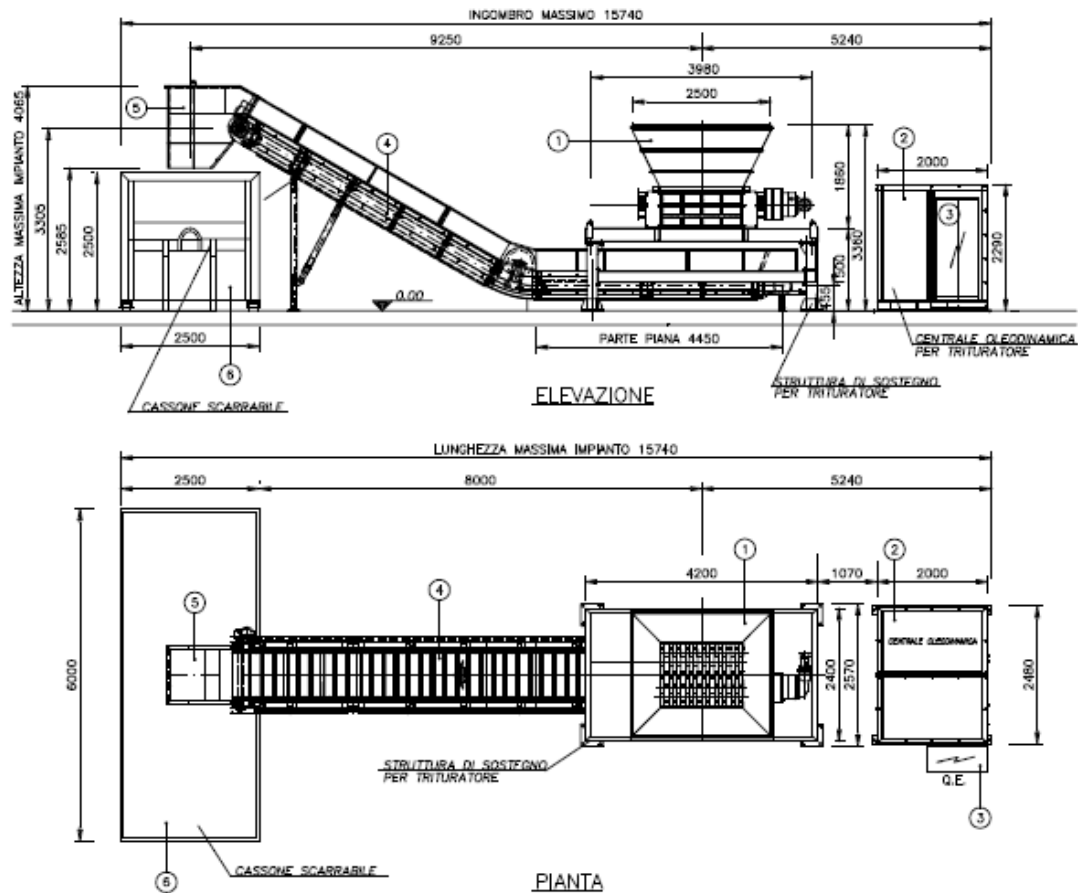
A continuación, se muestran las especificaciones y el layout de la trituradora:

TRITURADORA TR 100 COPARM	
Tamaño de la cámara de trituración	1100 x 1500 mm
Tolva de alimentación	4,5-6 m ²
Ejes	2
Velocidad de rotación ejes	12-18 rpm
Espesor cuchillas	75-100 mm
Potencia	110 kW
Peso	14.000 kg
Capacidad	Plásticos: 7-10 t/h; Neumáticos: 4-7 t/h; Vidrio: 4-8 t/h
Certificado	CE

Tabla 17. Especificaciones de la trituradora TR 100 Coparm. [51]

ELENCO MATERIALE (MATERIALS LIST)

POS. ITEM	QUANT. QUANT.	DIS. N° DWG N°	DESCRIZIONE DESCRIPTION	MATERIALE MATERIALS	DIMENSIONI DIMENSION	NOTE NOTES
1	1		TRITURATORE TR 100			
2	1		CENTRALE OLEODINAMICA TRITURATORE TR 100			
3	1		QUADRO ELETTRICO TRITURATORE TR 100			
4	1		TRASPORTATORE ESTRAZIONE MATER. TRITUR.	GOMMA	10.55 mt.	TG 1000
5	1		TRAMOGGIA DI SCARICO	Fe 430 B		
6	1		CASSONE SCARRABILE	Fe 430 B	2500x6000x2500	30 mc.



MACCHINA/machine		DISEGNATO	CODICE/code	DISEGNO N°/drawing n°	REV./rev.
Trituratore TR_100		D.D.	—	LO_TR_100	00
MATERIALE/material		DATA	DESCRIZIONE/description		
FE 430 B		08/03/06	LAY OUT INSTALLAZIONE TR_100		
FORM./size	SCALA/scale	FOGLIO/sheet - DI/OF			
A4	1/100	1 di 1			
 Uffici e Stabilimento: Zona ind. Macchia - 75013 Ferrandina (MT) Tel. 0835 757014-757016 Fax 0835/757008 e-mail: coparm@coparm.it - http://www.coparm.it		Azienda con Sistema di Qualità certificato secondo UNI EN ISO 9001 In accordo con le vigenti norme, COPARM S.p.A. considera questo documento un segreto aziendale e quindi ne proibisce la riproduzione, totale o parziale, o l'uso senza autorizzazione scritta di COPARM S.p.A. According to the law, COPARM S.p.A. considers this document a company secret and therefore prohibits any person to reproduce it, completely or in part, to others without written authorization of COPARM.			

Documento di proprietà Coparm s.r.l. La Società tutela i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.
 This document is the property of Coparm s.r.l. who will safeguard its rights according to the civil and penal provisions of the law.

MOD. 44 verticale cod. rev. 01 del 05/09/00

Figura 61. Layout tritadora TR 100 Coparm. [51]



Figura 62. Trituradora TR 100 Coparm. [51]



Figura 63. Cuchilla trituradora de 2 ejes. [51]

4. MEDICIONES Y PRESUPUESTO.

El diseño de un proceso químico implica un proceso de análisis técnico y un estudio económico para asegurar la rentabilidad de la inversión necesaria para la instalación y operación del proceso en una planta.

Existen diferentes fuentes para realizar una estimación económica antes de tener todos los datos de especificaciones de equipos y auxiliares definitivos: datos históricos de la empresa, datos procedentes de otros proyectos similares, evaluaciones preliminares de suministradores y publicaciones de listas de precios estimados para diferentes sectores industriales.

Para poder hacer una estimación económica del proceso tiene que estimar el coste total de inversión (CTI) y el coste total de producción (CTP). El CTI está asociado al capital fijo o inmovilizado, a los costes de arranque y al capital circulante. En cambio, el coste total de producción está relacionado con los costes de fabricación y los gastos generales de la compañía.

En este apartado, se va a llevar a cabo una estimación económica del proceso. Para ello, se van a utilizar como dato, los parámetros de las especificaciones de los equipos y las tablas recogidas en el Anexo 1 del tema “Análisis económico de procesos químicos” de la asignatura Ingeniería de Procesos.

Por último, también se llevará a cabo una evaluación sobre la viabilidad económica del proyecto.

4.1. Costes de inversión de la planta.

A continuación, se va a llevar a cabo la estimación del coste de inversión de la planta, lo que implica calcular los costes fijos, así como una aproximación del coste de los principales equipos de la planta y los costes asociados a su instalación, tuberías, redes eléctricas, instrumentación, ingeniería, etc.

4.1.1 Cálculo de los costes de los equipos.

La estimación del coste base de los equipos se va a llevar a cabo a partir de correlaciones, que dependerán a su vez de diferentes parámetros. De esta forma, se va a utilizar una correlación, en la cual se calcula el coste base de los equipos en función de su capacidad. Esta correlación se define en la siguiente ecuación:

$$\log_{10}(C_{\text{equipo}_a}^{\circ}) = K_1 + K_2 \cdot \log_{10}(A) + K_3 \cdot (\log_{10}(A))^2 \quad (1)$$

Donde:

- $C^{\circ}\text{equipo}_a$: es el coste base de un equipo estándar (*condiciones base*: acero al y para condiciones de 1 bar manométrico de presión, excepto para las bombas en las que se toma como referencia la presión de 10 bar en la impulsión).
- A : es la capacidad o parámetro del tamaño del equipo.
- K_i : son parámetros característicos de cada equipo, los cuales tienen validez en un cierto rango de valores.

Para obtener un cálculo del coste final de adquisición del equipo, es necesario corregir el valor del coste base ($C^{\circ}\text{equipo}_a$) en cuanto a la presión, el material y el tiempo:

Cuando la presión de operación del equipo es distinta a la presión ambiental en condiciones manométricas (1 atm), el valor del coste del equipo se debe corregir aplicando un factor de corrección de presión (F_p), el cual se define en la siguiente ecuación:

$$\log_{10}(F_p) = C_1 + C_2 \cdot \log_{10}(P) + C_3 \cdot (\log_{10}(P))^2 \quad (2)$$

Donde:

- F_p : es un factor de corrección que depende de la presión (el parámetro debe ser >1)
- P : es la presión de operación del equipo (bar).
- C_i : son parámetros característicos del equipo (bar).

En el caso de que los equipos estén contruidos con un material distinto al estándar para ese tipo de equipo (acero al carbono en la gran mayoría), se debe aplicar un factor corrector de material (F_m) característico de cada equipo.

Por otra parte, las tablas de costes no se actualizan anualmente, por lo que pueden quedar obsoletos y para actualizarlos en el año que se realiza la estimación económica, se utilizan los índices de variación de costes.

En el caso de nuestros equipos, se desconoce la presión de operación y el material del que están hechos, por lo que se va a asumir que la presión de operación de los equipos es igual a la presión ambiental (1 atmósfera), y que están fabricados a partir de acero al carbono. Por lo tanto, no hace falta aplicar el factor de corrección de presión y de material.

A continuación, se muestran las tablas utilizadas en el cálculo del coste base de los equipos:

Equipo	Capacidad (A_c)
Aspiradores	Caudal
Bombas	Caudal o potencia
Intercambiadores de calor	Área de intercambio
Colectores de polvo	Caudal
Compresores	Caudal
Cristalizadores	Volumen
Depósitos	Volumen
Desintegradores mecánicos	Potencia y capacidad de producción
Sedimentadores	Superficie libre
Evaporadores	Área de intercambio
Filtros	Superficie de filtración
Mezcladores	Volumen y potencia
Secadores	Superficie de carga
Soplantes	Caudal
Tamizadoras	Superficie de tamizado
Torres	Diámetro
Transportadores y elevadores	Longitud o distancia

Tabla 18. Capacidad característica de cada equipo. [56]

Tabla 4. Coste final del equipo (corrección por P , T y materiales)	
Equipo	Correlación
Intercambiadores de calor, Vasija y bomba	$C_{T,a} = C_{equipos}^0 \cdot F_{BM} = C_{equipos}^0 \cdot (B_1 + B_2 \cdot F_M \cdot F_p)$ (Costes fabricación, preparación y envío)
Compresores y soplantes	$C_{T,a} = C_{equipos}^0 \cdot F_{BM}$
Evaporadores y vaporizadores	$C_{T,a} = C_{equipos}^0 \cdot F_{BM} \cdot F_p$
Ventiladores	$C_{T,a} = C_{equipos}^0 \cdot F_{BM} \cdot F_p$
Calderas y Hornos	$C_{T,a} = C_{equipos}^0 \cdot F_{BM} \cdot F_p \cdot F_T$ $F_T = 1 + 0,00184 \cdot \Delta T - 0,00000335(\Delta T)^2$ Donde: F_T es el factor de sobrecalentamiento en calderas de vapor ΔT = Sobrecalentamiento en °C
Turbinas	$C_{T,a} = C_{equipos}^0 \cdot F_{BM}$
Columnas de plato y separadores de gotas	$C_{T,a} = C_{equipos}^0 \cdot N \cdot F_M \cdot F_q$ $\log_{10} F_q = 0,4771 + 0,08516 \cdot \log_{10} N - 0,3473(\log_{10} N)^2 \text{ si } N < 20$ $F_q = 1 \text{ si } N > 20$ Donde : N es el número de platos F_q es un factor de corrección en C. plato
Columnas de relleno	$C_{T,a} = C_{equipos}^0 \cdot F_{BM}$

Nota: Factores de corrección obtenidos a partir del ANEXO I teniendo en cuenta el equipo

- $C_{equipos}^0$ Coste del equipo calculado mediante correlación o mediante la regla de Williams
- F_{BM} es un factor de corrección que computa el efecto del material
- F_M es un factor de corrección que depende del material de construcción
- F_p es un factor de corrección que depende de la presión
- B_i son parámetros característicos del equipo

Tabla 19. Correlaciones para el cálculo del coste final del equipo. [56]

Para nuestra planta, el horno de fusión se va a tratar como un horno de proceso. De esta forma, para determinar el coste del equipo se va a utilizar la correlación correspondiente a los hornos, asumiendo que el factor de sobrecalentamiento (F_t) es 1 para simplificar los cálculos. En el caso de los hornos, la capacidad característica es la potencia por lo que, como no se ha podido obtener el valor de este parámetro, se ha decidido tomar como referencia la potencia de un horno de fusión similar, que alcanza un valor de 6 MW [59].

Respecto a la máquina conformadora, como el suministrador del equipo no facilita su precio en la página web, y la máquina conformadora no se asemeja a ninguno de los equipos que aparecen en las tablas 18 y 19, se ha optado por establecer su precio basándose en el precio de máquinas similares en el mercado [60].

En cuanto al horno de recocido, ocurre lo mismo que con la máquina conformadora, por lo que se ha decidido determinar su precio a partir del precio de hornos similares disponibles en el mercado [61].

Por último, en el caso de la trituradora de vidrio, se ha decidido equipararla con un compresor centrífugo para el cálculo de su coste base. Esto se debe a que tanto la trituradora de vidrio como un compresor centrífugo realizan un proceso de compresión utilizando la fuerza centrífuga. Mientras que la trituradora utiliza la fuerza centrífuga para reducir el tamaño del vidrio, haciendo girar rápidamente las cuchillas que impactan y pulverizan el material, el compresor la utiliza para aumentar la presión de un fluido. Además, se ha establecido una capacidad de 450 kW como mínimo necesario para poder utilizar los parámetros K_1 , K_2 y K_3 de la tabla de correlaciones.

Por último, se van a indicar los costes finales de cada equipo calculados con las correlaciones y los parámetros mostrados anteriormente. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

EQUIPO	CAPACIDAD	K_1	K_2	K_3	COSTE FINAL (€)
Horno de fusión	6.000 kW	7,3488	-1,1666	0,2028	685.586
Máquina conformadora	-	-	-	-	1.000.000
Horno de recocido	-	-	-	-	60.000
Trituradora	450 kW	2,2891	1,3604	-0,1027	149.820
COSTE TOTAL DE LOS EQUIPOS					1.895.406

Tabla 20. Coste final de cada uno de los equipos.

4.1.2 Cálculo de la inversión de la planta.

Una vez que se han calculado los costes de los equipos, se va a proceder a determinar el coste total de la inversión de la planta, es decir, la suma de todos los gastos necesarios para diseñar, construir y poner en funcionamiento la planta. Para ello, se va a utilizar el método de Chilton, el cual permite calcular los diferentes costes, tales como el coste de tuberías, de instrumentación, auxiliares, de ingeniería, a partir del coste total de los equipos.

En la tabla 19 se puede observar el procedimiento a seguir en el método de Chilton:

Tabla 8. Factores de chilton									
Item	Concepto	Factor	Concepto	Item	Concepto	Factor	Concepto		
1	Coste equipos principales	1	1	7	Líneas exteriores	0- 0,05 0,05-0,15 0,15-0,25	2		
					Unidad Integrada		2		
					Unidad Separada		2		
					Unidad Dispersa		2		
2	Coste equipos instalados	1,4 - 2,20	1	8	Coste Directo Total	Suma conceptos (2 a 7)			
3	Tuberías Planta sólidos Planta mixta Planta fluidos	0,07- 0,10 0,10- 0,30 0,30-0,60	2 2 2	9	Ingeniería y construcción	0,20 - 0,35 0,35-0,50	8		
					Complejidad simple		8		
					Complejidad complicada		8		
4	Instrumentación Poca automatización Algo de automatización Completa automatización	0,02- 0,05 0,05- 0,10 0,10- 0,15	2 2 2	10	Contingencia y beneficio del contratista	0,10-0,20 0,20-0,30 0,30-0,50	8		
					Proceso Completado		8		
					Proceso sujeto a cambios		8		
					Proceso especulativo		8		
5	Edificios y preparación del terreno Planta existente Planta externa Mixta Interna	0 0,05- 0,20 0,20- 0,60 0,60- 1,00	2 2 2 2	11	Factor del tamaño	0-0,05 0,05-0,15 0,15-0,35	8		
					Grande		8		
					Pequeña		8		
					Planta piloto		8		
6	Auxiliares (potencia, vapor, agua) Ninguna extensión Pequeña ampliación Ampliación grande Nuevas extensión	0 0-0,05 0,05-0,25 0,25-1	2 2 2 2	12	Coste indirecto total	Suma conceptos (9 a 11)			
				CTF	Suma conceptos (8+12)				

Tabla 21. Procedimiento del método de Chilton. [56]

En la siguiente tabla, se muestran los costes correspondientes a cada ítem, al cual le corresponde un factor determinado dependiendo de las características de la planta. Por último, se muestra el coste total directo (CDT) e indirecto (CIT) y la suma de ambos, lo que constituye el coste total de inversión de la planta (CTF).

CONCEPTO	ÍTEM	FACTOR (fi)	COSTE (€)
1	Coste de equipos principales	1	1.895.406
2	Coste de equipos instalados	1,8	3.411.730,80
3	Coste de tuberías (planta con sólidos)	0,085	289.997,12
4	Coste de instrumentación (completa automatización)	0,125	426.466,35
5	Edificios y preparación del terreno (planta interna)	0,08	272.938,46
6	Auxiliares (ampliación grande)	0,15	511.759,62
7	Líneas exteriores (unidad separada)	0,10	341.173,08
8	CDT (Coste directo total)	-	5.254.065,43
9	Ingeniería y construcción (complejidad complicada)	0,425	2.232.977,80
10	Contingencia y beneficio del contratista (Proceso sujeto a cambios)	0,25	1.313.016,36
11	Factor de tamaño (grande)	0,025	131.351,64
12	CIT (Coste indirecto total)	-	3.677.342,8
CTF (COSTE TOTAL DE INVERSIÓN)			12.608.754

Tabla 22. Cálculo del coste total de inversión de la planta por el método de Chilton.

El coste total de la inversión calculado es notablemente inferior al coste real, debido principalmente a las simplificaciones que se han hecho a la hora de hacer los cálculos y a la falta de dimensionamiento del resto de equipos que forman parte de la planta, causa por la que no se han tenido en cuenta a la hora de determinar el coste total de los equipos.

4.2. Costes de producción de la planta.

Una vez calculado el coste total de inversión, se va a estimar el coste total de producción (CTP), es decir, la suma de todos los gastos incurridos para fabricar un producto o proporcionar un servicio durante un período específico. Este se define en la siguiente ecuación:

$$CTP = CF + GG \quad (3)$$

Donde:

- CF: son los costes de fabricación, los cuales incluyen los costes variables y los costes fijos de producción. Se estiman como el 80-90% del CTP.
- GG: son los gastos generales de la compañía, los cuales incluyen administración, actividad comercial e investigación y desarrollo (I+D). Se estiman como el 10-20% del CTP.

Para calcular el coste total de producción de la planta, se va a utilizar el siguiente procedimiento de estimación:

Tabla 9.- Items para calcular el coste total de producción de una planta química					
Item	Costes	Valores típicos	Item	Costes	Valores típicos
1	Materias primas	Datos del diagrama del proceso	8	Supervisión	20 % MOD
2	Electricidad, vapor, agua	Según diagrama de proceso (Tabla 10)	9	Dirección en planta	50 % MOD
3	Materiales Auxiliares	100 % Gastos de mantenimiento	10	Cargas de capital	15 % CTF
4	Mantenimiento	5- 10 % Capital fijo (CTF)	11	Seguros	1 % CTF
5	Empaquetado y envío	Despreciable	12	Impuestos locales	2 % CTF
6	Mano de obra directa (MOD)	Según estimaciones (Tabla 11)	13	Royalties	1 % CTF
7	Costes de laboratorio	20 % MOD	Coste de producción directo (DPC)		Suma (1 a 13)
Item	Costes	Valores típicos	Item	Costes	Valores típicos
14	Generales	60% total de materiales auxiliares	17	Seguros	1% CTF
15	G. Administración	2% CTF	18	Recuperación capital	1,098%CTF
16	Impuestos	1% CTF	Coste de producción indirecto (CPI)		Suma (14 a 18)

Tabla 23. Procedimiento estimación para calcular el coste total de producción de una planta química. [56]

Para ello, es necesario determinar el coste de las materias primas, de los utilities y de la mano de obra.

En primer lugar, se va a calcular el coste variable anual de las materias primas (CV), el cual se define en la siguiente ecuación:

$$CV_{consumible,i} = PC_i \cdot P_{consumible,i} \cdot FC \quad (4)$$

Donde:

- PC_i : es el parámetro o unidad de cálculo del consumible i (kg/año).
- $P_{consumible,i}$: es el precio del consumible i (€/año).
- $CV_{consumible,i}$: es el coste variable anual del consumible i (€/año).
- FC : es el factor de capacidad (85%).

Para determinar el coste de las materias primas, se ha empleado un portal en línea especializado en la venta de compuestos químicos, los cuales se comercializan normalmente en unidades de 25 kilogramos. Sin embargo, dado la cantidad de materias primas que se requieren para cumplir con los objetivos de producción, se anticipa una reducción considerable en el precio.

Para los compuestos secundarios, se ha hecho una media entre el precio del sulfato de sodio y el dióxido de manganeso. Asimismo, debido a la indisponibilidad de información sobre el precio del calcín, se ha asumido un valor de 0,2 euros por kilogramo.

A continuación, se muestra el precio y el coste variable anual de cada una de las materias primas:

MATERIA PRIMA	PC (kg/año)	P (€/kg)	CV (€/año)
Óxido de silicio	34.718.800	3,91	115.387.932
Carbonato de sodio	7.438.700	1,23	7.777.161
Carbonato de calcio	4.960.350	0,68	2.867.082
Compuestos secundarios	2.478.350	0,61	1.285.024
Calcín	45.300.150	0,2	7.701.025
COSTE TOTAL MATERIAS PRIMAS			135.018.224

Tabla 24. Coste anual de las materias primas. [57]

En segundo lugar, se va a determinar el coste de los utilities o auxiliares que consume la planta, que son: el gas natural para el horno de fusión y el aire de operación (de alta y baja presión) junto con el aire piloto y el agua de refrigeración para la máquina conformadora (tabla 15).

Para ello, es necesario conocer el precio de los utilities, el cual se puede observar en la tabla 25.

Tabla 10.- Precios de items variables en una planta química			
Item	Precio (\$ ₂₀₀₇ /Unidad _{cálculo})	Item	Precio (\$ ₂₀₀₇ /Unidad _{cálculo})
Combustible		Agua Procesos para	
Carbón	1,07 \$/GJ	Uso	0,067 \$/1000 kg
Fuel-oil	6 \$/GJ	Alimentación caldera a 115°C	2,45 \$/1000 kg
Pet-Coke	0,20 \$/GJ	Consumo humano	0,26 \$/1000 kg
Gas Natural	6 \$/GJ	Desionizada	1 \$/1000 kg
Vapor saturado		Agua de refrigeración (RW) de 5°C a 15 °C	4,43 \$/GJ
Vapor hp (41 barg, 254°C)	16,64 \$/1000 kg		
Vapor mp (10 barg, 184°C)	8,22 \$/1000 kg		
Vapor lp (5 barg, 160°C)	7,78 / 1000 kg		
Electricidad	0,06 \$/kW·h	Agua de enfriamiento (CW) de 30°C a 45 °C	14,8 \$/ 1000 kg
Aire comprimido presurizado		Agua residual	
6 bar	0,49\$/100 Nm ³	A desecho peligroso	200-2000 \$/1 t
3,3 bar	0,35\$/100 Nm ³	A desecho no peligroso	36 \$/1 t
		A tratamiento 1º (filtración)	41 \$/1000 m ³
		A tratamiento 2º (Filtración + lodos)	43 \$/1000 m ³
		A tratamiento 3º (Filtración + lodos+ trat. Químico)	56 \$/1000 m ³

Tabla 25. Precios de los utilities. [56]

El aire de operación de alta y baja presión (3 y 2,2 bar respectivamente) y el aire piloto (3,7 bar) no coinciden con los valores de presión del aire comprimido (3,3 y 6 bar), por lo que se ha decidido tomar como precio de todos ellos el aire comprimido de 3,3 bar.

La cantidad de gas natural que se requiere para llevar a cabo el proceso de fusión se desconoce, por lo que se va a utilizar como dato la cantidad de gas natural consumida por otra planta de producción de envases de vidrio. Esta planta tiene un consumo de gas natural de 35.730.345 Nm³/año, lo que supone un consumo de 425.548.418 kWh/año y un coste de 11.182.770 €/año. Sin embargo, esta empresa tiene una capacidad de producción de 260.000 t/año, mientras que nuestra planta tiene una capacidad de 84.315 t/año, por lo que se estima que nuestro consumo sea de unos 11.596.939 Nm³/año, lo que conlleva un coste de 3.626.443,3 €/año. [62]

De la misma manera, se determina el consumo eléctrico anual de nuestra planta, el cual asciende a 19.142.138,9 kWh/año, es decir, unos 19.142,14 MWh/año aproximadamente, lo que supone un coste de 1.305.968,1 €/año. [62]

A continuación, se muestra el coste anual de los utilities:

UTILITIES	PC (Nm ³ /año)	PC (kg/año)	PC (GJ/año)	P (€/Nm ³)	P (€/GJ)	CV (€/año)
Agua de refrigeración	78.840	78.603.480	-1.248.048	-	3,77	3.999.369,8
Aire de operación de alta presión	13.665.600	-	-	0,003	-	34.847,3
Aire de operación de baja presión	11.563.200	-	-	0,003	-	29.486,2
Aire piloto	630.720	-	-	0,003	-	1.608,4
Gas natural	11.586.939	-	-	-	-	3.626.443,3
Electricidad	19.142.138,9 kWh/año					1.305.968,1
COSTE TOTAL UTILITIES						8.997.723,1

Tabla 26. Coste anual de los utilities.

Por último, se va a estimar la mano de obra directa (M.O.D) necesaria para la planta, es decir, el coste de los trabajadores que están directamente involucrados en la fabricación de un producto o en la prestación de un servicio. Para ello, se va a utilizar la siguiente ecuación:

$$M.O.D = \sum(N_{op,i} \cdot Eq_i) \cdot Sal \cdot t_{op} \cdot FC \quad (5)$$

Donde:

- $N_{op,i}$: es el número total de operarios necesarios en cada equipo (tabla 26).
- Eq_i : es el número de equipos i en la planta.
- Sal : es el salario del operario o supervisor, el cual se estima un valor de 21,74 €/ h.

El número total de operarios necesarios en cada equipo se obtiene a partir de la tabla 27.

Tabla 11.- Estimación de número de operarios en función del equipamiento			
Equipo	Operario/unidad	Equipo	Operario/unidad
Bombas y compresores	0,1 – 0,2	Filtros a vacío	0,125 – 0,25
Separador Centrifugo	0,25 – 0,5	Filtros	1
Cristalizador mecánico	0,16	Intercambiadores de calor	0,1
Secador rotativo	0,5	Torres (incluidos auxiliares)	0,2 – 0,5
Spray dryer	1	Reactores tipo batch	1
Evaporador	0,25	Reactores continuos	0,5
Vasijas y tanques	0,2 – 0,5	Hornos	0,5

Tabla 27. Parámetros específicos de cada equipo para la estimación de operarios. [56]

Para calcular la mano de obra directa, se va a tratar al horno de recocido y a la máquina conformadora como hornos.

A partir de la ecuación anterior, se determina que el coste asociado a los operarios y/o supervisores asciende a 267.095,47 €/año. Esta cifra está significativamente por debajo de la real ya que, a la hora de determinar su valor, no se ha tenido en cuenta el resto de equipos que integran la planta.

Una vez calculado los costes anuales asociados a las materias primas, los utilities y la mano de obra, se va a proceder a calcular el coste anual de producción de la planta, a partir de los costes específicos de cada ítem (tabla 23).

De esta manera, en la tabla 28 se muestran los costes totales de producción directo (CPD) e indirecto (CPI), los cuales son semejantes a los costes de fabricación y los gastos generales, y la suma de ambos, constituye el coste total de producción anual de la planta.

CONCEPTO	ÍTEM	FACTOR (fi)	COSTE (€)
1	Materias primas	-	135.018.224
2	Utilities	-	8.997.723,1
3	Materiales auxiliares	1	945.656,6
4	Mantenimiento	0,075	945.656,6
5	Empaquetado y envío	-	-
6	Mano de obra directa (M.O.D)	-	267.095,5
7	Costes de laboratorio	0,2	53.419,1
8	Supervisión	0,2	53.419,1
9	Dirección en planta	0,5	133.547,8
10	Cargas de capital	0,15	1.891.313,1
11	Seguros	0,01	126.087,5
12	Impuestos locales	0,02	252.175,1
13	Royalties	0,01	126.087,5
-	CPD (Coste de producción directo)	-	148.810.405
14	Generales	0,6	567.394
15	Gastos de Administración	0,02	252.175,1
16	Impuestos	0,01	126.087,5
17	Seguros	0,01	126.087,5
18	Recuperación de capital	0,01098	138.444,1
-	CPI (Coste de producción indirecto)	-	1.210.188,2
COSTE TOTAL DE PRODUCCIÓN			150.020.593,2

Tabla 28. Cálculo del coste total de producción anual de la planta.

Los costes totales de producción calculados son inferiores a los costes reales, debido a la inexactitud en el cálculo del coste total de inversión, como ya se comentó en el apartado anterior. Aun así, el coste total de producción también es posible que se vea afectado por la adquisición de equipos auxiliares adicionales para la preparación de los compuestos involucrados en el proceso y su correspondiente mantenimiento, y por los costes asociados a la mano de obra, ya que es posible que se requiera más personal del previsto inicialmente.

4.3. Análisis rentabilidad económica de la inversión de la planta.

En este apartado, se va a realizar un análisis de la viabilidad económica de la inversión de la planta, sabiendo que los valores difieren notablemente de los reales debido a las simplificaciones que se han tomado.

Para ello, se va a determinar el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), que son dos métodos ampliamente utilizados en la evaluación de proyectos de inversión. Ambos se basan en los flujos de caja proyectados, pero se diferencian en cómo se utilizan y qué información proporcionan. El VAN mide el valor absoluto añadido por el proyecto, mientras que la TIR mide la eficiencia relativa del proyecto en términos de tasa de retorno.

Por un lado, el VAN es valor presente de los flujos de caja netos esperados de un proyecto, descontados a una tasa de descuento específica (a menudo el coste de capital o una tasa de retorno requerida), menos la inversión inicial.

Respecto a las ventajas que ofrece, el VAN considera el valor temporal del dinero y proporciona una medida absoluta de cuánto valor se espera que añada el proyecto. Sin embargo, requiere una estimación precisa de la tasa de descuento y no proporciona una medida relativa de rentabilidad (proporcional al tamaño de la inversión).

El Valor Actual Neto se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$VAN = -A + \sum_{i=1}^N \frac{CF_i}{(1+k)^i} \quad (6)$$

Donde:

- A : es el coste de inversión de la planta en el año 0 (tabla 22).
- CF_i : es el flujo de caja en el año i .
- k : es la tasa de descuento, la cual se toma un valor general del 10%.
- N : es la vida útil de la planta, la cual estima un valor de 25 años.

El valor obtenido del VAN se puede interpretar de la siguiente manera:

- Un valor positivo indica que el proyecto se espera que genere más valor del coste del capital invertido, y por tanto, se considera una buena inversión.
- Un valor negativo sugiere que el proyecto no generará suficiente valor para cubrir el coste del capital, y por lo tanto, debería rechazarse.

Los flujos de caja (CF_i) se obtienen a partir del siguiente procedimiento:

- Se suman las entradas de dinero de la empresa. En este caso, las entradas sería la venta de botellas de vidrio, cuyo valor se ha calculado con la ecuación (4) y se muestra en la tabla 29.
- Se suman las salidas de dinero, como los costes fijos y los costes variables asociados a los costes de producción, junto a las amortizaciones de los equipos, el cual supondrá un valor del 10% de los equipos durante 10 años, puesto que se utiliza la amortización lineal.
- La diferencia entre entradas y salidas de dinero es el Beneficio antes de Impuestos (BAI), al cual se le impondrá una tasa impositiva del 25% para obtener el Beneficio Neto (BN).
- Para finalizar, se suman las amortizaciones y se obtienen los flujos de caja, los cuales serán iguales para los años 1-10 y 11-25.

PRODUCTO	PC (botellas/año)	P (€/botella)	INGRESOS VENTAS ANUALES(€/año)
Botellas de vidrio	365..000.000.	0,45	164.250.000

Tabla 29. Ingresos por ventas anuales de la planta. [58]

A continuación, se van a mostrar los flujos de caja y posteriormente se va a calcular el VAN de la inversión.

AÑO	1-10	11-25
Entradas (€)	164.250.000	164.250.000
Costes fijos (€)	-	-
Costes producción (€)	150.020.593,2	150.020.593,2
Amortizaciones (€)	1.895.406	0
BAI (€)	12.334.000,8	14.229.406,8
BN (€)	9.250.500,6	10.672.055,1
Amortizaciones (€)	1.895.406	0
CF_i (€)	11.145.906,6	10.672.055,1

Tabla 30. Flujos de caja asociados a la inversión de la planta.

A partir de los flujos de caja y la inversión inicial (12.608.754 €), se obtiene un VAN de 87.173.529 €, el cual nos da una alta rentabilidad de la planta a largo plazo y observando los flujos de caja se observa que también a corto plazo, por lo que se deduce que la planta es viable económicamente.

Por otro lado, la Tasa Interna de Retorno es la tasa de descuento que hace que el VAN de los flujos de caja esperados de un proyecto sea igual a cero.

En cuanto a sus ventajas, no requiere una estimación previa de la tasa de descuento y proporciona una tasa de retorno relativa que puede compararse fácilmente con el coste del capital o con la TIR de otros proyectos. Sin embargo, puede ser difícil de calcular para proyectos con flujos de caja no convencionales (donde los flujos cambian de signo más de una vez). Tampoco considera siempre el tamaño del proyecto, lo que puede llevar a preferir proyectos menos rentables en términos absolutos pero con una mayor TIR.

El valor obtenido de la TIR se puede interpretar de la siguiente forma:

- Si la TIR es mayor que el coste del capital, el proyecto se considera una buena inversión, ya que se espera que genere una tasa de retorno superior al coste del capital.
- Si la TIR es menor que el coste del capital, el proyecto no es viable.

A partir de la ecuación 6 (VAN=0), se obtiene una Tasa Interna de Retorno del 88,39%, lo que indica que la tasa de retorno esperada del proyecto es significativamente superior a la tasa de descuento del 10%. De esta forma, la TIR es mucho más alta que el coste del capital, lo que hace que sea un proyecto viable económicamente.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1]<https://johnnybrash.com/index.php/component/content/article/the-history-of-lampworking-from-ancient-egypt-to-modern-day-studios?catid=9&Itemid=101> [En línea, 13/11/2023]
- [2]<https://www.archdaily.cl/cl/915307/infografia-la-evolucion-del-vidrio> [En línea, 13/11/2023]
- [3]http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/137/html/sec_5.html [En línea, 13/11/2023]
- [4]<https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-909351985-jarra-de-vidrio-sodico-calcico-con-tapa-de-pp-blanca-18ml- JM> [En línea, 26/11/2023]
- [5] <https://www.thinkformarchitects.com/project/mri-at-e-orange/> [En línea, 26/11/2023]
- [6] <https://borofertil.com/vidrio/> [En línea, 26/11/2023]
- [7]<https://www.micquartz.com/quartz-glass-products/quartz-tubes/large-diameter-gas-refining-silicon-glass-tubing/> [En línea, 27/11/2023]
- [8]<https://techcrunch.com/2014/10/06/apple-sapphire-supplier-gt-advanced-technologies-files-for-bankruptcy/> [En línea, 26/11/2023]
- [9] <https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:BlowblowAllSteps.png> [En línea, 28/11/2023]
- [10]<https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2023/04/trabajo-del-vidrio-manufactura.html> [En línea, 28/11/2023]
- [11] <https://mymodernmet.com/es/arte-vidrio-soplado/> [En línea, 28/11/2023]
- [12]<https://es.slideshare.net/240654/envases-de-alimentos-capitulo-3-envases-de-vidrio> [En línea, 02/12/2023]
- [13]<https://mesurex.com/control-de-temperatura-en-la-fabricacion-de-vidrio-flotado/> [En línea, 03/12/2023]
- [14] <https://tecnoalex.weebly.com/vidrio.html> [En línea, 03/12/2023]
- [15]<https://gfrprebartechology.com/preguntas-frecuentes-que-es-gfrp/> [En línea, 03/12/2023]
- [16] <https://es.aliexpress.com/item/1005005521109184.html> [En línea, 02/12/2023]
- [17]<https://www.glassmanufacturerchina.com/es/products/High-safety-transparent-15-15-15mm-black-silk-screen-printing-laminated-glass-flooring.html> [En línea, 05/12/2023]
- [18]<https://www.cristel.com.mx/blog/cristal-templado-vs-laminado-diferencias-cual-es-mas-seguro> [En línea, 03/12/2023]

- [19] <https://www.socimisilicius.com/actualidad/silicius-alquila-totalidad-edificio-oficinas-al-despacho-de-abogados-arriaga-asociados/> [En línea, 07/12/2023]
- [20] <https://www.megaglass.com.mx/es/cristal-insulado.php> [En línea, 12/01/2024]
- [21] <https://archello.com/story/50253/attachments/photos-videos/3> [En línea, 12/01/2024]
- [22] <https://www.pinterest.es/pin/99642210490286822/> [En línea, 12/01/2024]
- [23] <https://es.statista.com/estadisticas/502035/numero-de-empresas-fabricantes-de-vidrio-y-productos-de-vidrio-en-espana/> [En línea, 14/01/2024]
- [24] Anfevi Vidrio España. (2022). Contribución económica, ambiental y social del sector del vidrio en España. http://www.anfevi.com/wpcontent/uploads/2023/05/VidrioEsp_ECircular_Balance2022-2_compressed-1.pdf
- [25] https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry_Graph.aspx?nvpm=3%7c724%7c%7c%7c%7c70%7c%7c%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c2 [En línea, 23/01/2024]
- [26] <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios> [En línea, 24/01/2024]
- [27] <https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/ejes-sostenibilidad/medio-ambiente/economia-circular/index.cshtml> [En línea, 24/01/2024]
- [28] <https://rimsa.com/news/rethinking-the-use-of-glass/> [En línea, 24/01/2024]
- [29] <https://www.barcelonesa.com/es/blog/grup-barcelonesa-amplia-su-oferta-de-silica-precipitada/> [En línea, 24/01/2024]
- [30] <https://www.janjihatiiu.shop/carbonato-de-sodio-c-11654/la-utilidad-del-carbonato-de-sodio-denso-en-la-industria-p-4273965> [En línea, 24/01/2024]
- [31] https://www.nazza.es/productos-quimicos/209-carbonato-calcio.html#/53-formato-25_kg [En línea, 03/02/2024]
- [32] <https://vidriointustria.blogspot.com/> [En línea, 03/02/2024]
- [33] <https://rclemente.net/es/proceso-de-fabricacion-del-vidrio/> [En línea, 04/02/2024]
- [34] Mathieu Hubert. (2015) IMI-NFG Course on Processing in Glass. Lecture 3: Basics of industrial glass melting furnaces. CelSian Glass & Solar. (https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture03_Hubert_industglass_meltfurnaces.pdf)
- [35] <https://docplayer.es/57728902-El-vidrio-es-un-material-inorganico-duro-fragil-transparente-y-amorfo-y-es-producido-por-el-hombre.html> [En línea, 07/02/2024]

[36] Ministerio de Medio Ambiente (España). (2004). Prevención y control integrados de la contaminación (IPPC). Documento de referencia de las Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Fabricación de Vidrio.

([https://prtres.es/data/images/BREF%20Vidrio%20\(versi%C3%B3n%20en%20castellano-9C4517898920EB18.pdf](https://prtres.es/data/images/BREF%20Vidrio%20(versi%C3%B3n%20en%20castellano-9C4517898920EB18.pdf))

[37] Ministerio de Medio Ambiente. (2007). Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del Sector de la Fabricación del Vidrio.

(<https://prtr-es.es/data/images/gu%C3%ADa-mtd-en-espa%C3%B1a-sector-vidrio.pdf>)

[38] <https://imvlda.com/es/areas-de-negocio-es/vidrio/> [En línea, 13/02/2024]

[39] <https://visiontir.com/temperature-control-in-float-glass-manufacturing/> [En línea, 07/02/2024]

[40] <https://www.mskcovertech.es/soluciones/sistemas-paletizado/paletizadoras-bebidas/> [En línea, 07/02/2024]

[41] <https://es.scribd.com/document/250484610/Composicion-y-Tipos-de-Vidrio> [En línea, 07/02/2024]

[42] Vidrala. (2022). Catálogo de botellas de vidrio para cerveza (APOLO 33 CL).

(https://www.vidrala.com/default/documentos/sheets/55-Cervezas-apollo_33_cl-Topacio-es-M_01.pdf)

[43] Camilo José Olmo López. (2018). Trabajo fin de máster: Diseño de botella para el envasado de aceite y estudio del grupo de moldes para su fabricación por soplado de vidrio. Universidad Politécnica de Valencia.

(<https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/111737/Olmo%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20una%20botella%20para%20el%20envasado%20de%20aceite%20y%20estudio%20del%20grupo%20de%20moldes%20para%20su%20fab....pdf?sequence=1&isAllowed=y>)

[44] Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. (1996). La industria del vidrio y el medio ambiente: Evolución, obligaciones y oportunidades.

(<https://boletines.secv.es/upload/199635155.pdf>)

[45] Maria Fiorella Marinelli; Anabelle Mendez; Eglinsó Mendez. (2016). Proceso de fabricación del vidrio. Asignatura: Principios y Procesos Químicos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ing. Industrial.

(<https://ppqujap.files.wordpress.com/2016/05/proceso-de-fabricacion-del-vidrio.pdf>)

[46] <https://es.scribd.com/document/469729484/Diagramas-de-proceso-de-fabricacion-de-botellas-de-vidrio> [En línea, 28/02/2024]

[47] Carlos Pérez Torrejón. (2006). Trabajo fin de grado: Planta para la fabricación de envases de vidrio. Tratamiento del agua de proceso. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla.

(<https://idus.us.es/handle/11441/97688?locale-attribute=en>)

[48] <https://triplenlace.com/2013/02/04/quimica-del-vidrio/> [En línea, 13/03/2024]

[49] <https://es.wikipedia.org/wiki/Vidrio> [En línea, 13/03/2024]

[50] <https://www.lenntech.es/library/glass.htm> [En línea, 19/03/2024]

[51] <https://www.coparm.es/trituradoras/trituradora-serie-tr100/> [En línea, 24/03/2024]

[52] <https://spanish.sunnyfurnace.com/sale-12875456-mesh-belt-electric-horizontal-glass-decorating-furnace.html> [En línea, 28/03/2024]

[53] https://www.alibaba.com/product-detail/Beer-bottle-processing-line-glass-bottle_1600974944103.html?spm=a2700.shop_plgr.41413.63.2306222a31HqQ0 [En línea, 08/04/2024]

[54] https://www.heyinternational.com/fileadmin/user_upload/Bilder/1_HiPERFORM/6_Datenblaetter_Flyer/SpeedLine_01-2023_web.pdf [En línea, 13/04/2024]

[55] <https://spanish.electricannealingfurnace.com/sale-29677568-annealing-plant-lehr.html> [En línea, 13/04/2024]

[56] Apuntes Tema 11 “Análisis económico de procesos químicos” de la asignatura Ingeniería de Procesos. Ingeniería química, Universidad de Sevilla.

[57] <https://www.vadequimica.com/vadefood/silica-mfilalimentaria.html#2fe4/fullscreen/m=and&q=sil> [En línea, 24/04/2024]

[58] <https://www.cerveseradosona.com/envasado-botella/155-pack-100-botellas-marron-330-ml-tapon-corona-26.html> [En línea, 07/05/2024]

[59] https://www.alibaba.com/product-detail/Aluminum-Melting-Furnace-Glass-Furnace-A_62008639642.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.4f8d2400VxOsm9&s=p [En línea, 09/05/2024]

[60] https://www.alibaba.com/product-detail/glass-bottle-making-machine-production-line_1600439465114.html?spm=a2700.details.you_may_like.2.691478b5i7yQYe [En línea, 09/05/2024]

[61] https://www.alibaba.com/product-detail/Annealing-Lehr_60558190160.html [En línea, 09/05/2024]

[62] Luis Enrique Carrión Domenech. (2016). Trabajo fin de grado: Optimización energética de una empresa de producción de envases de vidrio para alimentación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Valencia.