



**DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR Y
ESTUDIO TECNICO-ECONÓMICO DE CONSUMO
DE ENERGÍA DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN
PARA TEMPLE DE VIRIO.**

José Hely Flórez Bustamante

Universidad EAN
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Procesos
Bogotá, Colombia
2022

**DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR Y
ESTUDIO TECNICO-ECONÓMICO DE CONSUMO
DE ENERGÍA DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN PARA TEMPLE DE VIDRIO.**

José Hely Flórez Bustamante

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:

Magister en Ingeniería de Procesos

Director:

Prof. Dr. Jeffrey León Pulido.

Modalidad:

Trabajo Dirigido

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Procesos

Bogotá, Colombia

2022

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá D.C.

Resumen

El entorno del ser humano se transformó desde la concepción del vidrio como elemento fundamental de su cotidianidad y su arquitectura, convirtiéndose en el elemento más usado para adecuar sus espacios, por lo que su uso se ha intensificado y por consiguiente sus impactos al medio ambiente. Aunque su principal ventaja es que sus componentes permiten que pueda ser reciclado tantas veces se desee, sin perder ninguna de sus cualidades, el excesivo consumo de energía que se requiere para su fabricación lo ha convertido en uno de los mayores generadores de CO₂. La generación de energías limpias está permitiendo reducir este impacto, pero debemos continuar con la mejora en los procesos que conlleven a optimizar el uso de la energía y esto no solo se debe hacer en la fabricación de vidrio, sino ir más allá y continuar con sus procesos de transformación.

Aunque su incidencia en el consumo de energía es mucho menor, los procesos de transformación y temple de vidrio deben ser estudiados más a profundidad, ya que la literatura es poca y no se tienen claros los impactos al medio ambiente que pueden llegar a generar, y, por otra parte, equipos como los hornos de radiación para temple de vidrio, tienen elevados consumos de energía, lo que impacta directamente en el costo del producto. La simulación es una herramienta importante que pueda apoyar el estudio de estos procesos para lograr comprender mejor los desempeños y dotar a los involucrados de información vital para la toma de decisiones. Se desarrolló una investigación cualitativa-cuantitativa, que permitió el diseño de una planta de procesos de vidrio templado, permitiendo establecer un consumo óptimo de 42.965, 538 kwh, en contraste con los consumos que están presentando este tipo de plantas de 64.663,92 kwh, lo que permite concluir que existen desviaciones importantes en sus procesos y especialmente en la eficiencia de carga en sus hornos de templado de vidrio.

Palabras clave:

Simulación, proceso vidrio templado, proceso, transformación, energía.

Abstract

The environment of the human being was transformed from the conception of glass as a fundamental element of their daily life and their architecture, becoming the most used element to adapt their spaces, for which its use has intensified and consequently its impacts on the environment. Although its main advantage is that its components allow it to be recycled as many times as desired, without losing any of its qualities, the excessive energy consumption required for its manufacture has made it one of the largest generators of CO₂. The generation of clean energy is making it possible to reduce this impact, but we must continue to improve the processes that lead to optimizing the use of energy and this must not only be done in the manufacture of glass but go further and continue with its transformation processes.

Although their impact on energy consumption is much lower, the glass transformation and tempering processes should be studied more in depth, since the literature is scarce and the impacts on the environment that they can generate are not clear, and on the other hand, equipment such as radiation furnaces for glass tempering have high energy consumption, which directly impacts the cost of the product. Simulation is an important tool that can support the study of these processes in order to better understand performance and provide those involved with vital information for decision making. Qualitative-quantitative research was developed, which made it possible to design a tempered glass process plant, allowing to establish an optimal consumption of 42,965.538 kWh, in contrast to the consumption that this type of plant is presenting of 64,663.92 kWh, which allows us to conclude that they are presenting important deviations in their processes and especially in the loading efficiency in their glass tempering furnaces.

Keywords:

Simulation, tempered glass process, process, transformation, energy.

Tabla de Contenido

	Pág.
Lista de figuras	9
Lista de tablas	10
TABLA DE CONTENIDO.....	6
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	12
1.1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.2. OBJETIVOS.....	15
1.2.1. Objetivo General.....	15
1.2.2. Objetivos Específicos.....	15
1.3. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE.....	16
1.4. ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	18
2. ESTADO DEL ARTE.....	20
2.1 VIDRIO.....	20
2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS VIDRIOS.....	21
2.2.1. Vidrios Sodio-Calcio.....	21
2.2.2. Vidrio Plomado.....	21
2.2.3 Vidrio Borosilicato.....	22
2.2.4 Vidrios Especiales.....	22
2.3 TIPOS DE PROCESOS DE PRODUCCIÓN.....	23
2.3.1 Formación por Soplado Automático.....	24
2.3.2. Formación por Laminado.....	25
2.3.3. Formación por Frotación Sobre Baño de Estaño.....	26
2.3.4. Procesos de Transformación y Temple.....	28

2.4.	RESIDUOS ASOCIADOS A LA INDUSTRIA	30
2.4.1	Emisiones de los Procesos de Fusión	30
2.4.2	Casco de Vidrio	32
2.4.3	Sedimento de Vidrio	33
2.4.4	Icopor.....	34
2.4.5	Agua	35
2.5	CONSUMO DE ENERGÍA.....	36
2.6	HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA EL DISEÑO	39
2.7	NORMATIVAS	42
2.7.1	Nacionales	42
2.7.2	Internacionales	43
2.8	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	47
3	METODOLOGÍA	48
3.1	METODOLOGÍA DEL PROYECTO	48
3.2	SIMULACIÓN DE PROCESOS EN SUPERPRO DESIGNER.....	50
3.3.	IDENTIFICACIÓN	52
3.3.1.	Proceso de Corte de Lámina.....	53
3.3.2	Proceso de Biselado de Vidrio	54
3.3.3.	Proceso de Perforado	56
3.3.4.	Proceso de Lavado de Vidrio	58
3.3.5.	Proceso de Temple de Vidrio	59
3.4	VARIABLES DE PROCESO	60
3.5	SET DE LA SIMULACIÓN.....	64
3.6	MODELO TERMODINÁMICO	68
3.7	DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO.....	71
3.8	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	72

4.1	DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN.....	73
4.2	ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO.....	78
4.3	ESTUDIO ENERGÉTICO.	88
4.4	ANÁLISIS Y RESULTADOS	93
4.5	PROYECTO DE INTERVENCIÓN	98
4.6	CONCLUSIONES.....	100
4.7	ESTUDIOS FUTUROS.....	103
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Estructura del proyecto.	19
Figura 2: Formación de vidrio por soplado automático.	25
Figura 3: Formación de vidrio por laminado.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4: Esquema horno para producción de vidrio flotado.	27
Figura 5: Diagrama de proceso temple de vidrio.	28
Figura 6: Diagrama de proceso transformación de vidrio DVH y laminado.	29
Figura 7: Casco de vidrio.	32
Figura 8: Sedimento de vidrio proceso de biselado.	34
Figura 9: Icopor para separación de láminas de vidrio.	35
Figura 10: Agua proceso de lavado de vidrio.	36
Figura 11: Temperatura de pieza de vidrio	38
Figura 12: Desarrollo metodológico.	49
Figura 13: Optimización lámina mesa corte.	54
Figura 14: Pulido de vidrio	56
Figura 15: Plano de vidrio.	57
Figura 16: Lavadora vertical para vidrio.	58
Figura 17: Horno de temple de vidrio.	60
Figura 18: Set de la simulación.	66
Figura 19: Diagrama de flujo de proceso mecanizado y temple de vidrio.	71
Figura 20: Simulación del proceso en SuperPro Designer.	76
Figura 21: Distribución de planta sugerida.	82
Figura 22: Punto de equilibrio.	88
figura 23: Potencia por operación unitaria y consumo por entidad.	89
Figura 24: Punto de equilibrio para dos turnos	96
Figura 25: Mediciones de consumo de energía.	98
Figura 26: Cronograma de intervención	99

Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 1: Composición del vidrio de acuerdo a porcentaje de componentes.	23
Tabla 2: Emisiones proceso de fabricación.	31
Tabla 3: Programas de simulación.	40
Tabla 4: Operaciones y equipos disponibles SuperPro	51
Tabla 5: Potencia de equipos para procesamiento de vidrio.	62
Tabla 6: Entradas y salidas del proceso	63
Tabla 7: Relación del personal que interviene en el proceso	64
Tabla 8: Variables proceso para simulación en SuperPro Designer.	73
Tabla 9: Composición del material para ingreso al SuperPro Designer.	74
Tabla 10: Composición del vidrio.	75
Tabla 11: Entradas a proceso de corte.	75
Tabla 12: Corrientes del proceso.	77
Tabla 13: Salidas de proceso en SuperPro Designer.	78
Tabla 14: Producción vidrio anual.	78
Tabla 15: Maquinaria para el desarrollo del proceso.	79
Tabla 16: Costos equipos de apoyo.	80
Tabla 17: Inversión.	83
Tabla 18: Gastos de nómina para el primer año.	84
Tabla 19: Gastos fijos presupuestados.	85
Tabla 20: Amortización crédito.	86
Tabla 21: Estados financieros proyectados.	86
Tabla 22: Costo de energía por operación unitaria de acuerdo a simulación.	90
Tabla 23: Eficiencia de carga en horno.	91
Tabla 24: Costo de energía mensual de acuerdo a eficiencia de carga.	92
Tabla 25: Nómina para 2 turnos de trabajo.	93

Tabla 26: Costos fijos para incluir segundo turno.	94
Tabla 27: Resultados financieros para dos turnos.....	94
Tabla 28: Medición y costos de energía en planta de producción.	97

1. Introducción y Objetivos del Proyecto

1.1. Introducción

En la convención climática de París en 2015, los países participantes acordaron ahondar esfuerzos para reducir los gases de efecto invernadero causantes del cambio climático, con el fin de que la temperatura promedio global no aumentara más de 1,5 grados en comparación con los niveles presentados en épocas preindustriales. (Unidas, Acuerdo de Paris, 2015). El cambio climático y el calentamiento global son ampliamente señalados como las principales preocupaciones para la supervivencia de los seres vivos en el planeta. Como las actividades ambientales y económicas han coexistido desde el inicio de la historia de la tierra, las acciones de desarrollo industrial han exacerbado profundamente al medio ambiente al aumentar las emisiones de CO₂ por falta de iniciativas adecuadas. (Rahman Mohammad Mafizur, 2021)

Los sistemas energéticos actuales para la producción de vidrio todavía dependen en gran medida de la combustión de combustibles como el carbón, aceite mineral o gas natural. (Fiehl Marcel, 2017) por lo tanto, la reducción de consumo de energía en la industria del vidrio plantea un gran desafío para cumplir con los objetivos de reducción de CO₂ del Acuerdo Climático de París. Para abordar el desafío de descarbonizar la industria del vidrio, en primer lugar, se debe realizar un inventario de los productos, procesos y tecnologías aplicadas en términos de eficiencia energética y emisiones de CO₂ (Guy, 1996) y En segundo lugar, cambios estructurales en la industria, un alejamiento de las industrias intensivas en energía hacia industrias no intensivas que incluyan servicios y cambio de combustible tales como el carbón y el petróleo a gas natural. (Griffin Paul, 2021)

Debido a la alta proporción de emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, la fusión eléctrica y la combustión de hidrógeno o una combinación de ambas, son las opciones más prometedoras para descarbonizar la industria del vidrio, pero se necesitan más investigaciones, ajustes de diseño y mejoras de procesos. (Canciano Fernandez, 2020)

Además, los precios de la electricidad tienen que bajar o los combustibles fósiles deben encarecerse. y las respectivas infraestructuras deben construirse o ajustarse. Varias opciones de recuperación de calor tienen un gran potencial para ahorrar CO₂, pero pueden ser técnicamente desafiantes y aún no se han considerado por razones tecno-económicas. (Michael Zier, A Review of Decarbonization Options of the Glass Industry, 2021)

En un esfuerzo por determinar los niveles de contaminación, reducir las emisiones y la demanda de energía primaria en la industria del vidrio se realizaron varios estudios y se registró el consumo medio de energía y las emisiones de CO₂ de los envases de vidrio, vidrio plano, vidrio doméstico, vidrio especial, fibras de vidrio de filamento continuo y lana de vidrio para diferentes países de Europa. (Harn Wei Kua, 2016) determinándose el consumo de combustible, así como la composición de los combustibles. Además, alrededor del 75% al 85% de los requisitos energéticos totales para producir vidrio se requieren cuando las materias primas se calientan en el horno a más de 1.500°C, durante este proceso surgen grandes volúmenes de emisiones, siendo las industrias de envases y vidrio plano que representan el 80% de la producción total de vidrio, las de mayor emisión con más de 60 millones de toneladas al año. (Furszifer Del Rio Dylan, 2022)

China es el mayor productor de vidrio en el mundo, con más del 50 por ciento de la producción mundial de vidrio plano para el 2010. Aunque la tasa de consumo de energía ha reducido significativamente, el consumo total de energía de la industria del vidrio siguió aumentando considerablemente, debido al alto crecimiento de la producción, que fue de solo 19,35 millones de toneladas en 2005, y aumentó a 29,1 y 33,0 millones de toneladas en 2009 y 2010, respectivamente. (Zhiwei Li, 2014). Para este año, en Estados Unidos existían 33 líneas de flotado de vidrio mientras que el país asiático ya cotaba con 150 líneas de flotación de vidrio. (James, 2010)

Por otra parte, con el crecimiento proyectado de la energía fotovoltaica, la demanda de vidrio para la industria solar superará con creces el suministro actual, y se tendrán que construir miles de nuevas plantas de vidrio flotado para satisfacer sus necesidades durante

los próximos 20 años. (Energética, 2021) Tal expansión brindará una oportunidad para que la industria solar obtenga productos mejor adaptado a sus necesidades, como vidrio de bajo contenido de hierro y vidrio borosilicato al precio más bajo posible. Si bien no existen obstáculos tecnológicos importantes que impidan que la industria del vidrio plano pueda satisfacer las necesidades proyectadas de la industria solar, para hacerlo requerirá una planificación anticipada e innumerables inversiones. (Keith Burrows, 2014)

Un proceso adicional que se le realizar al vidrio y en el cual, el consumo de energía también es significativo corresponde al proceso de temple, el cual se produce mediante el procesamiento de vidrio flotado recocido por calentamiento y posterior enfriamiento para generar tensiones cerca de la superficie equilibradas por tensiones de tracción en el centro. (Nielsen Jens T. K., 2021) Básicamente es un proceso térmico que consiste en un enfriado muy rápido de un vidrio que está a una alta temperatura (alrededor de los 600°C), por medio de chorros de aire. Debido a este proceso se generan esfuerzos de compresión residuales en la superficie para evitar fracturas tempranas causadas por defectos superficiales. (Cossavella M, 2008) Como resultado de este tratamiento adicional, el vidrio suele ser de cuatro a cinco veces más resistente. Es ampliamente utilizado en la envolvente del edificio, en ventanas y fachadas, en sistemas interiores como puertas de edificios, debido a su alta resistencia a la tensión (Harn Wei Kua, 2016).

Este estudio integra todos los procesos necesarios para la transformación y temple de vidrio, obedeciendo a distribuciones de plantas similares con los mismos procesos productivos, permitiéndonos posteriormente poder realizar la simulación de una planta de producción de vidrio templado con el programa SuperPro Designer ®. y de esta manera poder comparar el proceso y establecer mejoras para optimización del consumo de energía, que será el punto de partida para el desarrollo de un estudio técnico económico que permitirá establecer la viabilidad de proyectos similares.

1.2. Objetivos

1.2.1. *Objetivo General*

Realizar un diseño conceptual de una planta de procesos para la producción de vidrio templado asistido por computadora por medio del SuperPro Designer ®. para su evaluación técnica y financiera, desde una perspectiva de consumo de energía

1.2.2. *Objetivos Específicos*

- Identificar los diferentes procesos de producción de vidrio, sus variables de proceso, ventajas y desventajas.
- Simular una planta de procesamiento de vidrio templado, las variables de proceso, balances de materia y energía.
- Plantear un estudio técnico-económico del proceso de producción.
- Realizar una evaluación energética del proceso.

1.3. Justificación y Alcance

La forma en que una sociedad se apropia, transforma y desecha la energía refleja su interacción con la naturaleza. (Martinez Viviana, 2019) La energía desempeña un papel fundamental en el desarrollo de los sectores productivos cuya utilización debería realizarse con elevada eficiencia, bajo impacto medioambiental y menor costo posible, esto es cada vez más importante, ya que el consumo energético se ha incrementado con la producción de bienes y servicios (Portillo Ramos, Segura, & Florez Marulanda, 2020) En una situación actual tan cambiante, en la que se están implementando estrategias de desarrollo sostenible, las empresas deben adaptarse a un entorno regulatorio más estricto, y las fábricas que consumen mucha energía y no pueden reducir eficazmente su consumo, están condenadas a desaparecer. (Ming Liu. Xuenan Yang, 2019). Por lo anterior, la mejora de procesos debe ir encaminada a optimizar el uso de la energía, y las industrias que tienen como fin el procesamiento de vidrio no son la excepción. (Harn Wei Kua, 2016)

Colombia se encuentra dentro de un grupo de países en desarrollo que enfrentan nuevos desafíos en la demanda energética debido a los fenómenos climáticos, los cambios tecnológicos y el uso creciente de energías renovables. (Nieves J.A, 2018). El país se ha comprometido a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% para el 2030 en la COP21. Una política es la ley de energías renovables lanzada en 2014 que busca promover el desarrollo y uso de fuentes de energía no convencionales con incentivos indirectos, como rebajas en los impuestos o exenciones. (Arias-Gaviria Jessica, 2018)

El país históricamente ha estado dominado por la generación de electricidad a base de hidroeléctricas con un promedio anual de producción del 71% con respecto del total de energía generada, seguida por la térmica convencional con un 28% y solamente con un 1% de generación por medio de energías renovables como la eólica, solar y bioenergía. (Pupo-Roncallo O, 2020) El sector industrial utiliza más energía que cualquier otro sector de uso final, consumiendo más del 50% de la energía total del mundo. En 2017 en Colombia, el 38,3% de la energía primaria total fue consumida por la industria, 40,6% por transporte,

19,9% por el sector de servicios y 1,2% por el sector agricultura, silvicultura y pesca. Durante el periodo 1975 - 2017 este consumo en la industria y el transporte creció a tasas promedio anuales de 1,85% y 2,65% respectivamente. (Patiño Luordes Isabel, 2019)

En la industria se necesita mucha energía para los procesos de calentamiento, en particular en la industria del vidrio, como parte de la industria intensiva en energía, requiere de grandes portadores de energía fósil, principalmente naturales como gas para alcanzar temperaturas entre los 1000 y 1600°C para fundir materias primas. En 2018 el 7.4% de la demanda de energía en Alemania para la industria manufacturera fue utilizada por el vidrio y productos de vidrio. (Wulf Chritina, 2022)

El vidrio tiene un peso significativo dentro de la economía en general y en particular en Colombia se le ha dado relevancia, ya que para el año 2015, los ingresos operacionales del sector ascendieron a 8,885 millones. En cuanto a las empresas procesadoras de vidrio, su auge, en la actualidad viene arrastrado por el incremento en la construcción de vivienda, con la propiedad horizontal y la proliferación de centros comerciales (Camacol, 2017), a lo que se le suma el cambio en las normativas, con la exigencia en la utilización de vidrio templado o de seguridad en dichas construcciones. (Charry, 2018).

El aumento de la eficiencia energética es una opción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto beneficia el sector industrial al reducir el consumo de energía para fabricar sus productos, aumentando niveles de producción y mejorando la competitividad de la industria a nivel nacional e internacional. (Carabalí Diana, 2017) y con el fin de aportar a esta problemática generalizada, se realizará la simulación de una planta de templado de vidrio y de esta manera generar un estudio técnico-económico de dicho proceso de producción para realizar posteriormente una evaluación energética del proceso por medio del software SuperPro Designer, que nos permita establecer desempeños reales para que cualquier empresa de este tipo pueda apoyarse en este estudio como guía de evaluación de sus propios procesos.

1.4. Estructura del Proyecto

Este proyecto se divide en cuatro capítulos, en el primero se hace una introducción del estudio y se establecen los objetivos generales y específicos, además de su justificación y alcance, para entender la finalidad y aportes esperados del mismo.

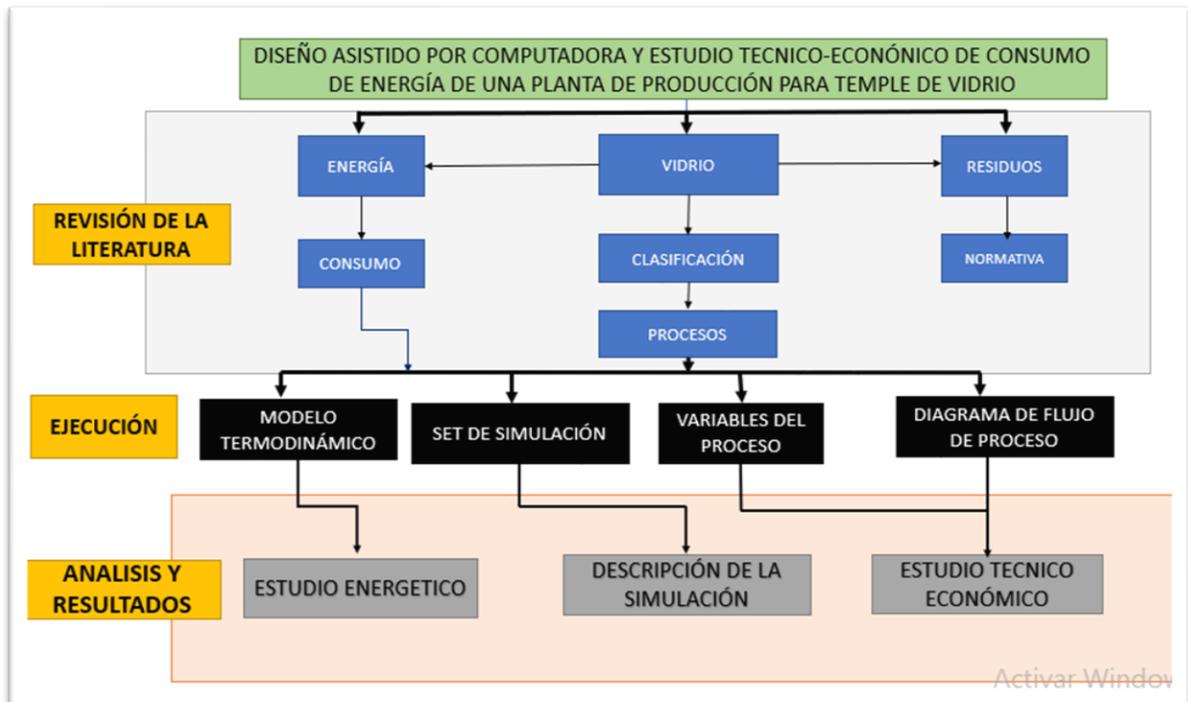
En el segundo capítulo se presenta la revisión de la literatura y el estado del arte del tema, específicamente del vidrio, sus características más importantes y su clasificación, para luego establecer los tipos de procesos de producción requeridos para su transformación. También se determinan los residuos asociando al proceso y un aparte importante como lo es el consumo de energía. En esta sección también se incluirán las herramientas computacionales para el diseño y las respectivas normativas nacionales e internacionales que aplican al tema.

En el tercer capítulo, se establecerá la metodología para el desarrollo del proyecto y se realizará la simulación del proceso productivo con la herramienta SuperPro Designer. Se identificarán las variables del proceso, el set de simulación, se establecerá el modelo termodinámico, además del flujo de proceso para la transformación y temple de vidrio.

En el cuarto y último capítulo, se presentarán los resultados obtenidos del estudio, el diseño del proceso y los datos arrojados de la simulación en cuanto a consumo de energía y eficiencias. También se establecerá el estudio técnico-económico y el estudio energético y se planteará un análisis de cada uno de los resultados.

A continuación, se presenta una gráfica con la estructura del proyecto con el fin de dar más claridad con respecto a los alcances de este y a los resultados esperados.

Figura 1: Estructura del proyecto.



Fuente: Elaboración propia

La figura muestra cómo se entrelazan cada a aparte del estudio iniciando con la revisión de la literatura, posteriormente con los componentes de la simulación y por último con el análisis de los resultados, de acuerdo con el resultado de la simulación y los estudios energéticos y técnico-económico.

2. Estado Del Arte

2.1 Vidrio

La adopción generalizada del vidrio como material hecho por el hombre comenzó durante el siglo XVI A.C. y su producción en fábricas se ha ubicado en la Mesopotamia y Egipto con hallazgos tempranos en Siria-Palestina, Micenas y el Cáucaso. (Degryse Patrick, 2020) En un momento, la sociedad estadounidense para testeo de materiales (ASTM) definió el vidrio como "un producto inorgánico de fusión que se ha enfriado hasta una condición rígida sin cristalizar". Incluso esta definición es demasiado restrictiva, ya que se conocen muchos sistemas de vidrio orgánico, y la fusión no es el único. medios para hacer vidrio. (Varshneya Arun K, 2019)

La materia básica para la obtención del vidrio es el silicio, el cual se obtiene a partir de rocas magnéticas. Los componentes principales de estas rocas son el feldespato y el cuarzo. El feldespato es un silicato de aluminio que siempre se encuentra en presencia de elementos alcalinos. (Roman, 2015) El sílice y alúmina que se encuentran en el feldespato se disgregan químicamente para mostrar su forma gel, es decir gel de sílice y alúmina. La coagulación de dichos geles da lugar a la formación de minerales de sílice y alúmina los cuales son conocidos como minerales arcillosos. (Imanol, 2012)

El vitrificante por excelencia y responsable de la formación de la red vítrea es la Sílice (SiO_2), la cual posee una alta estabilidad química, baja tasa de expansión térmica y pérdida dieléctrica, pero para su fusión requiere de altas temperaturas de entre 2.000 y 2.300°C, que incurre en altos costos debido a las grandes pérdidas de energía, (Chen YuHui, 2021) aunque se consigue disminuir el punto de fusión con fundentes. Entre los óxidos más importantes se encuentran la caliza (CaCO_3) y la dolomía (CaMgCO_3)₂. El primero facilita la fusión y da fluidez al vidrio, mientras que el segundo, aumenta la resistencia del vidrio a los cambios de temperatura, mejorando las propiedades mecánicas (Eugenio, 2015).

2.2 Clasificación de los Vidrios

Hay diferentes tipos de vidrio según la composición porcentual de las diferentes materias primas que lo constituyen. (Vivienda, 2014)

2.2.1. Vidrios Sodio-Calcio

La soda-cal-sílice es la familia de vidrio más importante en la vida diaria porque el 90% de los envases convencionales fabricados en el mundo pertenecen al sistema $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$. El sistema también es vital en muchas aplicaciones médicas, incluidas varias composiciones utilizadas para la ingeniería de tejidos y la administración de fármacos. (Santoso Imam, 2022). La composición de este tipo de vidrio es del 71% al 75% de peso en arena, (SiO_2), 12 al 16% de soda u óxido de sodio de la materia prima de carbonato de calcio, y del 10 al 15% de cal (óxido de calcio de la materia prima carbonato de calcio), y un bajo porcentaje de otros materiales para propiedades físicas tales como el color. Tiene un fuerte enlace atómico y alta conectividad, lo que dificulta que otras sustancias afecten su estructura, por su resistencia mecánica minimiza los rayones por fricción y se caracteriza por su alta transmisión de luz y una baja constante dieléctrica. (Muniz R F, 2021)

2.2.2. Vidrio Plomado

El vidrio de plomado se usa comúnmente como material óptico debido a su alto índice de refracción y su baja temperatura de transición, sin embargo, el vidrio de este tipo está sujeto a cambios de color y puede ennegrecerse por lo que reduce la transmisión de luz. (Zhou Tiafeng, 2021) Para este tipo de vidrio, se utiliza óxido de plomo en lugar de óxido de calcio, lo cual permite bajar la temperatura de fusión y la dureza del vidrio y para elevar el índice de refracción del mismo. Su composición es del 54% al 65% de sílice (SiO_2), 18% al 38% de óxido de plomo (PbO) y del 13% al 15% de soda (Na_2O) o potasio (K_2O). Se pueden utilizar dos tipos diferentes de óxido de plomo, el PbO y Pb_3O_4 . (Lecanuet Guillaume, 2021)

2.2.3 Vidrio Borosilicato

Es cualquier vidrio que contenga al menos 5% de óxido bórico en su composición. Es ampliamente utilizado en la industria aeroespacial y química, en la fabricación de maquinaria y en otros campos similares debido a sus excelentes propiedades, como alta resistencia, alta conductividad térmica y resistencia a la corrosión. (Ma Ning-ning, 2020). El vidrio de borosilicato tiene características predominantes como alta obstrucción a la corrosión, oposición al desgaste, orgánico similitud y pequeñas propiedades aislantes. (Bhuyan B.K, 2020)

Un vidrio de este tipo está compuesto de un 70% a 80% de Sílice (SiO_2), un 7% al 13% de ácido bórico (B_2O_3), un 4% al 8% de óxido de sodio (Na_2O) y óxido de potasio (K_2O) y un 2% al 7% de óxido de aluminio (Al_2O_3). Es altamente resistente contra agua desionizada, soluciones salinas y casi todos los ácidos. (Piarristeguy Andrea, 2021) Existen solo unas pocas sustancias químicas que pueden causar una corrosión notable a la superficie del vidrio, como lo es el ácido fluorhídrico, ácido fosfórico concentrado y soluciones cáusticas hasta una concentración del 30% pueden ser manipuladas con este vidrio sin dificultad. (Systems, 2017)

2.2.4 Vidrios Especiales

Se pueden generar vidrios con propiedades específicas para cualquier tipo de requerimiento adicionando diferentes elementos químicos, uno de los más usados son los vidrios de fosfato, ya que reciben un interés considerable para una gran variedad de aplicaciones tecnológicas, en biomedicina como bio-vidrios, en óptica como vidrios láser, en electroquímica como nuevos materiales de electrodos/electrolitos, como vidrios de sellado a baja temperatura y como anfitriones para energía nuclear. (Sandín., 2015) Las propiedades físicas y químicas de los vidrios fosfatados están íntimamente relacionados con la modificación de la composición y red estructural con la adición de óxidos metálicos. Se

presta especial atención a la mejora de propiedades específicas que son de particular importancia para sus aplicaciones. (Mogus-Milankovic Andrea, 2021)

También se puede generar el vidrio de silicio al 96%, que poseen alta resistencia a la flexión y tenacidad a la fractura, alta dureza, excelente resistencia al desgaste y baja deformación por fluencia hasta los 1350°C, estas propiedades surgen del desarrollo de microestructuras a través del procesamiento de la cerámica en fase líquida. (Hampshire Stuart, 2014). En la siguiente tabla se presenta, en resumen, los porcentajes aproximados de los componentes para cada uno de los diferentes tipos de vidrio.

Tabla 1: Composición del vidrio de acuerdo con porcentaje de componentes.

COMPONENTE	SODIO-CALCIO	PLOMADO	BOROSILICATO	SILICIO
SILICE	71% - 75%	54% - 65%	70% - 80%	96%
SODIO	12% - 16%	13% - 15%	4% - 8%	
POTACIO	0% - 1%	1% - 10%	0,4% - 1%	
CALCIO	10% - 15%	0% - 6%	0% - 1%	
PLOMO		18% - 38%	0% - 10%	
BORO			7% - 13%	3% -4%
ALUMINIO	0,5% - 3%	0% - 2%	2% 3%	
MAGNESIO	0% - 4%			

Fuente: Elaboración propia a partir de literatura.

En la tabla se establecen los respectivos porcentajes de sílice y demás componentes que varían de acuerdo con el tipo de vidrio que se quiere obtener.

2.3 Tipos de Procesos de Producción

Dependiendo del producto que se va a producir a partir de vidrio, se selecciona el proceso de producción más adecuado. (Kovac̆ec Miroslav, 2011)

2.3.1 *Formación por Soplado Automático*

En este el material vitreo, entra en un molde hueco cuya superficie tiene la forma que se requiere para el vidrio. Una vez cerrado el molde, se inyecta aire comprimido en su interior para que el material se adapte a sus paredes. Tras enfriarse, se abre el molde y se extrae el objeto. Esta técnica se utiliza principalmente para la fabricación de botellas, envases, frascos y vasos de vidrio. (Marinelli, 2016).

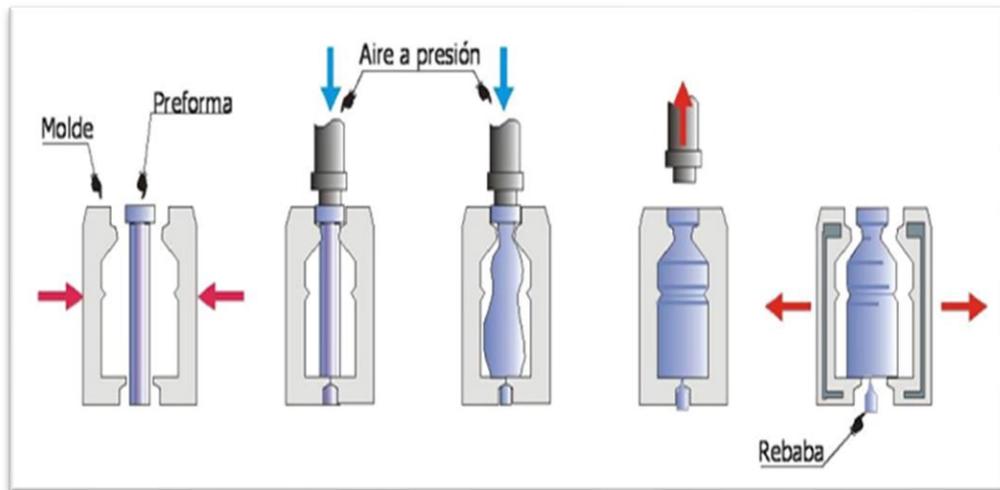
La industria de envases de vidrio cubre la producción de envases de vidrio (botellas y tarros), donde la pasta se distribuye continuamente a un conjunto de máquinas de moldeo en paralelo que dan forma al acabado del producto, cada instalación dispone de un conjunto de hornos donde se produce la pasta vítrea para satisfacer la demanda. (Motta Toledo Claudio Fabiano, 2016)

Al finalizar este proceso suele sobrar un poco de material. La cantidad sobrante se llama rebaba y se recorta cuando se retira el material del molde. Todos los sobrantes se reutilizan, volviendo de nuevo al horno para comenzar el proceso. (Willsey, 2017)

Los envases de vidrio deben ser máximamente ligeros, así como menos costosos y al mismo tiempo tienen que soportar grandes cargas mecánicas, mayor presión interna y choques térmicos. Para poder cumplir con estos requisitos, además de un contenedor bien diseñado es necesario también lograr una excelente distribución del vidrio, con un espesor uniforme de la pared del recipiente. (Kovacec Miroslav, 2011)

A continuación, se muestra un esquema del proceso de producción de vidrio por soplado automático.

Figura 2: Formación de vidrio por soplado automático.



Fuente: Proceso de elaboración de vidrio por soplado.

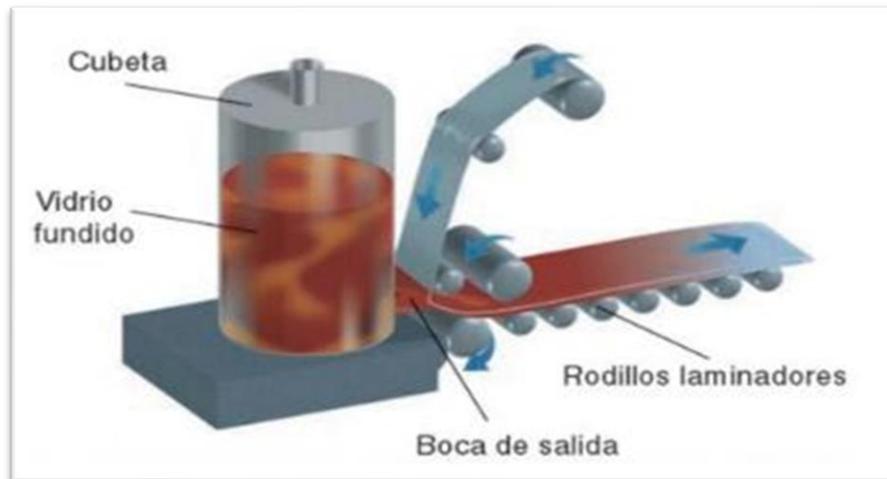
La figura corresponde específicamente al proceso de producción de botellas y envases de vidrio e ilustra la conformación del vidrio dentro del molde y la respectiva rebaba como sobrante.

2.3.2. Formación por Laminado.

El material fundido se hace pasar por un sistema de rodillos de laminado granados o lisos, los cuales están separados a la distancia que se requiere tenga el espesor de la lámina, a este proceso también se le llama vidrio estirado. (Daniel, 2009) Después de pasar por el último juego de rodillos, la lámina de vidrio con el espesor requerido es cortada de acuerdo con la longitud establecida. Este tipo de vidrio es considerado de menor calidad, debido a que presenta una mayor distorsión óptica y las tolerancias en cuanto al espesor pueden variar en una misma lámina de vidrio, por lo que no es recomendable su utilización para procesos de manufactura de vidrios templados de seguridad. (Marinelli, 2016)

El siguiente es un esquema reducido del proceso de fabricación de vidrio por rodillos o vidrio estirado.

Figura 3: Formación de vidrio por laminado.



Fuente: Proceso de elaboración de vidrio por laminado.

En la figura se muestra como el vidrio fundido es depositado en una cubeta o tanque para que posteriormente pase por una serie de rodillos que le dan el acabado y espesor requerido a medida que se va enfriando.

2.3.3. Formación por Frotación Sobre Baño de Estaño

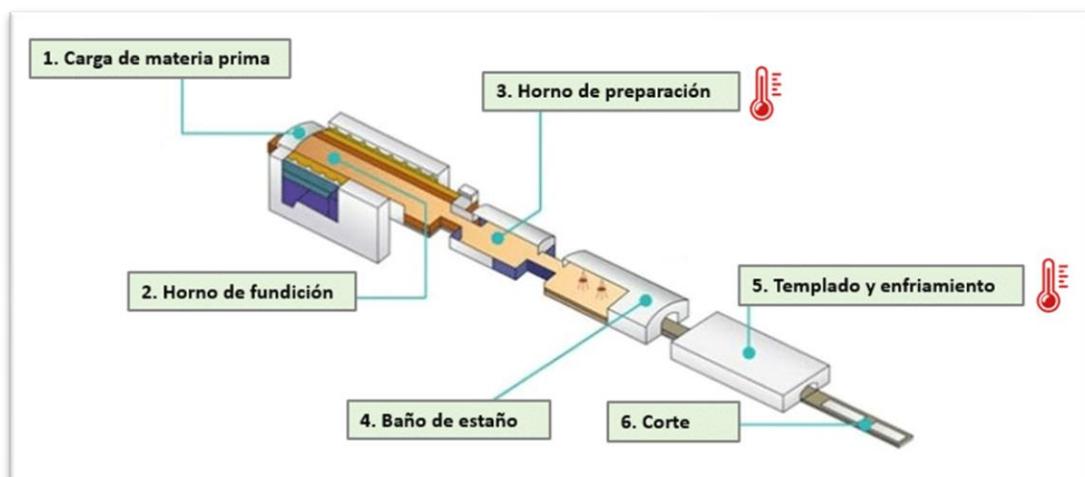
Sir Alastair Pilkington desarrolló el método “Float” para fabricar vidrio en la década de 1950. Este proceso implica la flotación de la cinta de vidrio líquido de espesor uniforme sobre un baño de estaño fundido bajo calefacción controlada. (Li Yuao, 2017) Por sus características ópticas y estéticas, el vidrio flotado ha encontrado una amplia gama de aplicaciones en la construcción, llegando para el 2018 en la unión europea al 29% del total de vidrio producido. (Strugaj Gentiana, 2021)

Una vez comprobado que el vidrio posee la calidad requerida, se procede a su cortado. El proceso es continuo, por lo que un ordenador dispone de las dimensiones que se debe fabricar, además de otras complementarias como alternativa en el caso que no se estuvieran obteniendo las calidades requeridas. Las hojas, separadas por el corte, se distancian unas de otras en las rampas de aceleración, en busca de cargadores automáticos, que las irán recogiendo mediante ventosas al vacío, para ser depositadas en los racks para su respectivo transporte. (España, 2015)

El vidrio flotado tiene una planitud excelente en un área grande sin pulir y la productividad es extremadamente alta. El proceso de flotación también es el método principal para la fabricación de vidrio para el mercado automotriz. El 90% de la producción mundial de vidrio plano se forma usando tecnologías de flotación, y para el año 2007 la producción mundial fue de aproximadamente 50 millones de toneladas con un crecimiento del 4% anual. (Zhang Qin, 2010)

Se presenta el esquema de un horno de fabricación de vidrio flotado. (Mesurex, 2017)

Figura 4: Esquema horno para producción de vidrio flotado



Fuente: Control de temperatura de vidrio flotado.

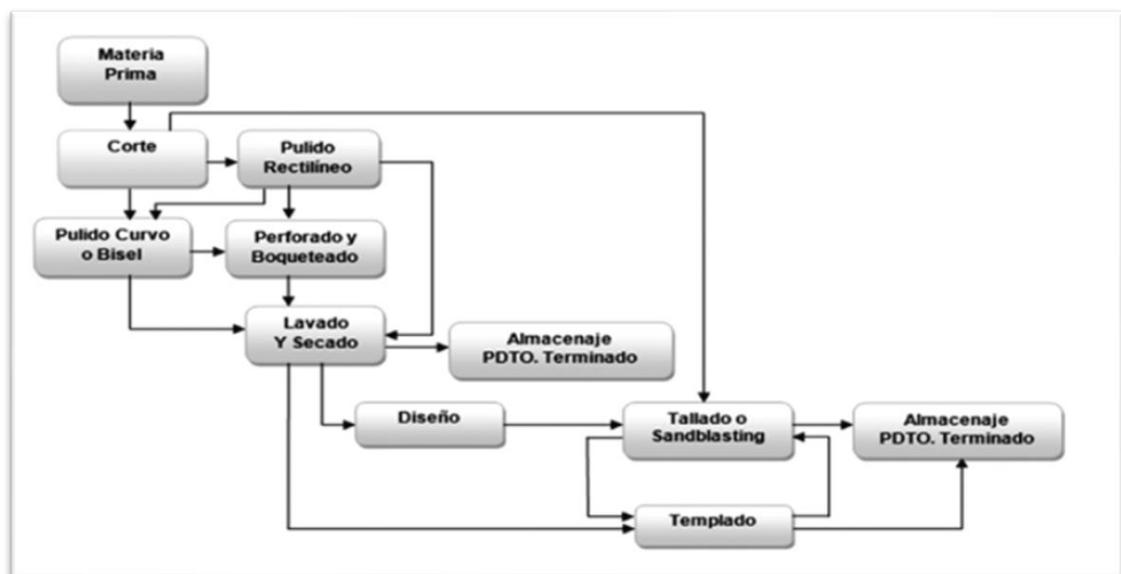
La figura muestra cómo el vidrio fundido se hace pasar por una piscina de estaño que se encuentra dentro del horno con el fin de asegurar su planimetría a lo largo de la hoja, además de que el espesor sea el adecuado.

2.3.4. Procesos de Transformación y Temple.

El uso del vidrio ha aumentado significativamente en los últimos años, tradicionalmente solo se usaba como componente de las ventanas, pero con ajustes en los diseños, se ha comenzado a utilizar en techos, columnas, vigas, puertas y pisos, introduciendo nuevos desafíos para el diseño estructural y, por ende, nuevos procesos que le brinden mayor resistencia. (Datsio kyriaki Corinna, 2015)

A continuación, se muestran algunos diagramas de procesos de transformación y temple de vidrio.

Figura 4: Diagrama de proceso temple de vidrio.



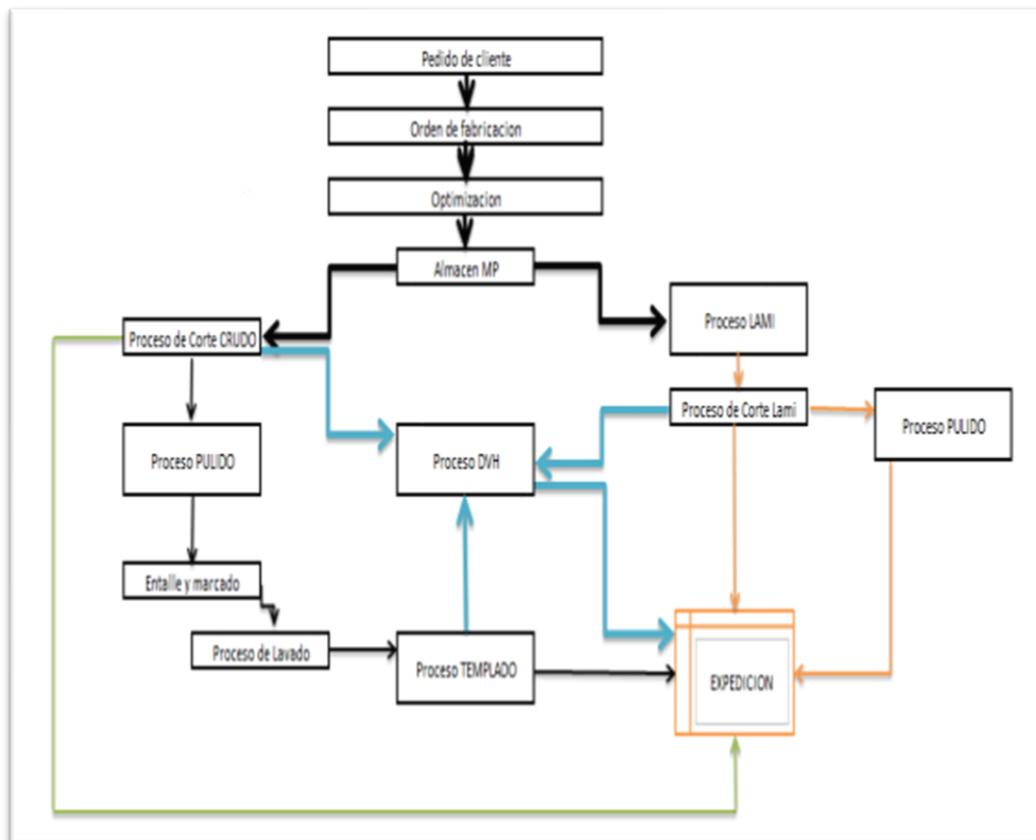
Fuente: Caso de estudio planta templado. (Ortíz Barrios Miguel Angel, 2014)

La figura describe todas las etapas del proceso para la transformación y temple de vidrio, incluyendo procesos posteriores como el tallado o sand-Blastin de vidrio.

El vidrio templado tiene otras aplicaciones para productos de con mayores especificaciones como vidrios de seguridad laminados templados y vidrios DVH para paneles de control solar o para refrigeración.

A continuación, se muestra un diagrama de proceso para transformación de vidrio que incluye procesos de laminado y DVH.

Figura 5: Diagrama de proceso transformación de vidrio DVH y laminado.



Fuente: Análisis y mejora de procesos. (kemmerer Federico, 2016)

La figura describe los procesos de vidrio templado como corte, pulido, lavado y temple, pero también se muestran otros procesos posteriores como laminado y DVH.

2.4. Residuos Asociados a la Industria

Durante la producción de vidrio se emite CO₂, por tanto, constituye una categoría de fuente de gases de efecto invernadero, en la práctica, los fabricantes no producen vidrio solo a partir de materias primas, sino que algunos emplean una cierta cantidad de chatarra de vidrio reciclada. Las principales materias primas que emiten CO₂ durante el proceso de fundición son la piedra caliza, la dolomita y la ceniza sosa. (Canciano Janeth, 2019)

Por lo anterior en este aparte trataremos de manera más específica adicional a los residuos generados en los procesos de fusión o específicamente de producción de vidrio, los residuos que se generan en las plantas de transformación y temple de vidrio monolítico, los cuales, al no cuantificarse y controlarse, pueden llegar a tener un impacto significativo al medio ambiente, de igual manera, deben generarse mecanismos para su disposición final.

2.4.1 *Emisiones de los Procesos de Fusión*

Las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono son unos de los desafíos más importantes que enfrenta la humanidad hoy día, las actividades humanas emisoras de CO₂ causan degradación ambiental en forma de perturbaciones ecológicas, calentamiento global, cambio climático y contaminación ambiental (Li Binlin, 2021) Los gases de efecto invernadero incluidos el CO₂, el metano y el óxido nitroso, son generados típicamente por actividades industriales, el transporte y el consumo de energía en plantas e industrias intensivas como la producción de vidrio. Emisiones de dióxido de carbono representan aproximadamente el 75% del total de las emisiones. (Khezri Mohsen, 2021).

A continuación, se muestra una tabla con el resumen de las principales emisiones del proceso de fusión de vidrio. (Vidrio I. d., 2003)

Tabla 2: Emisiones proceso de fabricación.

EMISIÓN	FUENTE / COMENTARIO
PARTÍCULAS	Condensación de los componentes volátiles de la carga. Arrastre de material fino en la carga. Productos de la combustión de algunos combustibles fósiles
ÓXIDOS NITROSOS	NO térmicos debido a las altas temperaturas del horno. Descomposición de los compuestos de nitrógeno que contienen los materiales de la carga. Oxidación del nitrógeno que contienen los combustibles.
ÓXIDOS DE AZUFRE	Azufre en el combustible. Descomposición de los compuestos de azufre que contienen los materiales de la carga. Oxidación del sulfuro de hidrógeno en los hornos de cubilote.
CLORUROS	Presentes como impureza en algunas materias primas, especialmente el carbonato sódico artificial. NaCl utilizado como materia prima en algunos vidrios especiales
FLORUROS	Presentes como impureza menor en algunas materias primas. Agregados como materia prima en la producción de fritas esmaltadas para dotar al producto terminado de determinadas propiedades. Agregados como materia prima en la fibra de vidrio de filamento continuo y en algunas partidas de vidrio para mejorar la fusión o para dotar al vidrio de determinadas propiedades (por ejemplo, la opalescencia). Cuando se agregan fluoruros a la carga, como el espato flúor, las emisiones incontroladas pueden ser muy altas.
METALES PESADOS	Presentes como impurezas menores en algunas materias primas, en los desperdicios de vidrio usado y en los combustibles. Se utilizan en los fundentes y agentes colorantes que se emplean en la fabricación de fritas (principalmente plomo y cadmio). Se utilizan en las fórmulas de algunos vidrios especiales (por ejemplo, cristal de plomo y algunos cristales de colores). El selenio se utiliza como colorante (cristal al bronce) o como agente decolorante en algunos cristales transparentes.
DIÓXIDO DE CARBONO	Producto de la combustión. Se emite tras la descomposición de los carbonatos que contienen los materiales de carga (por ejemplo, ceniza de sosa, caliza).
MONÓXIDO DE CARBONO	Producto de la combustión incompleta, especialmente en hornos de cubilote.
SÚLFURO DE HIDROGENO	Se forma a partir de las materias primas o del azufre que contienen los combustibles utilizados en los hornos de cubilote debido a las condiciones de reducción que se dan en algunas partes del horno.

Fuente: Residuos industria de Vidrio.

La tabla muestra en resumen los diferentes tipos de emisiones generados en el proceso de producción de vidrio especificando las diferentes fuentes que los generan.

2.4.2 Casco de Vidrio

Corresponden a algunos retales que al momento del corte de la lámina no poseen el tamaño mínimo para su almacenamiento por lo que es necesario proceder a su rotura y disposición como casco o scrap de vidrio. Según un informe publicado en 2017, de las 253.000 toneladas de residuos de vidrio generados en 2015-16 aproximadamente 173.000 fueron recuperados. Sin embargo, sólo el 68% del vidrio recuperado es reciclado en casco de vidrio para la fabricación de nuevo vidrio, por lo que el 32% tiene el potencial de ser dispuesto para otro uso, como en la construcción. (Bagheri Ali, 2021)

La recolección se lleva a cabo en tolvas especiales para que no se mezclen con otro tipo de desechos como se muestra en la siguiente figura.

Figura 6: Casco de vidrio.



Fuente: Imagen propia tomada en una fábrica de transformación de vidrio.

La figura muestra como son dispuestos los residuos de vidrio, en este caso el casco de vidrio, el cual no deben ser mezclado con otro tipo de residuo, incluso con residuos de otros colores, con el fin de facilitar su reciclaje y posterior reutilización.

2.4.3 *Sedimento de Vidrio*

Aunque su tasa de reciclaje es alta en comparación con algunos otros materiales de desecho, no todo vidrio se puede reciclar, y esto es debido a la separación por color y especialmente por el tamaño, tal es el caso de piezas muy pequeñas conocidas como finos de vidrio. (Wang Tianchun, 2021) Se están vertiendo alrededor de 20 millones de toneladas de desechos de vidrio cada año en China y la mayor parte de estos residuos se depositan en vertederos. Dado que el sedimento no es biodegradable, la eliminación en vertederos causa graves problemas ambientales y desperdicio de recursos. Por lo tanto, la factibilidad de usarlos como agregados o como un reemplazo parcial material en concreto es de creciente interés en todo el mundo (Wang Yingbin, 2020).

Los residuos del proceso de pulido de vidrio plano para la construcción civil generalmente se desechan en vertederos. A pesar de que algunos investigadores evalúan su aplicación en el desarrollo de alternativas materiales de construcción, su valor añadido sigue siendo una barrera. (Azevedo Alfonso, 2021).

En la siguiente figura se muestra el sedimento de vidrio.

Figura 7: Sedimento de vidrio proceso de biselado.



Fuente; Imagen propia tomada de una planta de producción de vidrio

La figura muestra sedimento de vidrio, el cual es básicamente polvo de vidrio y debido a sus características, no puede ser dispuesto junto con el agua.

2.4.4 *Icopor*

La absorción de energía y la mitigación de impactos son aplicaciones típicas donde se utilizan espumas poliméricas. Los ejemplos incluyen embalajes y protección contra impactos. Las espumas poliméricas pueden ser adaptadas a aplicaciones específicas mediante la elección de un material a granel y un proceso de fabricación adecuados. Las cualidades deseables incluyen baja densidad y buena capacidad de absorción de energía. (Morton, Reyes, & Clausen, 2020) Las espumas rígidas se utilizan a menudo en estructuras tipo sándwich donde la fractura y la tenacidad es importante mientras que las espumas flexibles son más comúnmente aplicadas en amortiguación donde la recuperación es deseable. (Betancourt Daylin Julieth, 2016)

Es utilizado para separar los paquetes de vidrio como se muestra a continuación.

Figura 8: Icopor para separación de láminas de vidrio.



Fuente: Imagen propia capturada en una fábrica de transformación de vidrio

En la figura se muestra como el producto para separar la lámina en su almacenamiento. De igual manera funciona como separador en el transporte.

2.4.5 Agua

El proceso de producción de vidrio es un débil consumidor de agua, su consumo está bien controlado y es poco contaminante para este elemento. Su utilización se centra básicamente en la refrigeración de algunas partes de los hornos, y su consumo se centra en la compensación de esta debido a la evaporación. Las estadísticas indican que en Francia la contaminación de aguas por la industria del vidrio representaba el 0.03% de la contaminación total de aguas del país. (Tackels, 1996)

En cuanto a la transformación, las aguas residuales se producen en grandes cantidades de los diversos procesos de fabricación tale como lavado, biselado y perforado, impurezas

como astillas de vidrio y partículas de sílice permanecen en las aguas residuales, lo que resulta en turbidez. (Gholipour Amir, 2020)

En la figura 10 se muestra el agua almacenada producto del proceso de biselado de vidrio.

Figura 9: Agua proceso de lavado de vidrio.



Fuente: Imagen propia capturada en una planta de transformación de vidrio

La figura muestra el agua almacenada en tanques para su utilización, y es turbia debido a que contiene residuos de vidrio, aceites refrigerantes y micropartículas metálicas desprendidos de los elementos abrasivos utilizados para el procesamiento y pulido del vidrio.

2.5 Consumo de Energía

La fusión de vidrio comercial requiere de una alta temperatura, por lo tanto, exige un alto consumo de energía a través de la combustión de gas natural, o petróleo, por lo que la fusión de lotes de vidrio está desafiando a la industria a mantener al mínimo el consumo de energía

y las emisiones de gases de efecto invernadero. (Schmitz Andreas, 2010) Para hacer frente a este desafío, los expertos han adoptado los siguiente dos enfoques; el primero, reutilizar el vidrio de desecho para reducir la temperatura de fusión, reduciendo así el consumo de energía hasta un 25% y segundo, precalentando el lote de vidrio con gases de escape. (Khan Sultan, 2022)

La etapa de templado de vidrio es un proceso con un alto consumo energético. (Ming Liu. Xuenan Yang, 2019). Y debido a las altas temperaturas que se requieren para el calentamiento de las piezas de vidrio, los hornos eléctricos son los más adecuados y los más usados ya que en ocasiones no es de fácil abastecimiento el gas natural. (Shuflan Abu, 2022)

Para el caso del proceso de temple de vidrio, se requiere elevar este material sólido desde temperatura ambiente hasta por debajo del punto de deformación, entre 650°C y 700°C para luego llevarlo en un muy corto tiempo nuevamente a temperatura ambiente. (Hubert Mathieu, 2021)

Nos enfocaremos en la energía requerida para generar los procesos de calentamiento y enfriamiento en un horno de temple de vidrio por radiación con medidas de cargue máximo 2.1 metros por 3.6 metros, medidas correspondientes a los equipos más utilizados en las plantas de producción que desarrollan estos procesos.

La energía necesaria para calentar el vidrio se puede calcular con la siguiente Formula (Farm, GLASTORY, 2017).

$$E = \Delta T * C * m \quad (1)$$

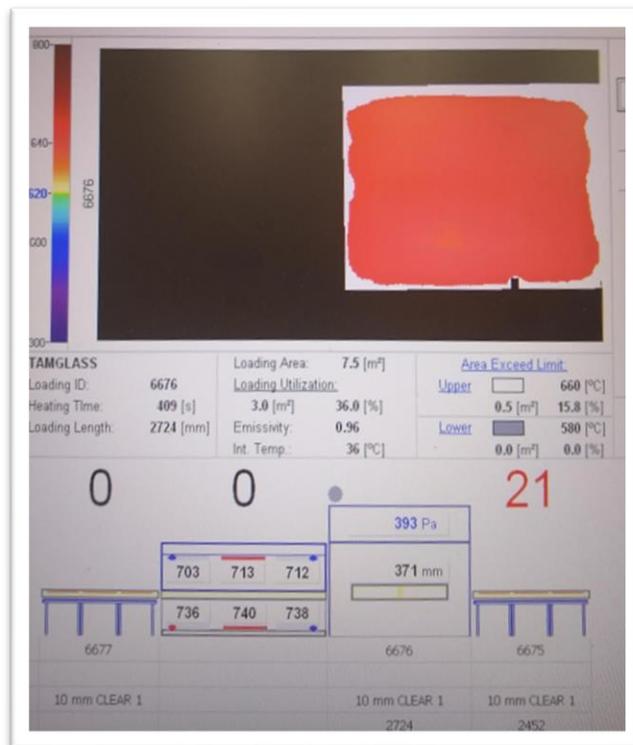
Donde

- E = Energía necesaria para calentar el vidrio.
- ΔT = Variación de la temperatura.
- C = Calor específico del vidrio.

- m = Masa del vidrio.

Algunos hornos de templado de vidrio cuentan con escáner que permiten establecer la temperatura final que alcanzan las piezas de vidrio dentro de la zona de calentamiento como se muestra en la figura, con el fin de asegurar la óptima calidad del proceso de temple.

Figura 10: Temperatura de pieza de vidrio



Fuente: Elaboración propia en escáner de horno HTF 2136 TANGLAS.

La figura muestra como la pieza de vidrio ya ha alcanzado una temperatura por encima de los 620°C en sus bordes, pero la zona más cercana al centro está por encima de los 640°C, por lo que se puede establecer que el calentamiento no ha dado de manera uniforme y por ende la calidad del temple no es el óptimo.

Para el caso del enfriamiento, el consumo de energía no depende del área del vidrio a enfriar, ya que, por diseño, el equipo se encarga de soplar la misma área sin importar que haya vidrio o no en proceso. Por lo tanto, el consumo va a depender del aprovechamiento de la carga del equipo. (Farm, El Consumo Energético del Templado de Vidrio, 2017)

2.6 Herramientas Computacionales para el Diseño

En la actualidad la simulación de procesos ha ganado importancia gracias a que se trata de una actividad confiable, económica y que demanda menor tiempo para la obtención del modelo representativo del sistema bajo estudio. (Pérez Sánchez Amaury, 2020) Es una herramienta para analizar y probar soluciones antes de implementarlas en el sistema real. (Tearwattanarattikal Pochamam, 2007) y los seguimientos de ejecución resultantes se utilizan para calcular rendimientos de proceso, por ejemplo, tiempo de ciclo, utilización de recursos, y tiempos de espera para cada tarea en el proceso (Camargo Manuel, 2020)

La simulación ha demostrado ser capaz de hacerle frente a las tareas de mejora de la productividad y la eficiencia en las que estas dificultades se suponen o interactúan (Bernal Loaiza Maria Helena, 2013). Para una compañía industrial, el invertir en el desarrollo e implementación de la simulación de sus procesos productivos en general le permite diferentes beneficios, ubicándola dentro de un contexto global en un ambiente permisible a modificaciones y cambios, sin incurrir en cuantiosos gastos de dinero y tiempo. (Christopher Anzastiga González, 2018)

En cuanto a procesos productivos, se han desarrollado muchas herramientas computacionales de simulación, que permiten el modelamiento y diseño de sistemas complejos de producción, con el fin de realizar cambios y cuantificar su variaciones y comportamientos. (Mabashir Muhammad, 2021)

En la siguiente tabla se muestran algunos de los programas más utilizados para simulación:

Tabla 3: Programas de simulación.

PROGRAMAS DE SIMULACIÓN	
PROGRAMA	CARACTERÍSTICAS
PROMODEL	<p>Es un programa de simulación de procesos industriales, permite simular cualquier tipo de proceso de manufactura, además de procesos logísticos, procesos de manejos de materiales y call centers, contiene simulaciones de talleres, grúas viajeras, bandas de transporte, procesos de ensamble corte y fundición. Se puede crear un modelo computarizado de todo proceso de manufactura y una vez realizado el modelado, puedes simular bajo enfoques Justo a Tiempo, Teoría de Restricciones, Sistemas de Empujar y Jalar, de Logística y muchas otras más. Además de permitir el simulado de acciones, presenta como optimizar los procesos de manufactura mencionados, y así obtener los mejores con el consumo mínimo de recursos, para dicha tarea, el sistema cuenta con 2 optimizadores. ProModel es un paquete de simulación que no realiza solamente el simulado, sino también optimiza los modelos ingresados. (Ricardo Pérez, 2018)</p>
ARENA	<p>Arena actualmente es el software más popular, es especialmente común en américa del norte y algunos países latinoamericanos como Colombia y Perú. Aunque Arena es un software comercial, se ofrece una versión de prueba gratuita para estudiantes, la cual tiene la funcionalidad completa sin límite de tiempo, pero el tamaño del modelo es limitado y cualquier uso comercial es estrictamente prohibido. (Sebastian Lang, 2021).</p> <p>Es una aplicación creada por Rockwell Software, del sistema operativo Windows de Microsoft que permite la realización de modelos de simulación con un alto nivel de detalle tanto conceptualmente como con el uso de las animaciones, es un sistema que provee un entorno de trabajo integrado para construir modelos de simulación en una amplia variedad de campos, integra todas las funciones necesarias para el desarrollo de una simulación exitosa, tales como animaciones, análisis de entrada y salida de datos y verificación del modelo, (W. David Kelton, 2010) tiene como ventaja principal que se desarrolla dentro de un entorno diseñado para personas que no poseen conocimientos de programación, además, permite modelar desde una fábrica automotriz, hasta la sala de espera de un hospital. (Luis, 2018).</p> <p>Los elementos básicos para los modelos de Arena se llaman módulos, estos son el diagrama de flujo y los objetos de datos que definen el proceso que se va a simular y se eligen de las plantillas de la barra de proyectos. Vienen en dos formas básicas, diagramas de flujo y datos. Los primeros describen procesos dinámicos del modelo que se pueden interpretar como nodos o lugares a través de los cuales fluyen las</p>

	<p>entidades o en donde se origina el modelo. Los módulos disponibles son Create, Dispose, Process, Decide, Batch, Separate, Assign y Record. (W. David Kelton, 2010)</p>
FLEXSIM	<p>Flexsim es un software universal de simulación de eventos discretos y se utiliza para modelar y simular diferentes sistemas de varias industrias diferentes. Según una estimación aproximada, en la revista "Fortune" las 500 principales empresas, la mitad son clientes de Flexsim que incluyen algunas empresas conocidas como Daimler Chrysler, Northrop Grununan, Discover Card, DHL, Bechtel, Bose, etc. Además, específicamente para la fabricación, la logística y otros campos, establece la tecnología de procesamiento de imágenes tridimensionales por computadora, la tecnología de simulación, la tecnología de inteligencia artificial, la tecnología de procesamiento de datos en su conjunto. Además, los Flexsim tienen un modelo de almacén con casi todos los objetos físicos existentes, como los procesadores, los operadores, cintas transportadoras, montacargas, semáforos, tanques, estanterías, apiladora automática, etc., (Li-Hong Chen, 2013).</p>
PLANT SIMULATION	<p>Es una aplicación de computadora desarrollada por Siemens PLM Software para modelar, simular, analizar, visualizar y optimizar sistemas productivos y de procesos, el flujo de materiales y operaciones logísticas. Utilizando Plant Simulation, los usuarios pueden optimizar el flujo de materiales, utilización de recursos y logística para todos los niveles de planeación de plantas desde manufactureras globales, fábricas locales, a líneas específicas. Plant Simulation es parte de del portafolio de diseño y optimización de plantas y de los productos de fábrica y manufactura digital parte del Software de Product Lifecycle Management (PLM). (Sebastian Lang, 2021)</p> <p>Por sus características permite realizar modelos de plantas de producción orientados a objetos que incluyen procesos comerciales, logísticos y de producción. Posee una biblioteca de objetos para la aplicación de modelos rápidos con escenarios tipo, con gráficos y diagramas para el análisis de la producción, los recursos y especialmente los cuellos de botella, diagramas Sankey y diagramas de Gantt. También posee visualizaciones en 3D, redes neuronales y manejo de experimentos integrados, algoritmos genéticos para la optimización automatizada de los parámetros del sistema y una arquitectura abierta que le admite varias interfaces y capacidades de integración con ActiveX, CAD, Oracle SQL, ODBC, XML y SOCKET. (Product, 2010)</p>

Fuente; Elaboración propia a partir de literatura

La anterior tabla describe algunos de los programas más utilizados para la simulación de procesos productivos, sus características y aplicaciones específicas.

Aunque el uso de los programas de simulación se ha intensificado en los últimos años, aún no explotamos su potencial.

2.7 Normativas

Para este estudio es importante conocer la normatividad que aplica para la producción y transformación de vidrio, de igual manera normas para manejo, aceptación, calidad o las que aplican en cuanto al tratamiento de desechos de vidrio del mismo. A continuación, se hace un breve resumen de algunas de las normas desarrolladas de carácter nacionales e internacional.

2.7.1 Nacionales

Las siguientes normas aplican son de carácter nacional y aplican específicamente a diseño de producto.

- NSR-10 Capítulo K: Corresponde al “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente”. Es el documento más importante con respecto a la construcción en Colombia, y su propósito es definir los parámetros y especificaciones arquitectónicas y constructivas tendientes a la seguridad y preservación de la vida de los ocupantes de las distintas edificaciones. Con un énfasis en el vidrio templado. (Camacol, 1997)
- Norma Técnica Colombiana 1467: Norma para Materiales para vidrio, (acristalamiento) de seguridad utilizados en vehículos de seguridad y en equipos para vehículos automotores que operan en carreteras. (Icontec, 2011)

Las siguientes normas son de carácter nacional y aplican a procesos, producto y tratamiento de desechos.

- Resolución 835 de 2013: Reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los materiales, objetos, envases y equipamientos de vidrio y cerámicas destinadas a estar en contacto con alimentos y bebidas para el consumo humano. (Social M. d., 2013).
- Resolución 0935 de 2008: Reglamento técnico que se aplica a todos los acristalamientos de seguridad, excepto los acristalamientos resistentes a las balas, tanto de fabricación nacional como importados para uso en vehículos automotores y sus remolques, que circulen en Colombia. (Ministerio de Comercio, 2008).
- Resolución 1407 de 2018: Reglamenta la gestión empresarial de los residuos de empaques y envases de papel, cartón, plástico, vidrio y metal. (Sostenible, 2018)
- Resolución 754 de 2013: Metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos. (Ambiente, 2014)
- Decreto 2811 de 1974: Código Nacional de los Recursos Renovables y de protección del medio ambiente. (República P. d., 1974)
- CONPES 3874 de 2016: Política Nacional para la gestión integral de residuos sólidos. Base inicial para el avance hacia una economía circular desde la gestión integral de residuos sólidos. (Social C. N., 2016)
- CONPES 3530 de 2008: Lineamientos y estrategias para fortalecer el servicio público de aseo en el marco de la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Se formulan los lineamientos y estrategias relacionados con la prestación del servicio público de aseo que tiene un impacto positivo en la gestión de residuos. (Social C. N., 2008)

2.7.2 Internacionales

A continuación, se presentan algunas de las normas aplicadas en diferentes países en cuanto a diseño.

- Norma Oficial Mexicana NOM-146: Productos de Vidrio Usados en la Construcción. (Normas, 2016)
- ASTM C1376 de 2003: Standard Specification for Pyrolytic and Vacuum Deposition Coatings on Flat Glass. (Vidrios recubiertos por Deposición al vacío y con recubrimiento Pirolítico). (International, Data Base Cart, 2018)
- ASTM C1464 de 2006: Standard Specification for Bent Glass. (Vidrio Curvado).
- ASTM STP 1434: Uso de vidrio en construcciones. (Materials, ASTM International, 2002)
- ASTM E283-04: Standard Test Method for Determining Rate air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen. (Materials, ASTM International, 2004)
- ASTM C1349-04: Standard Specification for Architectural Flat Glass Clad Polycarbonate. (Materials, ASTM International, 2010)

A continuación, se presentan las normas aplicadas en diferentes países en cuanto a procesos, producción, manejo y utilización de vidrio.

- ASTM E2190 de 2008: Standard Specification for Insulating Glass Unit Performance and Evaluation. (Unidades de Vidrio Aislante o Doble Vidriado). (International, Engineering 360, 2019)
- ASTM C1048 de 2004: Standard Specification for Heat-Treated Flat Glass—Kind HS, Kind FT Coated and Uncoated Glass. (Vidrio plano tratado con calor, categoría termo endurecida (HS) y categoría templada (FT) con y sin recubrimiento). (International, Data Base Cart, 2018)
- ASTM C1172 de 2009: Standard Specification for Laminated Architectural Flat Glass. (Vidrio Laminado Plano para Arquitectura). (International, AENOR, 2010)

- ASTM C1422-99 de 2005: Standard Specification for Chemically Strengthened Flat Glass (Vidrio plano reforzado químicamente). (International, Engineering 360, 2005).
- ASTM E2353-06: Standard Test Method for Performance of Glass in Permanent Glass Railing Systems, Guards and Balustrades. (Materials, ASTM International, 2014).
- ASTM C1503 de 2008: Standard Specification for Silvered Flat Glass Mirror. (Espejos). (Materials, ASTM International, 2013)
- ASTM F1233-06: Standard Test Method for Security Glazing Materials and Systems. (Materials, ANSI Webstore, 2008).
- ASTM F1915-07a: Standard Test Methods for Glazing for Detention Facilities. (Materials, ASTM intrnational, 2010).
- ASTM C1422-99(2005) e1: Standard Specification for Chemically Strengthened Flat Glass. (Materials, ANSI Webstore, 2005)
- ANSI Z97.1 de 2004: American National Standard for Safety Glazing Materials Used in Buildings - Safety Performance Specifications and Methods of Test. (Se puede usar esta versión o versiones posteriores a esta que estén vigentes en el momento de su aplicación). (Institute, Morglass, 2003)
- NZC 4223:1999: New Zealand Standards. Estándar de nueva Zelanda: Vidrieras para edificios. Parte 3. (Business, 1999)
- ASTM C 162 de 1985: Standard Definitions of Terms Relating to Glass and Glass Products American Society for Testing and materials. (Materials, IHS Markit Standards Store, 2005)
- BS 3447 de 1984: Glossary of Terms used in the Glass industry. British Standards Institution. London. (Institute, ANSI webstore, 1984)
- Agenda 21: También adoptada en la Cumbre de la Tierra de Río. Se basa en principios de desarrollo sostenible, tomando la innovación tecnológica y la cooperación entre agentes sociales y económicos como ejes para el cambio. (Unidas, Biclioteca Semana, 2000)

- Declaración sobre Medio Ambiente y Desarrollo: Adoptada en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo de 1992, conocida popularmente como la “Cumbre de la Tierra de Río”, esta declaración establece 27 principios, muchos de los cuales ahora se consideran principios del derecho ambiental internacional. (Unidas, Decalración de Rio Sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1992)
- Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible: Plan de acción que nace del compromiso de los Estados miembro de las Naciones Unidas, cuyo objetivo principal es velar por la protección de las personas, el planeta y la prosperidad. (ONU, 2015)

2.8 Conclusiones del Capítulo

Después de hacer una revisión de la literatura se puede concluir preliminarmente que el vidrio es uno de los productos que tienen mayor incidencia en el consumo de energía, debido a las altas temperaturas que se requieren para su producción y ya que gracias a su auge en la construcción y aumento en su demanda se convirtió en uno de los elementos que más generan afectaciones al medio ambiente y aunque sea un producto que se puede reciclar en su totalidad, el proceso de reciclaje también conlleva inversiones y gastos en los que por lo general, no se desea invertir, y por ende, su reincorporación a los ciclos productivos se vuelve lento.

En los procesos de transformación se pueden llegar a generar hasta un 15% de material de desecho que se genera especialmente en el proceso de corte por rendimiento de lámina, lo que se cataloga como casco de vidrio, el cual puede ser recuperado en su totalidad para la generación de nuevo vidrio,

Dentro de los costos de transformación y temple de vidrio, el consumo de energía equivale alrededor de 12% de costo total de producción, siendo la materia prima el de mayor incidencia con un 55% de peso en donde está incluido el desperdicio por rendimiento de lámina.

En cuanto a los procesos de transformación y temple de vidrio, la literatura que se encuentra es muy limitada y esta se centra básicamente en el templado, pero de acuerdo con los diferentes procesos encontrados en la literatura, podemos definir las actividades de corte, biselado, perforado, lavado y temple como las principales para la realización de la simulación del proceso productivo, que nos permitirá llevar a cabo el estudio energético y posteriormente el estudio técnico económico.

3 Metodología

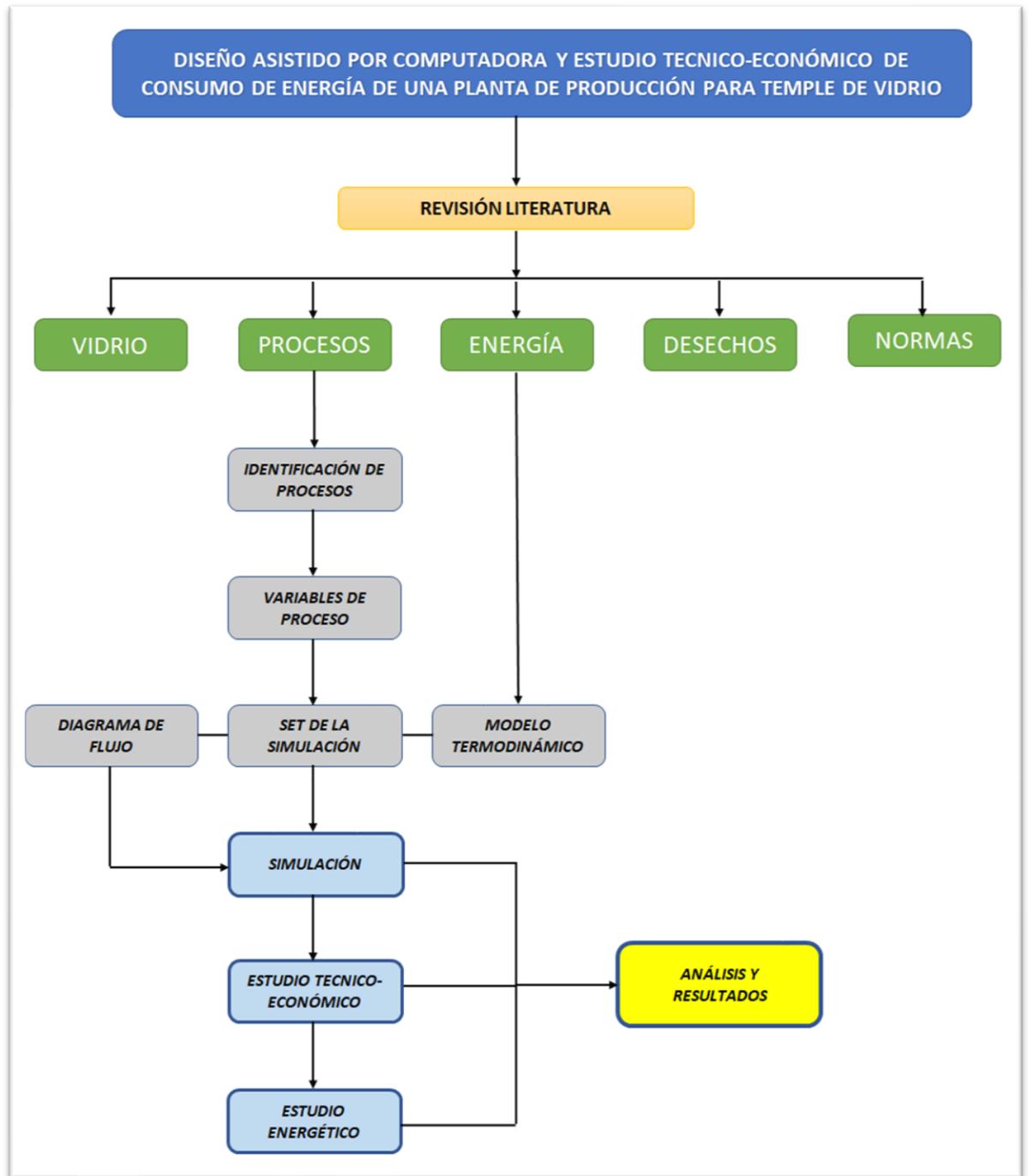
3.1 Metodología del Proyecto

Se realiza un proceso cuali-cuantitativo para el desarrollo metodológico de esta investigación, en donde en un principio los conceptos son parte del proceso de investigación siendo un apoyo para enunciar una realidad y posteriormente se convierten en variables clasificatorias y demostrables en su validez y confiabilidad. (Guerreo Dávila GUadalupe, 2014). En cuanto al método cuantitativo, es de carácter nomotético, cuyo objetivo es llegar a formular leyes generales, utilizando el método hipotético-deductivo enfocándose en datos que pueden ser medidos y cuantificados de forma estadística, en cambio, el método cuantitativo, es de tipo ideográfico, cuyo énfasis está en lo particular e individual, se orienta a encontrar cualidades específicas en aquello que se busca comprender y se inscribe en la subjetividad. (Hector., 2012)

Se hace una revisión de la literatura correspondiente a la materia prima esencial del proceso, el vidrio, sus procesos de fabricación, sus características, usos, desechos generados y consumo de energía para su transformación. También, se incluye literatura en cuanto a simuladores de procesos productivos y las diferentes normativas de carácter nacional e internacional que se aplican directamente al vidrio. Posteriormente con la información recolectada, se realiza un diseño de proceso productivo para la transformación y temple de vidrio, el cual nos permitirá realizar una simulación con el programa SuperPro Designer, como punto de partida para evaluar técnica y financieramente un proyecto de planta de vidrio templado, además de hacer un análisis del consumo de energía para el proceso.

En la siguiente figura se describe de manera resumida el desarrollo metodológico llevado a cabo en este estudio.

Figura 11: Desarrollo metodológico.



Fuente: Elaboración propia.

La figura muestra la secuencia de la investigación desarrollada, iniciando con la revisión de la literatura, enfocada en materiales, procesos, energía, desechos y normas, para posteriormente en cuanto al proceso, definirlos y estableciendo cada una de sus variables con el fin de determinar las bases de la simulación, lo que nos permitirá realizar los estudios energéticos y técnico-económico, con sus respectivos análisis y conclusiones.

3.2 Simulación de Procesos en SuperPro Designer

El SuperPro Designer es un programa computacional para realizar simulaciones de procesos productivos en estado estacionario. (Designer, 2020) El problema matemático que surge como consecuencia de una simulación corresponde a la solución de un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales del tipo:

$$F(X) = 0 \quad (2)$$

Donde:

X: Vector real de dimensión n.

F: conjunto de funciones reales de dimensión m, con $m \leq n$.

La función F representa el modelo matemático el proceso.

El simulador SuperPro Designer, facilita la modelación, diseño y optimización de procesos integrados en un amplio rango de industrias, tales como farmacéuticas, biotecnológicas, agroquímicas, alimenticias, tratamientos residuales y purificación de agua, entre otras. (Benitez Cortés Isnel, 2018) Investigadores han explotado el software para modelar diferentes aspectos de la energía renovable en los procesos. (Bakari Ramadhani, 2020)

En la siguiente tabla se muestran los equipos disponibles para cada una de las operaciones unitarias que son posible simular en el programa SuperPro Designer.

Tabla 4: Operaciones y equipos disponibles SuperPro

OPERACIÓN	EQUIPOS	OPERACIÓN	EQUIPOS
Reacción estequiométrica.	Well Mexied Reactor Fermentor Seed Fermentor Air Lift fermentor Plug Flow Reactor	Filtración	Microfilter Ultrafilter Diafilter Reverse OsmosisFilter Rotary Vacuum Filter Plate & Frame Filter Nutsche Filter/Dryer Dead and Filter Air Filter Belt Filter Granular Media Filter Baghouse Filter Electrostatic Precipita
Reacción cinética.	Continuosly Stirred Batch Reactor Plug Flow Reactor Equilibrium Reactor Batch Fermentor Continuos Fermentor		
Rompimiento celular	Homogenizer Bead Mill		
Sedimentación	Decanter Clarifier Thickener Flotation Tank Oil Separator	Centrifugación	Disk Stak Centrifuge Decanter Centrifuge Bowl Centrifuge Basket Filter Centrifuge Centritech Centrifuge Hydrocyclone Cyclone
Secado	Spray Drayer Fluid Bed Dryer Freeze Dryer Tray Dryer Drum Dryer Rotary Dryer Sludge Dryer	Destilación	Short Cut Destillation Batch Destillation Flash Drum
		Extracción	centrifugal Extractor Mixer Settler Extractor Differential Extractor
Cambio de Fase	Condenser Crystallizer Evaporator	Intercambio de calor	Heater Cooler Heat Sterilizer
Absorción	Absorver Stripper Adsorver		Cambio de Presión
Almacenamiento	Blending Tank Horizontal Tank Vertical on Legs Tank Flat Bottom Tank Receiver Tank Equalizer Junction Box	Reacción ambiental	Neutralizer Wet Air Oxidation Incinerator Aeration Basin Plug Flow Aeration Anaerobic Digester Trickling Filter Anoxin Reactor
Cromatografía	Gel Filtration		

	Ion Exchanger Multi-step Ion Affinity Column Multy-step Affinity	Mezcla y división de corrientes	N-Stream Mixer N-Stream Flow Splitter N-Stream Component Custom Mixer Custom Splitter
--	---	------------------------------------	---

Fuente: Elaboración propia a partir del manual de SuperPro Designer. (Designer, 2020)

La tabla especifica cuales son los equipos disponibles en las construcciones de las simulaciones de acuerdo con la operación que se requiera llevar a cabo.

A parte de la modelación de procesos, el SuperPro Designer contiene varias herramientas que le permiten la realización de cálculos de balances de masa y energía, dimensionamiento de equipos y una amplia base de datos para componentes y mezclas que permiten cálculos económicos y de rentabilidad de procesos, además de la caracterización de los residuales obtenidos. (Pérez Sánchez Amaury, 2020)

Además de la facilidad en cuanto a su manejo y el hecho de que sea de libre uso, las principales características del Software que influyeron en cuanto a determinar su utilización en este estudio, es que permite la inclusión de componentes sólidos, ya que posee bases de datos con materiales de construcción, y especialmente cuenta con agentes de transferencia de calor, que son indispensables en el caso del temple de vidrio.

Otra característica importante que posee el programa de simulación es permite realizar evaluación de costos, además de evaluaciones de impacto al medio ambiente y especialmente para este caso, calcular propiedades termodinámicas.

3.3. Identificación

Para el desarrollo de esta investigación se establecen los procesos básicos y equipos requeridos para la producción de vidrio templado, los cuales se relacionan a continuación.

No se incluyen procesos de recepción de materia prima ni despacho de producto terminado.

- Proceso de Corte de lámina.
- Proceso de Biselado de vidrio.
- Proceso de Perforado de vidrio.
- Proceso de Lavado de vidrio.
- Proceso de temple de vidrio.

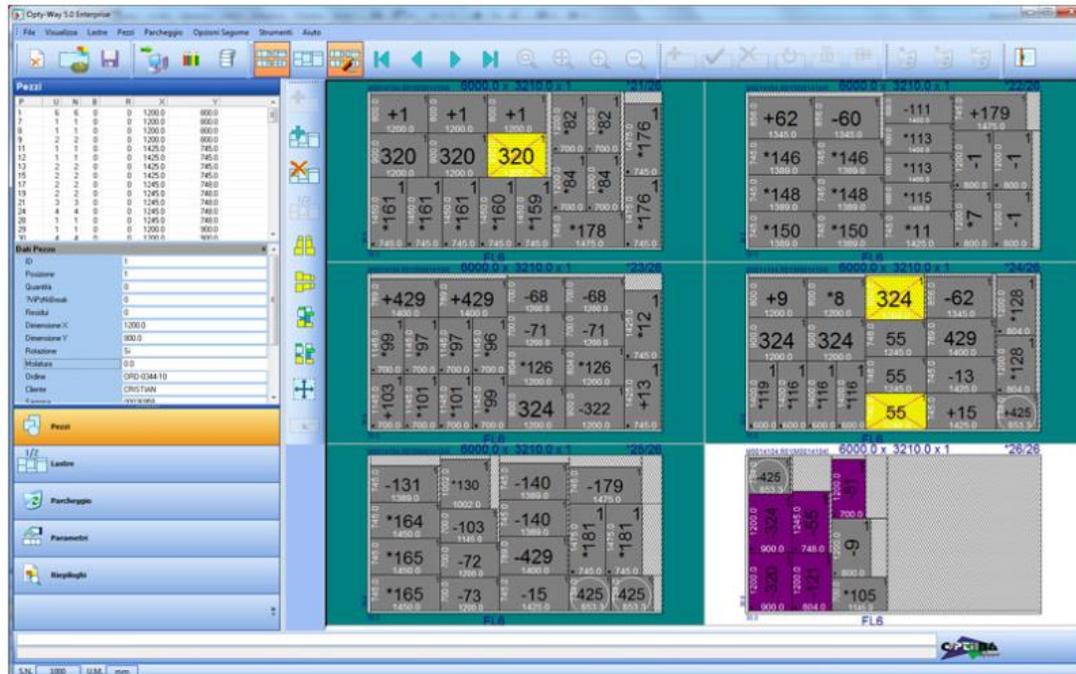
3.3.1. *Proceso de Corte de Lámina*

El corte es una operación de mecanizado crucial, utilizado en la producción de todo tipo de vidrio, que se realiza por lo general con sierra de diamante, por lo tanto, está limitado a geometrías simples, por ejemplo, formas rectangulares, con pobre acabado superficial y astillado de los bordes cortados. (Abia Hof Lucas, 2021). En este proceso se realiza el corte de la lámina de vidrio de acuerdo con las piezas solicitadas por los clientes, que posteriormente se dividen en pilas para procesarse en orden, las cuales no pueden contener ningún defecto, y de presentarse, han de ser ubicadas en las áreas de desechos. (Parreño F, 2020)

Los métodos convencionales se basan en la puntuación y el chasquido en los que una punta de diamante o un cortador de rueda se utiliza para marcar y debilitar la superficie del vidrio, más tarde, una fuerza externa es cuidadosamente aplicado para romper el vidrio a lo largo del camino de trazado. (Hof Lucas Abia, 2021) Aunque este método es económico, no proporciona una buena superficie en general del acabado de los bordes cortados y por lo tanto requiere el uso de procesos adicionales como esmerilado y pulido, para hacer un acabado superficial liso sin grietas ni astillado. (Wlodarczyk Krystian, 2015)

A continuación, se muestra la figura de una optimización tipo.

Figura 12: Optimización lámina mesa corte.



Fuente: Tomada del programa de optimización optima.

La figura muestra una optimización realizada de varias piezas en una lámina de vidrio, en donde las zonas grises son unidades para continuar con el siguiente proceso y las áreas en blanco dentro de la lámina corresponden a los sobrantes de esta, que se disponen como desechos en este caso casco de vidrio, que, por ende, impactan directamente el resultado del proceso.

3.3.2 Proceso de Biselado de Vidrio

El pulido es un proceso fundamental en la fabricación de vidrio de precisión, donde se mecaniza a la forma y superficie deseada y la rugosidad también se reduce gradualmente. Existen dos tipos de pulido se desarrollan en la actualidad, rectificado con abrasivo suelto y abrasivo fijo. (Li Yaguo, 2017) Debido a las características en cuanto a dureza y fragilidad

del vidrio, este debe ser procesado mecánicamente por medios abrasivos para eliminación de granos o rebabas, tales como esmerilado y biselado. El segundo es generalmente el proceso de mecanizado más importante para la fabricación de piezas de alto rendimiento, pero estos procesos son laboriosos debido a la eficiencia del proceso, por lo que la calidad de la superficie lograda por los procesos de biselado se vuelve extremadamente significativa. (Li ping, 2020)

El proceso de biselado utiliza una muela abrasiva de diamante con aglomerante metálico que es revestido electrolíticamente durante el proceso para asegurar que las protuberancias de las partículas abrasivas permanezcan constantes. (Chen Shun-Tong, 2010)

El pulido no debe dejar defecto tales como dislocaciones y micro fisuras, por lo que el proceso debe realizarse con suavidad y con materiales abrasivos finos. (Lawrence, 2021). Durante el pulido y posteriores procesos se genera polvo que se acumula con SiO₂ y otras impurezas, lo que genera un aumento de su contenido en los vertederos, conduciendo a la pérdida de recursos naturales. (Borra Chenna Rao, 2020)

A continuación, se muestra una figura con piezas de vidrio que han sido procesadas en corte y posteriormente con el proceso de biselado correspondiente.

Figura 13: Pulido de vidrio



Fuente: Imagen propia capturada en una fábrica de transformación de vidrio

La figura evidencia el cambio que tiene en sus bordes el vidrio, lo que permite la manipulación de forma más segura, además, le da más resistencia en el proceso final de temple. El material de vidrio retirado en este proceso se convierte en sedimento.

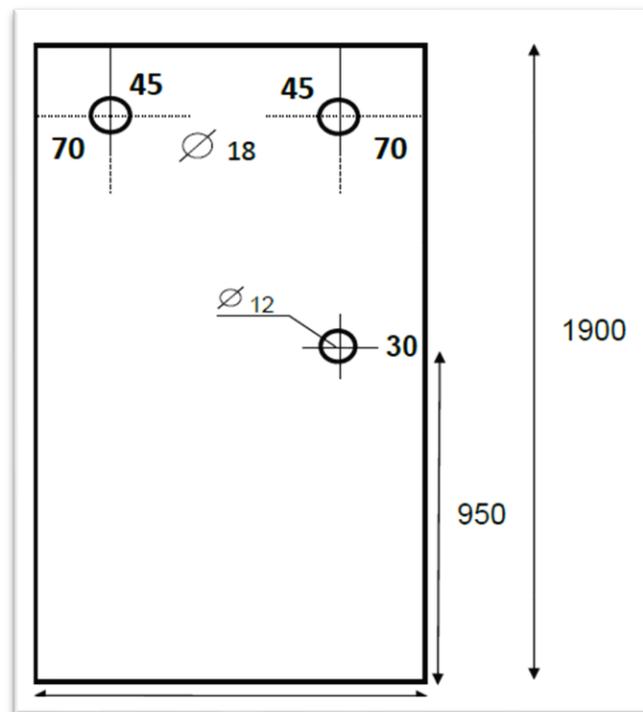
3.3.3. Proceso de Perforado

El taladrado es una de las operaciones secundarias más utilizadas para el ensamble de componentes de vidrio, pero el proceso es diferente que para los demás metales convencionales debido a su falta de homogeneidad. (Jena Hemalata, 2019) La calidad del agujero perforado depende de los parámetros de corte y de las especificaciones de la herramienta, como su material y su geometría. A medida que aumenta la velocidad de perforación, mejora la calidad del agujero. (Pallapothu Harika, 2019). De igual manera también es altamente influenciado por el diámetro de la broca y el espesor del vidrio. (Ashrith H.S, 2018)

El taladrado convencional es la operación de mecanizado más utilizada para realizar perforaciones en vidrio debido a su bajo costo, pero surgen muchos desafíos durante el proceso debido a la deformación producida en el área de contacto del taladro. (Devi Gapalakrishnan Ramya, 2018). De igual manera, debido al desgaste de la herramienta, se presentan problemas de astillado en la periferia de la perforación, lo que lo hace un obstáculo crítico para el proceso de taladrado y por ende repercute en la calidad del vidrio flotado. (Sharma Ankit, 2018)

En la siguiente figura se muestran las diferentes perforaciones realizadas a un vidrio.

Figura 14: Plano de vidrio



Fuente: Elaboración propia.

La figura corresponde al plano de un vidrio al que se le van a realizar las 3 diferentes perforaciones para ser utilizado en el montaje de divisiones de baño.

3.3.4. *Proceso de Lavado de Vidrio*

La calidad del vidrio depende mucho de los acabados de la superficie, y esto depende en una gran medida del proceso de lavado. La mejora de este proceso antes del temple, ayuda al mejoramiento de sus cualidades superficiales, por lo que el uso de compuestos de lavado reduce significativamente los defectos causados por las impurezas, ya que se requiere que las piezas estén completamente libres de polvo, por lo que es necesario pasarlas por un proceso de lavado. (Schicht H, 1997).

Después del pulido, el vidrio se lava con agua con un contenido de iones de fluoruro estrictamente fijo que no exceda 1,5mg/l. Sin embargo, la considerable cantidad de solución de fluoruro que se está tomando para los baños de lavado y como resultado los iones de fluoruro se concentran como impurezas en las aguas de lavado aumentando hasta 10 g/l y la del silicio hasta 4 g/l. (Povorov A.A, 2002).

Figura 15: Lavadora vertical para vidrio.



Fuente: Imagen propia capturada en una fábrica de transformación de vidrio

En la figura se muestra una lavadora vertical de tipo industrial utilizada en plantas de proceso de transformación de vidrio para la limpieza de piezas que van a continuar con el proceso de temple.

3.3.5. *Proceso de Temple de Vidrio*

El vidrio templado es uno de los productos más utilizados en la industria de la construcción debido a su relativamente alta resistencia a la tracción y su manera de fallo de manera segura al fragmentar. Esto se produce mediante el procesamiento de vidrio flotado recocido por calentamiento y posterior enfriamiento para generar tensiones en el vidrio. (Nielsen Jens T. K., 2021) Para aplicaciones específicas en arquitectura, el vidrio debe ser templado para hacerlo más resistente y seguro. En esta fase las deformaciones son limitadas, pero existe un acoplamiento entre la temperatura y relación de las tensiones. (Béchet Fabien, 2014)

El proceso de templado del vidrio consiste básicamente en el calentamiento del vidrio por encima de la temperatura de transmisión, para luego enfriarlo repentinamente a temperatura ambiente. (Fan Bao-Wei, 2015) Cuando el vidrio caliente se enfría rápidamente por debajo de su temperatura de transición, se producen altos gradientes de temperatura en todo su espesor. Mientras que las capas superficiales tienden a encogerse por solidificación que causa tensión en la superficie y compresión en el plano medio con mayor temperatura y menor viscosidad que en la superficie (Mehmet, 2016).

Durante este proceso que dura unos segundos, un chorro de aire a alta presión golpea la superficie del vidrio desde una serie de boquillas en diferentes posiciones. El aire enfría las superficies exteriores más rápido que el centro, como resultado el centro permanece en tensión y las superficies exteriores entran en compresión, lo que le da al vidrio templado su fuerza. (Almutairi Naif, 2015) En comparación con los métodos tradicionales de templado físico, el método de enfriamiento por aspersión tiene una serie de ventajas, como un menor consumo de energía y una mejor calidad de templado. (Yang Hua, 2022)

En la figura siguiente se muestra un equipo estándar para temple de vidrio plano.

Figura 16: Horno de temple de vidrio.



Fuente: Distribuidores de hornos Glasstek

En la figura se muestra un horno de temple de vidrio convencional, el cual está dividido en zonas, la de carga, calentamiento, enfriamiento y zona de descarga. En la zona de calentamiento se eleva la temperatura del vidrio hasta los 650°C para posteriormente en la zona de enfriamiento o chiller, bajar a temperatura ambiente el mismo de forma muy rápida. (Seo kyeongjun, 2019)

3.4 Variables de Proceso

Se debe recurrir con frecuencia a los datos recopilados con el fin de comprender mejor los procesos, para que de esta manera sean abordados de acuerdo a los objetivos establecidos y por medio de modelos y procedimientos modificarlos para lograr su mejora. (Kourti, 2020) básicamente, las variables de proceso son las condiciones físicas o químicas que son de

interés para su control ya que pueden alterar el desempeño del proceso mismo. (Pérez Martínez Jineth, 2017)

De acuerdo con la información recopilada del proceso, se establecieron las variables que determinan su desempeño y que son esenciales para la generación de la simulación.

La primera variable es la potencia requerida de la maquinaria utilizada en el proceso, para la cual se realizó una revisión de cada una de las placas de los equipos que intervienen en el proceso para establecer las especificaciones de los motores y la potencia de cada uno.

Para el proceso de corte se utilizará como equipo guía una máquina del fabricante de equipos Glaston Tianjin Co, con referencia UC 300 con 4 años de operación, con medidas máxima de 4.3 metros x 3.3 metros, con mantenimientos preventivos periódicos de acuerdo a recomendaciones del fabricante, el equipo cuenta con cargador automático de lámina con tamaño máximo 3.66 x 2.6 metros.

Para el proceso de biselado se utilizará el consumo por placa de una máquina rectilínea para cantos referencia Gemy V10 con ángulo variable del fabricante Babelloni con 6 años de uso con reparaciones periódicas de acuerdo con recomendaciones del fabricante. Los taladros son dos equipos con las mismas características e igual potencia, del fabricante Glaston China Co. Con 4 años de uso y reparados recientemente con cambio de rodamientos y retenedores.

La lavadora es de tipo vertical con capacidad de entrada de 2.5 metros de altura de origen chino, del fabricante Han Jiang, con un total de 6 rodillos, 4 para uso de vidrio monolito y 2 para vidrios bajo emisivos como Low-E. Tiene 4 años de uso con mantenimientos preventivos de acuerdo a recomendaciones del fabricante.

Por último, el horno utilizado para esta simulación es el Tamglas HTF-2136 referencia ABT-10-L, fabricado por la empresa finlandesa Tamglass Engineering, con 10 años de uso.

Es un horno convencional de temple de vidrio plano por radiación con capacidad de temple para espesores desde los 4 mm hasta los 19 mm, con medidas máximas de entrada de 2.100 mm por 3.600 mm. Con variador de frecuencia para arranque de turbinas.

En la tabla 5, se muestra el consumo por placa de cada uno de los equipos utilizados en los procesos unitarios.

Tabla 5: Potencia de equipos para procesamiento de vidrio.

PROCESO	EQUIPO	VOLTAJE	FRECUENCIA	POTENCIA
CORTE	Mesa de corte	400	50/60 HZ	23 KW
BISELADO	Rectilínea	400	50 HZ	25 KW
PERFORADO	Taladro # 1	400	50/60 HZ	4,5 KW
	Taladro # 2	400	50/60 HZ	4,5 KW
LAVADO	Turbina de secado	380	60 HZ	45 KW
	Transmisión entrada	380	50 HZ	0,4 KW
	Transmisión salida	380	50 HZ	0,4 KW
	Bomba de agua	380	60 HZ	1,85 KW
	Cepillo # 1	380	50/60 HZ	0,37 KW
	Cepillo # 2	380	50/60 HZ	0,37 KW
	Cepillo # 3	380	50/60 HZ	0,37 KW
	Cepillo # 4	380	50/60 HZ	0,37 KW
	Cepillo # 5	380	50/60 HZ	0,37 KW
Cepillo # 6	380	50/60 HZ	0,37 KW	
TEMPLE	Resistencias	440	60 HZ	468 KW
	Transmisión	440	60 HZ	6,3 KW
	Compresor	440	60 HZ	201 KW
	Turbina	440	60 HZ	160 KW

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 5 muestra la relación de cada uno de los equipos que generan consumos de energía para cada uno de los procesos unitarios, además de la potencia requerida para operación.

La segunda variable para tener en cuenta son las entradas y salidas de cada proceso, que corresponde a los rendimientos que cada operación unitaria tiene y que miden el desempeño de los procesos y que se requieren para la simulación.

En tabla 6 se muestran las entradas y salidas de cada uno de los procesos unitarios y sus respectivos rendimientos.

Tabla 6: Entradas y salidas del proceso

ENTRADAS – SALIDAS			
PROCESO	ENTRADA	SALIDA	RENDIMIENTO DEL PROCESO
CORTE	9,52 M	8,38 M	88 %
BISELADO	8,38 M	8,05 M	96 %
PERFORADO	8,05 M	8,04 M	99 %
LAVADORA	8,04 M	8,04 M	100 %
TEMPLE	8,04 M	7,90 M	98 %
RENDIMIENTO DEL PROCESO			83%

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se determina el rendimiento del proceso, el cual corresponde a la entrada al proceso de una lámina de vidrio estándar con medidas totales 3,66 metros de ancho y 2,6 metros de alto y sus respectivos porcentajes de desperdicios por pérdida de material en cada proceso unitario. El rendimiento total del proceso es del 83%

La tercera variable es la mano de obra, que corresponde a los operarios que intervienen en cada uno de los procesos unitarios. Para cada una de las operaciones se determinan las necesidades de personal teniendo en cuenta un aspecto de seguridad y ergonomía, debido a las características de fragilidad del material y los daños que puede causar debido a una mala manipulación, en algunas operaciones unitarias es necesario disponer de más de un operario.

En la tabla 7 se relacionan la cantidad de operarios por proceso unitario.

Tabla 7: Relación del personal que interviene en el proceso

PERSONAL	
PROCESO	CARGO
CORTE	Operario de corte
BISELADO	Operario de rectilínea Auxiliar de rectilínea
PERFORADO	Operario de taladro # 1 Operario de taladro # 2
LAVADORA	Auxiliar de lavadora
TEMPLE	Operario de horno Auxiliar de horno

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se establece el personal que interviene en el proceso de temple de vidrio en una planta de producción tipo, en total 8 operarios. En las operaciones unitarias de biselado, perforado y temple se requieren dos operarios para facilitar la manipulación de las piezas de vidrio.

3.5 Set de la Simulación

A continuación, se presenta el set de la simulación en el programa SuperPro Designer del proceso productivo de transformación y temple de vidrio con las respectivas variables establecidas en el capítulo anterior.

Para esta simulación se estableció un proceso por batch o por lote correspondiente a 4 láminas de vidrio con medidas totales 3.66 metros de largo por 2.66 metros de ancho y 6 milímetros de espesor, medidas estándar suministradas por el proveedor de lámina. Además, porque estas son las unidades que se pueden procesar en una hora en la mesa de corte y por ende, es lo que ingresa al proceso productivo.

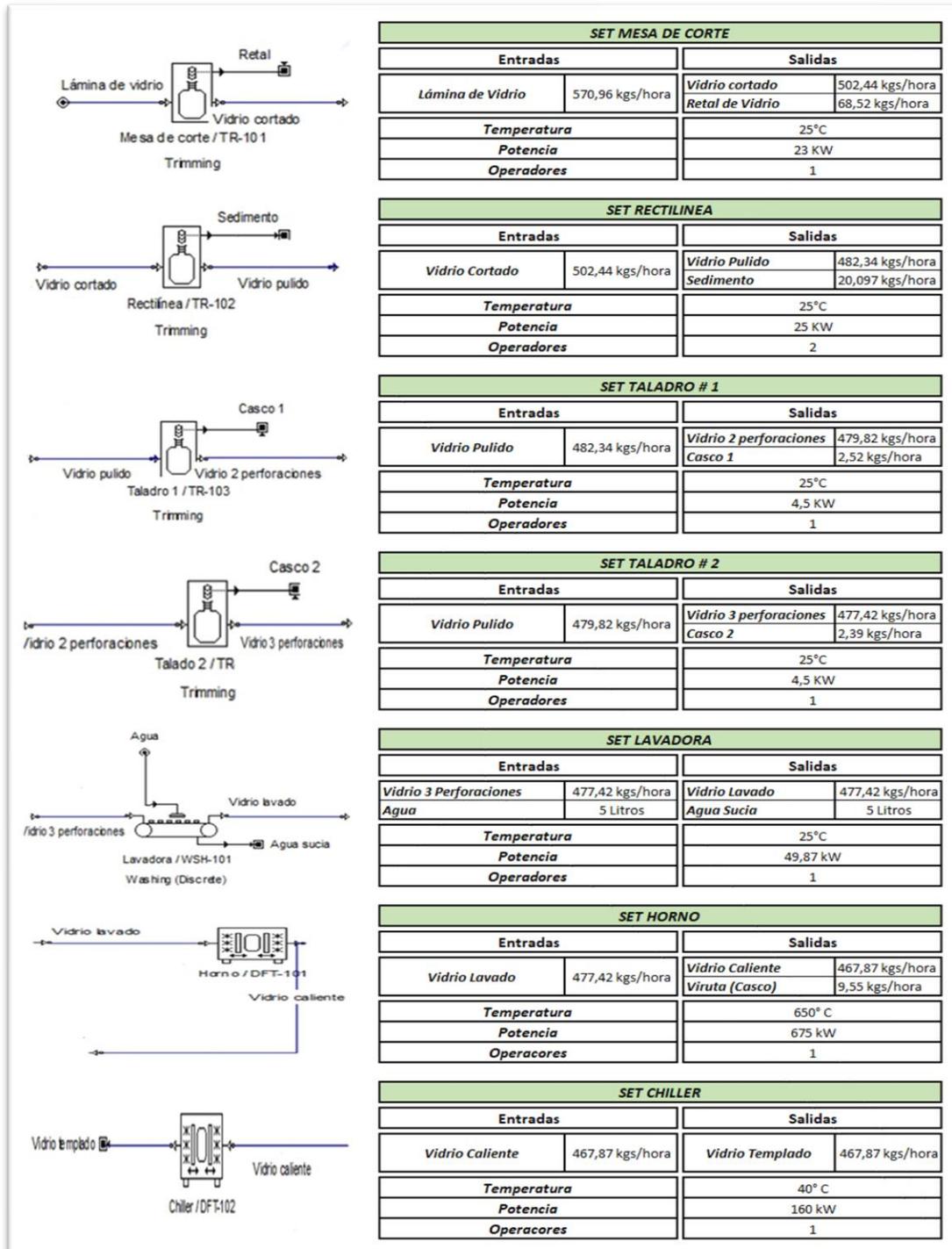
Las operaciones unitarias correspondientes al set de simulación son las siguientes.

- Mesa de Corte
- Rectilínea.
- Taladro # 1.
- Taladro # 2.
- Lavadora.
- Horno.
- Chiller.

Aunque el proceso de temple se lleva a cabo en el mismo equipo, un horno de templado convencional, es necesario dividirlo en dos zonas, la primera zona es la de calentamiento, en donde se ubican las resistencias que generan el aumento de temperatura por radiación del vidrio, llevándolo a los 650°C aproximadamente, y la segunda zona, de enfriamiento o chiller, en donde se aplica aire a presión para reducir la temperatura de la pieza hasta los 40°C.

En la figura 18 se muestra en resumen las variables que se tienen en cuenta para el set de la simulación, tanto las cantidades de entrada al proceso, como las respectivas unidades de salida, con sus correspondientes desperdicios, además se establece la potencia requerida para el desarrollo de cada operación unitaria, la temperatura del proceso y los operarios que intervienen.

Figura 17: Set de la simulación.



Fuente: Elaboración propia a partir de SuperPro Designer

En la figura se muestra cómo se representan cada una de las operaciones unitarias y/o equipos de acuerdo con su respectivo diseño en el programa de simulación SuperPro Designer.

La simulación refleja el comportamiento de las piezas de vidrio a través de cada una de las operaciones unitarias del proceso de producción, a partir de ingreso de la lámina de vidrio al proceso de corte, y posteriormente refleja el consumo de energía y desperdicios en cada uno de los equipos simulados. También refleja las condiciones reales del proceso en cuanto a temperatura y presión, al igual que los recursos en cuanto a mano de obra requerida.

Es indispensable la utilización del software SuperPro Designer en este estudio, debido a que nos permitió simular de la manera más real el comportamiento de un horno de temple en un proceso de producción. Dentro de los equipos disponibles de la barra de herramientas del programa se contaba con uno que podía simular el incremento exponencial de temperatura que sufría el material y otro que de igual manera simulaba el enfriamiento rápido de la pieza en las mismas condiciones que en el proceso real.

Para este estudio se simuló el proceso de transformación y temple de lámina de vidrio monolítico con un espesor de 6 mm, para la producción de piezas con bordes pulidos y brillados con 3 perforaciones que son utilizadas como puertas de seguridad de sistema corredizo para divisiones de baño estándar, por lo que de ser necesario, se podría realizar variaciones en cuanto al espesor del material, la medida de las piezas e incluso la cantidad de perforaciones, que podrían variar las velocidades de proceso, pero que no modificarían las condiciones en cuanto a temperatura, presión y operarios requeridos, ya que estos no tienen variaciones al modificar estos parámetros.

El modelo con sus respectivos resultados será validado al final del estudio comparándolos con las mediciones realizadas a una planta de producción tipo con las mismas características y equipos que se tienen en esta simulación.

3.6 Modelo Termodinámico

La termodinámica es una rama de la física que se encarga de estudiar las transformaciones de la energía en relación con el calor y el trabajo mecánico. El significado de termodinámica deriva del griego thermo que significa «calor» y dynamis que significa «potencia». (Diplakiz, 2010). Una de las aspiraciones centrales de la termodinámica es determinar las condiciones de presión, temperatura o densidad que permiten a cierto material mantenerse en estado de agregación particular. (Ramirez Gonzalez, 2019).

El modelo de la operación de lavado resuelve los balances de masa y energía en función de la cantidad a granel por entidad y la composición de las entidades discretas en la corriente de alimentación. Los siguientes balances de masa de componentes se resuelven con base en la suposición de que no ocurre transferencia de masa desde la corriente de lavado hacia la corriente de alimentación o hacia la lavadora

$$m_{p,i} = (1 - x_i)m_{F,i} + rm_{w-in,i} \quad (3)$$

$$m_{w-out,i} = (1 - r)m_{w-in,i} + x_im_{F,i} \quad (4)$$

Donde:

- m_f es el caudal másico del componente de la alimentación.
- m_p es el caudal másico del componente en la corriente del producto.
- m_{wi} es el caudal másico del componente en la corriente entrada de lavado
- m_{wo} es el caudal másico del componente in la corriente de salida de lavado
- x es la fracción de masa el componente que se elimina de corriente de alimentación por la corriente de lavado.

Para el caso del horno, específicamente en el proceso de calentamiento, para la corriente de calentamiento constante (dT/dt), se utiliza la siguiente ecuación para calcular la tasa de calentamiento o el tiempo de procesamiento (tp).

$$\Delta T = - \left(\frac{dT}{dt} \right) tp \quad (5)$$

Donde $\Delta T = T_1 - T_0$ es el estado de la temperatura final menos la inicial.

Si se selecciona una tasa de calentamiento exponencial, el tiempo total del proceso se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$tp = \frac{MCp}{UA} \ln \left(\frac{T_H - T_0}{T_H - T_1} \right) \quad (6)$$

Donde T_H es la temperatura de entrada del agente de calentamiento T_0 , T_1 son la temperatura inicial y final del contenido del recipiente respectivamente y MC es un término colectivo que representa la suma del contenido del recipiente y la capacidad calórica del equipo ($kcal/^\circ C$).

El balance de energía para todos los equipos de calefacción no se debe ignorar. La tasa de transferencia de calor promedio (Q) o la potencia (P) se calcula usando las siguientes ecuaciones.

$$Q = P = \frac{MCp\Delta T}{ntp} \quad (7)$$

Donde n es la eficiencia de calentamiento.

Para el caso del chiller, los cálculos del balance de energía se realizan entrelazando el flujo de entidades discretas como flujo a granel y asumiendo que las corrientes de alimentación y enfriado se mezclan adiabáticamente y alcanzan un cierto nivel de equilibrio

térmico. El enfoque del factor de equilibrio térmico se utiliza como una medida de la transferencia de calor entre las corrientes de alimentación y enfriado. Se define como la relación de la diferencia de temperatura real entre la corriente de alimentación y la corriente de producto a la diferencia de temperatura que tendrían las dos corrientes si las de producto y enfriado alcanzaran el equilibrio térmico.

La temperatura se calcula en función de las especificaciones de datos para el flujo de estado del procedimiento correspondiente. Según lo anterior, la temperatura de producto se calcula mediante la siguiente expresión.

$$f = \frac{T_f - T_p}{T_f - T_{eq}} \quad (8)$$

Donde:

- f es la aproximación al factor del equilibrio térmico.
- T_f es la temperatura de la corriente de alimentación.
- T_p es la temperatura de la corriente del producto.
- T_{eq} es la temperatura de equilibrio del producto.

De igual manera, la temperatura del producto puede ser configurada directamente por el usuario. En ambos casos, la temperatura de las corrientes de enfriado se calcula en función del balance de energía general en el chiller.

$$hf + h_{wi} = h_p + h_{wo} \quad (9)$$

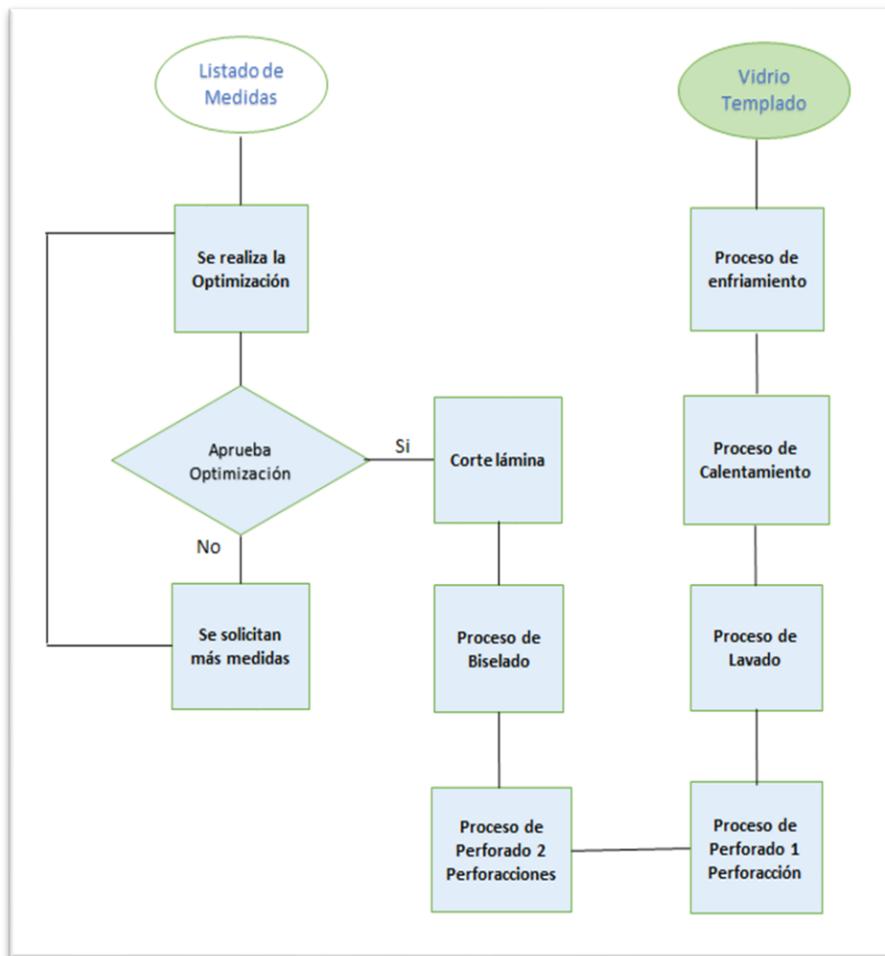
Donde:

- hf es la entalpía de corriente de alimentación
- h_{wi} es la entalpía de la corriente del producto
- h_p es la entalpía de la corriente de entrada de lavado
- h_{wo} es la entalpía de la corriente de salida de lavado

3.7 Diagrama de Flujo de Proceso

A continuación, se presenta el proceso de producción para el temple de vidrio mediante un diagrama de flujo de forma sintética.

Figura 18: Diagrama de flujo de proceso mecanizado y temple de vidrio.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura se muestra como el proceso comienza con la optimización de cada una de las medidas de los vidrios en las que se va a dividir la lámina para que luego cada una de las piezas continúe por cada proceso unitario, hasta el último correspondiente al temple.

3.8 Conclusiones del Capítulo

Para la realización de este estudio es posible estandarizar los procesos de transformación y temple de vidrio, debido a la similitud en cuanto al tipo, capacidad y distribución de la maquinaria y equipo utilizados en cada una de las plantas visitadas. Lo que facilitara la implementación de mejoras obtenidas en este estudio a la mayoría de las empresas que desarrollan esta actividad.

El proceso productivo tiene un desperdicio global del 18.06%, debido a que en corte ingresan 570.96 kilogramos de producto en una hora y al finalizar el proceso después del templado únicamente salen 467.87 kilogramos de vidrio.

El consumo total de los equipos para el desarrollo de la actividad productiva es de 942,17 kW, y el proceso unitario que más consume es el temple, el cual tiene un consumo por placa en total de 835,3 kW, correspondiente al 88.66% del total del requerimiento energético del proceso.

El desarrollo metodológico planteado, permite establecer de manera clara a partir de la literatura, los diferentes procesos y sus variables a tener en cuenta dentro del diseño de la simulación de una planta de producción de vidrio templado, para que de esta manera refleje de manera más exacta el sistema. Esto permitirá que podamos anticipar el desempeño del proceso, y de igual manera, facilitara realizar ajustes de dichas variables con el fin de obtener óptimos de desempeño con un nivel de inversión mínima.

El programa SuperPro Designer nos permitió modelar los cinco procesos identificados en el desarrollo del capítulo, tales como, corte, biselado, perforado, lavado y temple, al igual que las variables de proceso como consumo de equipos, rendimientos y mano de obra. También se logró simular el recorrido de la materia prima a lo largo del proceso, por lo que es posible adelantar el estudio energético con un nivel de certeza cercano al real.

4. Resultados

4.1 Descripción de la Simulación

Se procede al modelamiento del proceso de transformación y temple de vidrio correspondiente al flujo de proceso del capítulo anterior (figura 19), en donde se simulan las operaciones unitarias que son requeridas, centrándonos en el consumo y aprovechamiento de la energía. Las variables para tener en cuenta son las establecidas en el aparte 3.3.1, el rendimiento de proceso, la potencia por placa de los equipos que intervienen y los operarios requeridos.

En la siguiente tabla se presentan las variables de proceso para cada operación unitaria.

Tabla 8: Variables proceso para simulación en SuperPro Designer.

OPERACIÓN	ENTRADAS KG/HORA	RENDIMIENTO DEL PROCESO	SALIDAS KG/HORA	POTENCIA	OPERARIOS
CORTE	570,96	88,00 %	502, 44	23 KW	1
RECTILÍNEA	502, 44	96, 00 %	482, 35	25 KW	2
TALADRO # 1	482,35	99,50 %	479,94	4,5 KW	1
TALADRO # 2	479,94	99,50 %	477,54	4,5 KW	1
LAVADORA	477,54	99,98 %	477,54	48,87 KW	1
HORNO	477,42	98, 00 %	467,87	835,3 KW	2

Fuente: Elaboración propia a partir de variables de proceso establecidas.

En la tabla se muestra para cada operación unitaria sus respectivas entradas, rendimientos esperados, la potencia de los equipos que intervienen en el proceso al igual que los operarios requeridos para el desarrollo de cada actividad.

De igual manera, se requiere realizar la creación del material en el SuperPro Designer, en este caso se crea el vidrio, y esto de acuerdo con la composición química del material, como se muestra en la tabla 9, cuyo porcentaje corresponde a un aproximado de sus

componentes principales de acuerdo con la revisión de la literatura establecida en el capítulo 2 de este estudio, como el silicato sódico, el óxido de calcio, el óxido de aluminio y e trióxido de azufre.

En la siguiente tabla se especifican los porcentajes de cada uno de los elementos que componen el vidrio para su respectiva creación en el programa de simulación.

Tabla 9: Composición del material para ingreso al SuperPro Designer.

NOMBRE	FORMULA QUÍMICA	PORCENTAJE EN MASA
Silicato sódico	Na_2SiO_3	86,4391 %
Óxido de calcio	CaO	10,9999 %
Oxido de aluminio	Al_2O_3	1,3600 %
Trióxido de azufre	SO_3	1,2000 %
Carbonato de calcio	CaCO_3	0,0010 %

Fuente: Elaboración propia a partir de literatura.

La tabla muestra como dentro de la composición del vidrio el mayor porcentaje corresponde al silicato sódico, y también se incluye al carbonato de calcio como impurezas de la superficie del vidrio.

El vidrio ingresa al proceso en forma de láminas con medidas externas totales 3.66 metros de ancho y 2.6 metros de altura con un espesor de 6 milímetros. A cada lámina en adelante se le denominará entidad y su unidad de medida estará dada en kilogramos. Para el caso de cada entidad el peso establecido es de 142.80 kg, que se calcula multiplicando el área de la lámina por su espesor y luego por la densidad del material, que para el caso del vidrio es de 2.5 kg/m².

En la siguiente tabla se muestra como ingresa cada entidad al programa de simulación. Esta información es obtenida directamente del SuperPro Designer.

Tabla 10: Composición del vidrio.

COMPOSICIÓN ENTRADA CORTE	
COMPONENTE	MASA %
Al ₂ O ₃	1,3600
CaCO ₃	0.0010
CaO	11,0000
Na ₂ SiO ₃	86,4391
SO ₃	1,20
TOTAL, MASA	12.058,6752 kg/d
TEMPERATURA	25° C
PRESION	1.01 bar

Fuente: Programa SuperPro Designer.

En la tabla se muestra el componente y su respectivo porcentaje en masa y adicional, la masa total que ingresa a la simulación, y establece la respectiva temperatura y presión del sistema.

La mesa de corte procesa 4 láminas de vidrio por hora, por lo que en total al proceso ingresarían 4 entidades con un peso total de 570.96 kg, de los cuales el 0.00001% corresponden a impurezas, que posteriormente deben ser removidas en la lavadora.

En la siguiente tabla se muestra el ingreso al proceso de corte por hora de vidrio.

Tabla 11: Entradas a proceso de corte.

ENTRADAS PROCESO DE CORTE			
MATERIAL	TASA DE FLUJO (k/h)	% EN MASA	CONCENTRACIÓN (g/l)
Vidrio	570,65429	99.9990	2,49997
Impurezas	0,00571	0.0010	0.00003

Fuente: Programa SuperPro Designer

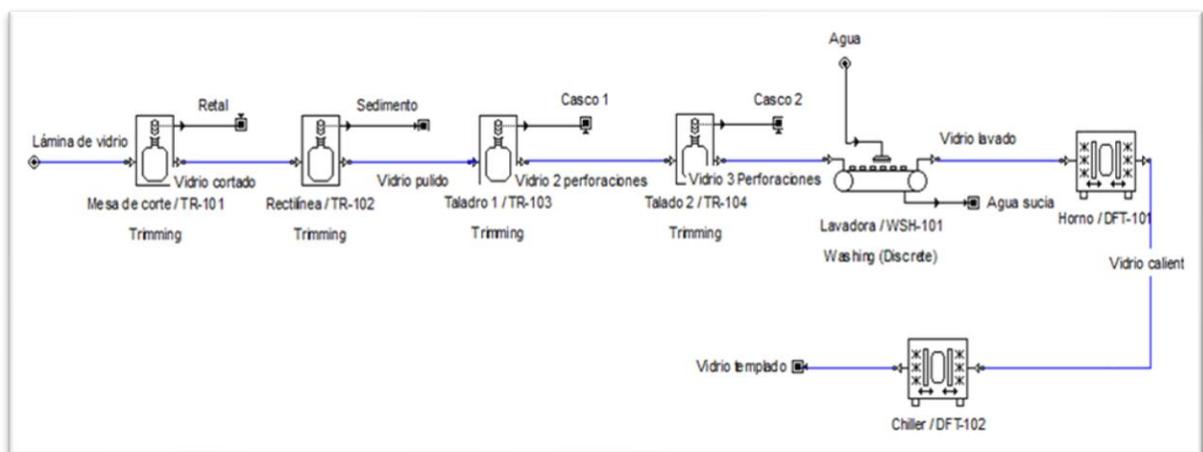
La tabla muestra la tabla de flujo que ingresa al proceso e incluye el porcentaje en masa de impurezas que posteriormente deben ser removidas. La concentración corresponde a la densidad del material.

Se procede a la creación de cada una de las operaciones unitarias que más se ajusten a las condiciones establecidas por el programa, de acuerdo con el set de simulación establecido en el aparte 3.3.2, los cuales deben cumplir con las correspondientes entradas al proceso, sus respectivas salidas que incluyen residuos y desperdicios, además de la potencia requerida por cada operación unitaria.

La simulación describe la realidad del proceso, con las operaciones unitarias de forma secuencial y con los desempeños reales de cada una de ellas, con las respectivas entradas y salidas en las que se incluyen los desperdicios y desechos.

El diagrama de proceso resultado de la simulación se muestra en la figura 20.

Figura 19: Simulación del proceso en SuperPro Designer



Fuente: Programa SuperPro Designer.

La figura muestra de forma secuencial el proceso de transformación y temple de vidrio dentro de la simulación, con cada una de las operaciones unitarias.

De forma más clara, a continuación, se muestran las corrientes del proceso para entender las entradas y salidas de cada proceso unitario en la simulación.

Tabla 12: Corrientes del proceso

Proceso unitario	Entradas	Salidas
Mesa de Corte	Lamina de Vidrio de 6 mm de espeso de 3,66 de ancho x 2,6 metros alto	Vidrio cortado para proceso de acuerdo con medidas solicitadas
		Retal de vidrio.
Rectilínea	Vidrio cortado de acuerdo medidas solicitadas	Vidrio con bordes pulidos
		Sedimento de vidrio
Taladro # 1	Vidrio con bordes Pulidos	Vidrio con 2 perforaciones de 18 mm de diámetro
		Casco de vidrio
Taladro # 2	Vidrio con 2 perforaciones	Vidrio con 1 perforación adicional de 12 mm de diámetro
		Casco de vidrio
Lavadora	Vidrio con 3 perforaciones	Vidrio lavado
	Agua	Agua con sedimento de vidrio
Horno	Vidrio Lavado	Vidrio caliente 650°C
Chiller	Vidrio Caliente a 650°C	Vidrio Templado 40°C

Fuente; Elaboración propia

La tabla refleja el comportamiento real del proceso, cada una de las operaciones desarrolladas y las entradas y salidas que se generan en cada operación, desde el ingreso del vidrio como materia prima en láminas, hasta la salida como producto terminado.

Le resultado de la simulación corresponde a la salida de material templado luego de la realización de cada una de las operaciones unitarias con sus respectivos consumos, y asumiendo cada uno de los rendimientos.

En la siguiente tabla se muestra el resultado final que arroja la simulación correspondiente a cada uno de los componentes del vidrio.

Tabla 13: Salidas de proceso en SuperPro Designer.

SALIDA PROCESO DE TEMPLE	
COMPONENTE	MASA %
Al ₂ O ₃	1,36
CaO	11,00
Na ₂ SiO ₃	86,44
SO ₃	1,20
TOTAL, MASA	467.8741 kg/h
TEMPERATURA	40° C
PRESION	1.01 bar

Fuente: Programa SuperPro Designer.

La tabla muestra el resultado final de la simulación, obteniendo 467.8741 kg/hora de vidrio templado, correspondiente a 31,59 metros cuadrados de producto.

4.2 Estudio Técnico Económico

Para este estudio se parte de una proyección de ventas de acuerdo con la capacidad y rendimiento de cada proceso, asumiendo que se logra la venta de la totalidad de los metros cuadrados producidos de vidrio templado a partir del inicio de las operaciones, también se proyecta laborar un solo turno. Las cifras correspondientes a los metros cuadrados procesados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 14: Producción vidrio anual.

PRODUCCIÓN VIDRIO TEMPLADO	
M2 Lámina	9,52 M2
Rendimiento lámina	83 %
Ingreso al proceso	7,90 M2
Láminas hora	4 unidades
Producción Hora/M2	31,59 M2
Horas día	9,25 horas
Producción día/M2	292,24 M2
Días laborales al año	264 días/año
Producción año/M2	77,150 M2

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se muestra la proyección de producción. Al año se estima una producción de 77.150 m² de vidrio templado, que corresponde a los datos arrojados por la simulación del proceso productivo en el SuperPro Designer

El precio promedio de venta de vidrio templado de acuerdo con el mercado en este momento se sitúa en \$ 75.500 m². Para un total de ventas estimadas para el primer año de \$ 5.824'825.128.

En la siguiente tabla se relacionan el costo de la inversión a realizar correspondiente a máquinas y equipos. Estos equipos son los requeridos para desarrollar cada uno de los procesos unitarios.

Tabla 15: Maquinaria para el desarrollo del proceso.

MAQUINARIA	
Mesa de corte	\$ 323'000.000
Rectilínea	\$ 121'600.000
Taladro # 1	\$ 24'700.000
Taladro # 2	\$ 24'700.000
Lavadora	\$ 171'000.000
Horno	\$ 1.145'000.000
Total, maquinaria	\$ 1.810'000.000

Fuente; Elaboración propia.

La tabla muestra el total de la inversión en cuanto a equipos para el desarrollo de este proyecto el cual asciende a \$1.800'100.000. Este montó incluye el valor de compra de cada uno de ellos más los costos de instalación en la planta.

Adicional a la maquinaria para el procesamiento y transformación de vidrio, se requiere la compra de equipos de apoyo al proceso, tales como un compresor para el sistema de aire, debido a que todos los equipos tienen sistemas neumáticos para su funcionamiento, un puente grúa para el descargue y almacenamiento de las láminas de vidrio y se debe contar con una subestación eléctrica debido a la potencia que requieren las máquinas, especialmente por el alto consumo del horno de temple.

La subestación eléctrica debe tener una capacidad de acuerdo con el diseño de 1.200 KVA'S de potencia.

Los equipos de apoyo y sus respectivos costos de inversión se muestran en la tabla 9.

Tabla 16: Costos equipos de apoyo.

EQUIPOS	
Puente grúa	\$ 150'000.000
Compresor	\$ 35'000.000
Subestación eléctrica	\$ 450'000.000
Total, equipos	\$ 635'000.000

Fuente: Elaboración propia.

Se muestran en la tabla los costos totales de inversión en cuanto a equipos de apoyo que ascienden a \$ 635'000.000, en los cuales también están incluidos los costos de instalación. En cuanto a la subestación eléctrica, también se incluyen los costos de las redes de alimentación para cada equipo y el sistema de iluminación de la planta de producción.

Para la ubicación de la planta de producción se requiere una bodega de aproximadamente 1.410 m² para realizar la acomodación de todos los equipos como se ve en la figura 21. El precio de esta bodega en las afueras de Bogotá se estima en \$ 11.000 por metro cuadrado para arriendo, por lo que el monto total de este rubro sería de \$ 15'510. 000.

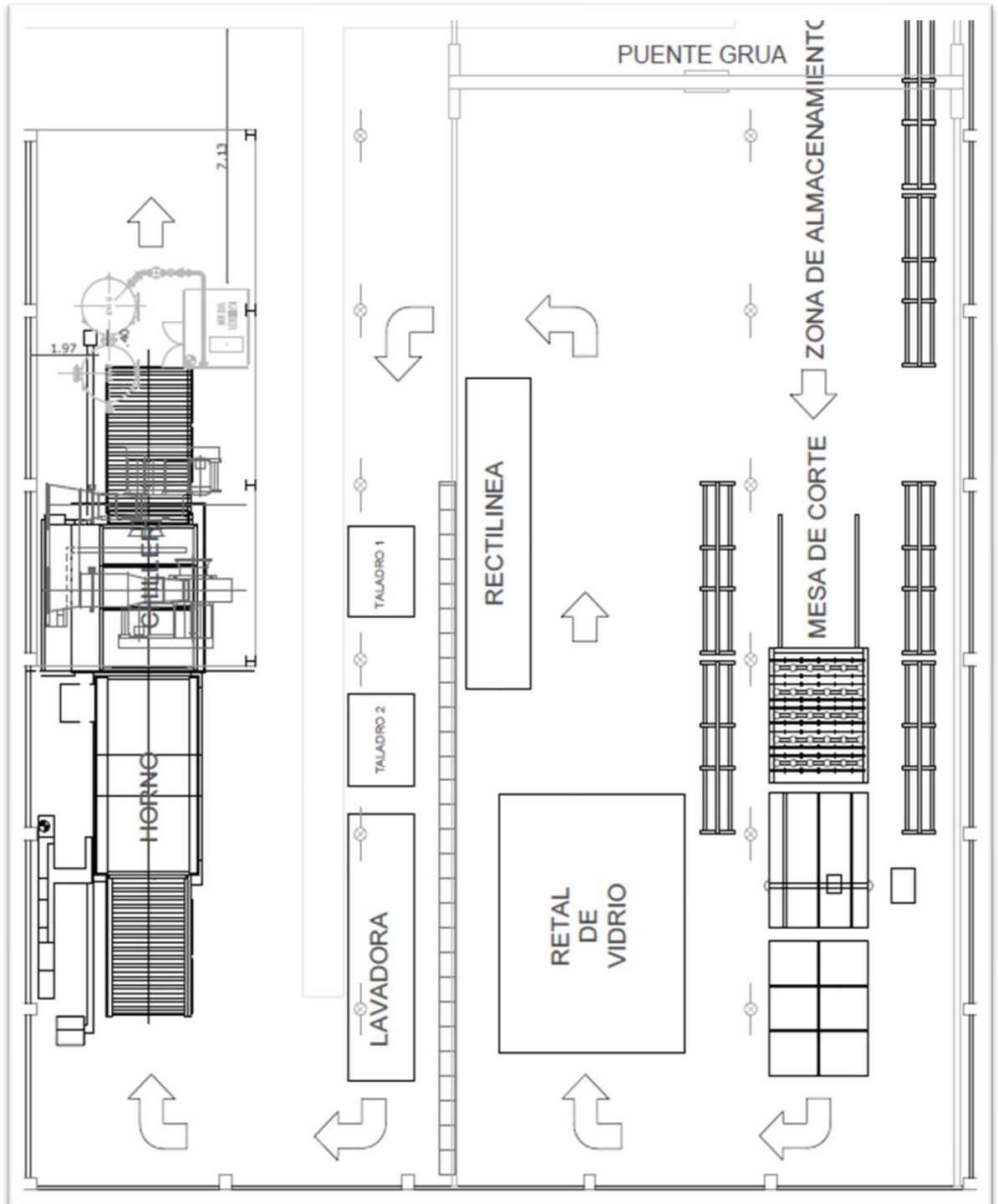
También se incluyen costos de mano de obra de personal administrativo, adquisición de muebles y enseres, equipos de cómputo y en general gastos para la puesta en marcha.

Para la ubicación de máquinas y equipos dentro de la bodega se sugiere una distribución por producto, en la cual las máquinas y equipos están organizados de tal manera que puedan asegurar la elaboración total del producto, por lo general se utilizan para la producción de elementos con un alto grado de estandarización con volúmenes altos de producción (Nahmias, 2007), adicionalmente se establecerá un flujo lineal de las operaciones, en el cual el producto se mueve de un proceso a otro de forma secuencial, es posible que en ocasiones se presente flujos laterales, pero estos terminan integrándose finalmente al proceso. Este tipo de flujo se aplica a productos de alto volumen. (Schroeder, 2004)

De acuerdo con las características del proceso de producción de vidrio templado, se presenta la distribución de una planta existente, que permite un buen aprovechamiento del espacio disponible, en donde los procesos son continuos facilitando el recorrido del material a través de cada uno de ellos y en donde el personal encargado del proceso puede moverse con facilidad y especialmente de una manera segura, sin obstáculos que puedan generar algún tipo de accidente.

En la siguiente figura se muestra la distribución de planta y recorrido del proceso para el proceso productivo de vidrio templado, en donde se ubican los equipos de cada uno de los procesos unitarios.

Figura 20: Distribución de planta sugerida.



Fuente: Elaboración propia a partir de planta de proceso de vidrio templado.

La anterior figura representa la distribución de planta sugerida, en donde se ubica la mesa de corte, la rectilínea, los taladros # 1 y # 2, la lavadora y el horno, además se establece el recorrido que realiza el vidrio a través de cada operación.

El costo de producción del metro cuadrado de vidrio templado es \$ 48.938/m².

Como inversiones iniciales también se incluyen los rubros de muebles, enseres, y equipos de oficina, dos camiones para despacho y entrega de producto terminado y gastos adicionales para puesta en marcha.

En la tabla 16 se discriminan los valores en cuanto a la inversión inicial, incluyendo equipos muebles, enseres y gastos de puesta en marcha.

Tabla 17: Inversión.

INVERSIÓN	
Terrenos	\$ 0
Propiedad, plantas y equipos	\$ 2.445'000.000
Muebles y enseres	\$ 20'000.000
Equipos de oficina	\$ 10'000.000
Equipos de transporte	\$ 170'000.000
Franquicias	\$ 0
Patentes	\$ 0
Gastos de puesta en marcha	\$ 87'500.000
Total, Inversiones	\$ 2.732'000.000

Fuente Elaboración propia.

La tabla muestra el total de la inversión que debe realizarse para el desarrollo del proyecto, y cada uno de sus rubros, como lo son la propiedad plantas y equipos, también en cuanto a muebles, enseres, equipos de oficina, camiones para el transporte del producto terminado y los gastos de la puesta en marcha. El valor total de la inversión es de \$ 2.732'000.000.

Se realiza una estimación para un año de gastos en nómina de personal Administrativo para el desarrollo de las actividades complementarias de la planta de producción, también de personal de ventas y personal de producción establecido en las variables de proceso. Para este estudio se utiliza el simulador financiero de la universidad EAN (Mauricio, 2013)

En la tabla 18 se establecen los gastos de nómina para el primer año de funcionamiento.

Tabla 18: Gastos de nómina para el primer año.

NÓMINAS	
Administrativa	\$ 171´892.080
Ventas	\$ 178´800.000
Producción	\$ 183´600.000
Total, nóminas	\$ 534´292.080

Fuente: Elaboración propia, modelo tomado de simulador financiero.

La tabla muestra los gastos en nómina en los que se incurren, tanto la nómina del personal administrativo, personal de ventas y personal de producción, el cual corresponde a los establecidos dentro de las variables de proceso y el set de simulación.

También se realiza la estimación de los gastos fijos para el primer año en donde se incluye el rubro del arriendo establecido anteriormente, gastos por servicios públicos, agua y energía que se tienen como base los datos arrojados en la simulación.

Los gastos fijos presupuestados se muestran en la tabla 19.

Tabla 19: Gastos fijos presupuestados.

GASTOS FIJOS	
Arriendo	\$ 186,120.000.
Servicios públicos	\$ 242'220.000
Telefonía celular	\$ 4'200.000
Internet	\$ 1'320.000
Papelería	\$ 8'400.000
Servicios de seguridad	\$ 51'600.000
Servicios de aseo	\$ 600.000
Kit de papelería	\$ 0
Página Web	\$ 4'500.000
Pólizas	\$ 0
Marketing mix	\$ 0
AdWords Google	\$ 0
Total, Gastos fijos	\$ 498'960.000

Fuente: Elaboración propia, modelo tomado de simulador financiero.

La tabla muestra todos los rubros correspondientes a gastos fijos, como el arriendo de la bodega, los servicios de telefonía celular e internet, también gastos en papelería, servicios de seguridad privada y aseo. Siendo el más alto el correspondiente a los servicios públicos, especialmente el consumo de energía.

Con una inversión de \$ 1.500.000.000, realizada por el inversionista sumado a los rubros relacionados anteriormente, se estima una inversión total para un proyecto de este tipo es de \$ 4.232.500.000 de los cuales \$ 2.732'500.000 serán solicitados como préstamo a un banco.

La tasa estimada para dicho préstamo se estima en 7.77% EA.

La proyección de amortización del crédito se muestra en la siguiente tabla

Tabla 20: Amortización crédito.

CALCULO DE PRESTAMO				
AÑOS	CUOTA POR PAGAR	ABONO A CAPITAL	INTERESES	SALDO DE LA DEUDA
0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 2.732'500.000
2022	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 2.732'500.000
2023	\$ -972'191.900	\$ 794'031.104	\$ 178'160.796	\$ 1.938'469.896
2024	\$ -972'191.900	\$ 855'727.321	\$ 116'464.579	\$ 1.082'741.574
2025	\$ -972'191.900	\$ 922'217.334	\$ 49'974.566	\$ 160'524.240
2026	\$ -162'031.983	\$ 160'524.240	\$ 1'507.743	\$ 0

Fuente: Elaboración propia, modelo tomado de simulador financiero.

La tabla 20 muestra como es la proyección de pagos del crédito a lo largo de 5 años, donde se muestra el abono a capital y el valor de pago por concepto de interés.

De acuerdo con la información establecida para el proyecto, en la siguiente tabla se muestra el resumen de los estados financieros proyectados.

Tabla 21: Estados financieros proyectados.

RESULTADOS FINANCIEROS				
Estado de Resultados				
Año	Utilidad Bruta	Utilidad Operativa	Utilidad Antes de Impuestos	Utilidad Neta
0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
2022	\$ 2.049'258.300	\$ 709'006.220	\$ 709'006.220	\$ 482'124.249
2023	\$ 2.197'357.438	\$ 826'454.421	\$ 648'293.625	\$ 440'839.665
2024	\$ 2.347'325.345	\$ 946'249.277	\$ 829'784.698	\$ 564'253.595
2025	\$ 2.498.527.637	\$ 1.067'739.095	\$1.017'764.529	\$ 692'079.879
2026	\$ 2.658'773.325	\$ 1.197'468.800	\$ 1.195'961.057	\$ 813.253.519
Balance				
Año	Total, Activos	Total, Pasivos	Total, Patrimonio	Total, Pas + Pat
0	\$ 1.500'000.000	\$ 0	\$ 1.500'000.000	\$ 1.500'000.000
2022	\$ 4.941'506.220	\$ 2.959'381.990	\$ 1.982'124.229	\$ 4.941'506.220

2023	\$ 4.086'762.521	\$ 2.145'922.855	\$ 1.940'839.665	\$ 4.086'762.521
2024	\$ 3.412'526.273	\$ 1.348'272.678	\$ 2.064'253.595	\$ 3.412'526.273
2025	\$ 2.678'288.769	\$ 486'208.889	\$ 2.192'079.879	\$ 2.678'288.769
2026	\$ 2.695'961.057	\$ 382'707.538	\$ 2.313'253.519	\$ 2.695'961.057
Flujo de Caja del Proyecto				
Año	KTNO	Activo Fijo Neto	Activo Fijo Bruto	Capital Operativo
0	\$-1.232'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 1.500'000.000
2022	\$ 2.284'124.230	\$ 2.430'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 4.714'624.230
2023	\$ 1.750'808.561	\$ 2.128'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 3.879'308.561
2024	\$ 1.320'495.170	\$ 1.826'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 3.146'995.170
2025	\$ 828'104.120	\$ 1.524'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 2.352'604.120
2026	\$ 1,090'753.519	\$ 1.222'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 2.313'253.519
Flujo de Caja Libre				
Año	Ebit	Noplat	Inversión Neta	Flujo de Caja Libre del Periodo
0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
2022	\$ 709'006.220	\$ 482'124.229	\$ 3.214'624.229	\$ 3.696'748.459
2023	\$ 826'454.421	\$ 561'989.006	\$ -835'315.668	\$ -273'326.662
2024	\$ 946'249.277	\$ 643'449.509	\$ -732'313.391	\$ -88'863.883
2025	\$ 1.067'739.095	\$ 726'062.584	\$ -794'391.049	\$ -68'328.465
2026	\$ 1.197'468.800	\$ 814'278.784	\$ -39'350.601	\$ -774'928.183

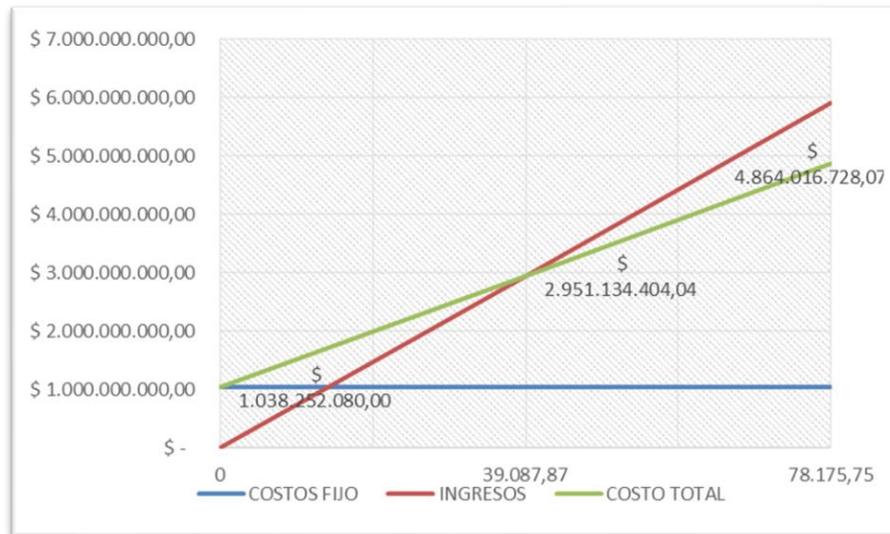
Fuente: Elaboración propia, modelo tomado de simulador financiero.

La tabla muestra en resumen los resultados proyectados para los siguientes 5 años, en donde en primer lugar se muestra el estado de resultados, con las utilidades bruta, utilidad operativa, utilidad antes de impuestos y por último la utilidad neta. También se muestran los resultados proyectados del balance general, el flujo de caja del proyecto y el flujo de caja libre.

De acuerdo con los resultados proyectados, los primeros cuatro años del proyecto no se genera utilidad.

En la figura 22, se gráfica el punto de equilibrio del proyecto

Figura 21: Punto de equilibrio.



Fuente: Elaboración propia, modelo tomado de simulador financiero.

La figura muestra el punto de equilibrio del proyecto en donde los ingresos logran cubrir los costos fijo y los costos variables. Este valor se sitúa en 39.087,87 metros cuadrados de vidrio templado por un valor de \$ 2.951'134.404 en ventas.

La tasa interna del proyecto para una rentabilidad mínima del 25% esperada por el inversionista, es de -2.78%, por lo que bajo estas condiciones el proyecto no es viable.

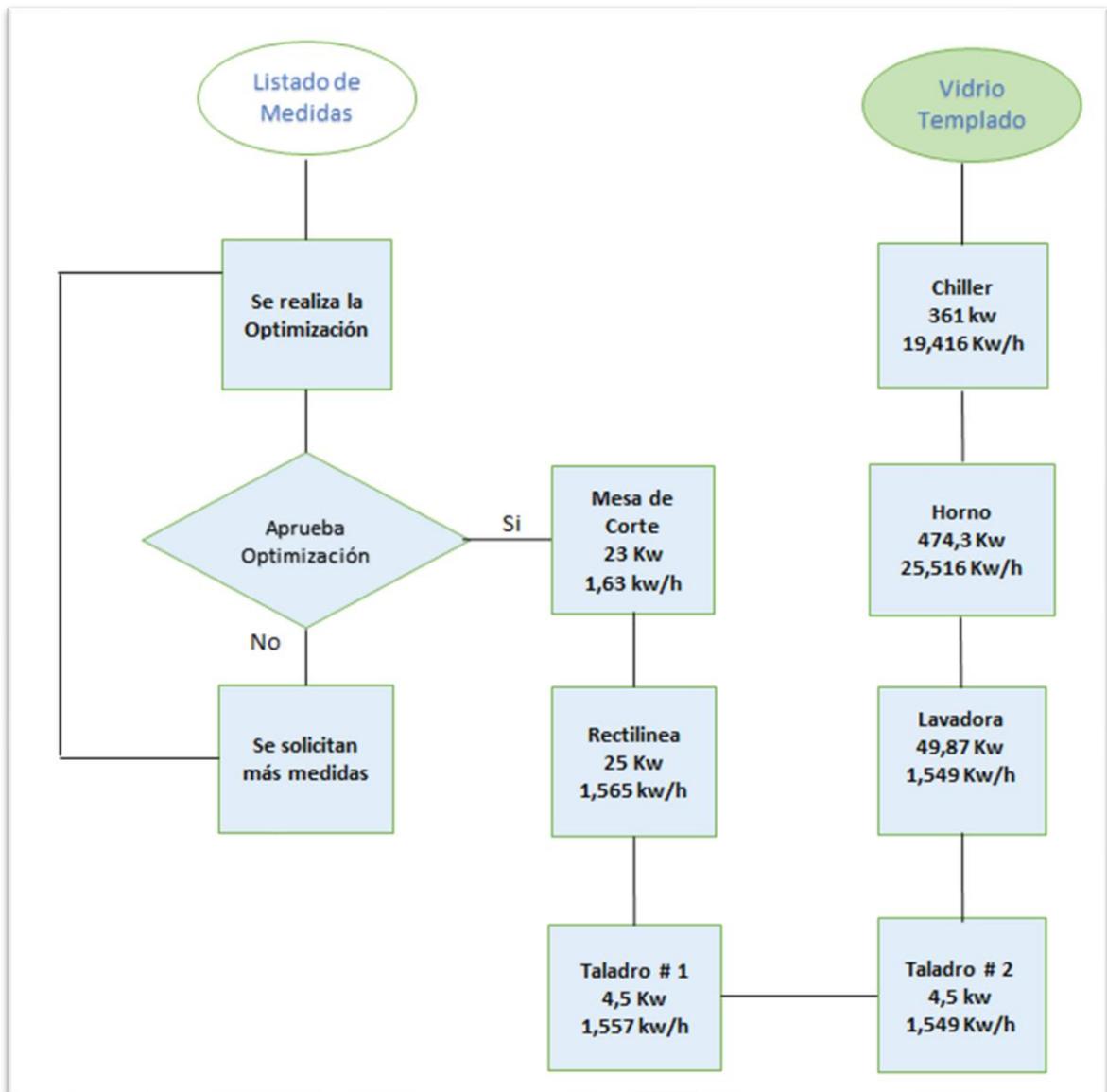
4.3 Estudio Energético.

Para la realización de este estudio nos apoyamos en la simulación del proceso por medio del SuperPro Designer, en donde se especifica la potencia de los equipos de acuerdo a sus respectivas placas.

En la siguiente figura se muestra el flujo del proceso con sus respectivos requerimientos de potencia.

Potencia por operación unitaria y consumo por entidad

figura 22: Potencia por operación unitaria y consumo por entidad



Fuente: Elaboración propia a partir de placas de equipos del proceso.

En la figura también se muestra el consumo por kilovatio hora para cada una de las operaciones unitarias que se obtuvieron a partir de la realización de la simulación. Los resultados corresponden a consumo para una sola entidad.

Debido a que el proceso desarrolla 4 entidades en una hora, procedemos a calcular los respectivos consumos en un mes para cada proceso unitario, al igual que el costo de acuerdo con la tarifa establecida por el distribuidor de energía.

En la siguiente tabla se muestra el costo de energía al mes para cada operación unitaria.

Tabla 22: Costo de energía por operación unitaria de acuerdo con simulación.

GASTO DE ENERGÍA					
OPERACIÓN UNITARIA	CONSUMO/ ENTIDAD	CONSUMO / DÍAS	CONSUMO / MES	TARIFA	COSTO
Mesa de corte Rectilínea	1,630	60,317	1.326,964	\$ 471,20	\$ 625.270
Taladro # 1	1,565	57,904	1,273,888	\$ 471,20	\$ 600.256
Taladro # 2	1,557	57,602	1.267,244	\$ 471,20	\$ 597.125
Lavadora	1,549	57,314	1,260,908	\$ 471,20	\$ 594.140
Horno+chiller	1,549	57,313	1.260,886	\$ 471,20	\$ 594.129
	44,933	1.662, 529	36.575,638	\$ 471,20	\$ 17'234.441
TOTALES		1.952,979	42.965,538		\$ 20'245.362

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se muestra el costo total de energía consumida en el mes para cada una de las operaciones unitarias, siendo de \$ 20'245.362 COP, y de este costo, el 85.13% del total de los requerimientos de energía corresponden al horno incluido el chiller.

Teniendo en cuenta que debido al alto porcentaje de incidencia que el consumo de energía del proceso de temple tiene con respecto al consumo total, se realiza una evaluación de la eficiencia energética del horno.

Para este caso, se realizará la evaluación para el temple de un metro cuadrado de vidrio de 6 mm de espesor.

Los valores serían los siguientes:

- $\Delta T = 700^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$ (10)
- $\Delta T = 680^{\circ}\text{C}$ (11)
- $c = 1.1 \text{ kJ} / \text{kg} * ^{\circ}\text{C}$ (Calor específico medio) (12)
- $m = 1 \text{ m}^2 * 2500 \text{ kg/m}^3 * 0,006 \text{ m} = 15 \text{ kg}$ (13)

Si aplicamos estos valores a la fórmula anterior, obtendremos:

- $E = 680^{\circ}\text{C} * 1.1 \text{ kJ} / \text{kg} * ^{\circ}\text{C} * 15 \text{ kg}$ (14)
- $E = 11.220 \text{ kJ}$ (15)
- $E = 11.220 \text{ kJ} * 0.000277778 = 3.12 \text{ kWh}$ (16)
- $E = 3.12 \text{ kWh}$ (17)

Se requieren 3.12kWh para elevar la temperatura de un metro cuadrado de vidrio con espesor de 6 mm a temperatura de temple.

A continuación, se presenta la tabla de eficiencia de horno de acuerdo con el área utilizada.

Tabla 23: Eficiencia de carga en horno.

EFICIENCIA DE CARGA	Área Utilizada	Energía Térmica	Pérdida Energética	Enfriamiento	Consumo total	Consumo M2
13 %	1 M2	3,12 kwh	0,6 kwh	5,67 kwh	9,39 kwh	9,39 kwh
26 %	2 M2	6,24 kwh	0,6 kwh	5,67 kwh	12,51 kwh	6,26 kwh
40 %	3 M2	9,36 kwh	0,6 kwh	5,67 kwh	15,63 kwh	5,21 kwh
53 %	4 M2	12,48 kwh	0,6 kwh	5,67 kwh	18,75 kwh	4,69 kwh
66 %	5 M2	15,60 kwh	0,6 kwh	5,67 kwh	21,87 kwh	4,37 kwh
79 %	6 M2	18,72 kwh	0,6 kwh	5,67 kwh	24,99 kwh	4,17 kwh
93 %	7 M2	21,84 kwh	0,6 kwh	5,67 kwh	28,11 kwh	4,02 kwh

Fuente: Elaboración propia.

La anterior tabla muestra la eficiencia en el consumo de energía de acuerdo con el porcentaje de utilización de la carga del horno, en donde se puede ver que a medida que aumenta el porcentaje de utilización de la carga del horno, el consumo de energía por metro cuadrado disminuye. Siendo un 93% como máximo el porcentaje de utilización del horno con un consumo mínimo de 4,02 kwh.

Después de obtener el resultado de eficiencia de carga del horno establecido en la simulación, se realiza el cálculo del costo total de energía para el temple de 6.477 metros cuadrados correspondientes a un mes de producción.

En la tabla 24 se presenta el costo incurrido en energía en un mes para el temple de acuerdo con la eficiencia de carga.

Tabla 24: Costo de energía mensual de acuerdo con eficiencia de carga.

EFICIENCIA DE CARGA	Consumo kwh	Producción mes/m2	Consumo kwh total	Tarifa	Costo de energía
13 %	9,39 kwh	6.477 m2	60.819	\$ 471,20	\$ 28'657.918
26 %	6,26 kwh	6.477 m2	40.546	\$ 471,20	\$ 19'105.279
40 %	5,21 kwh	6.477 m2	33.745	\$ 471,20	\$ 15'900.720
53 %	4,69 kwh	6.477 m2	30.377	\$ 471,20	\$ 14'313.699
66 %	4,37 kwh	6.477 m2	28.304	\$ 471,20	\$ 13'337.072
79 %	4,17 kwh	6.477 m2	27.009	\$ 471,20	\$ 12'726.679
93 %	4,02 kwh	6.477 m2	26.037	\$ 471,20	\$ 12'268.885

Fuente: Elaboración propia.

La tabla muestra el consumo y el costo de la energía en la que se incurre de acuerdo con cada porcentaje de carga para un mes de producción.

De acuerdo con el resultado de la simulación, el costo del consumo de energía del horno asciende a \$ 17'234.44. por lo que se puede inferir que la eficiencia de carga se sitúa entre el 26% y el 40%.

4.4 Análisis y Resultados

En cuanto al estudio técnico-económico de la planta de transformación y temple de vidrio, teniendo en cuenta que el proyecto se simuló bajo las condiciones de trabajo en producción de solo un solo turno, se decide adicionar un turno de trabajo con el fin de ver las implicaciones económicas para constatar si el proyecto puede ser viable.

Las inversiones iniciales son las mismas, pero los gasto en nómina incrementa como se muestra en la siguiente tabla, haciendo el incremento de personal para el segundo turno.

Tabla 25: Nómina para 2 turnos de trabajo.

NÓMINA 2 TURNOS	
Administrativa	\$ 171'892.080
Ventas	\$ 178'800.000
Producción	\$ 367'200.000
Total, nóminas	\$ 717'892.080

Fuente: Elaboración propia, modelo tomado de simulador financiero.

La tabla 25 muestra el costo de la nómina del personal administrativo, de ventas y producción al aumentar a 2 turnos la operación de la planta de la planta.

Solamente se hace el incremento del personal operativo en producción, las áreas administrativas y de ventas permanecen igual.

También se hace un ajuste en los gastos fijos proyectados en el modelo de acuerdo con la tabla 26.

Tabla 26: Costos fijos para incluir segundo turno.

GASTOS FIJOS 2 TURNOS	
Arriendo	\$ 186,120.000.
Servicios públicos	\$ 484'440.000
Telefonía celular	\$ 4'200.000
Internet	\$ 1'320.000
Papelería	\$ 16'800.000
Servicios de seguridad	\$ 51'600.000
Servicios de aseo	\$ 1'200.000
Kit de papelería	\$ 0
Página Web	\$ 4'500.000
Pólizas	\$ 0
Marketing mix	\$ 0
AdWords Google	\$ 0
Total, Gastos fijos	\$ 750'180.000

Fuente: Elaboración propia, modelo tomado de simulador financiero.

La tabla muestra el incremento con respecto a los gastos variables básicamente servicios públicos, papelería y servicios de aseo, al momento de pasar de 1 turno a 2 turnos. Los demás rubros permanecen iguales.

No habría cambio en el valor del préstamo a solicitar, por lo que los resultados financieros para los dos turnos serían los siguientes.

Tabla 27: Resultados financieros para dos turnos.

RESULTADOS FINANCIEROS PARA DOS TURNOS				
Estado de Resultados				
Año	Utilidad Bruta	Utilidad Operativa	Utilidad Antes de Impuestos	Utilidad Neta
0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
2022	\$ 3.323'118.696	\$ 1.548'046.616	\$ 1.548'046.616	\$ 1.052'671.698
2023	\$ 3.563'279.253	\$ 1.744'729.046	\$ 1.566'568.250	\$ 1.065'266.410
2024	\$ 3.806'470.243	\$ 1.945'123.335	\$ 1.828'658.756	\$ 1.243'487.954
2025	\$ 4,051'662937	\$ 2.148'176.242	\$ 2.098'201.675	\$ 1.426'777.139

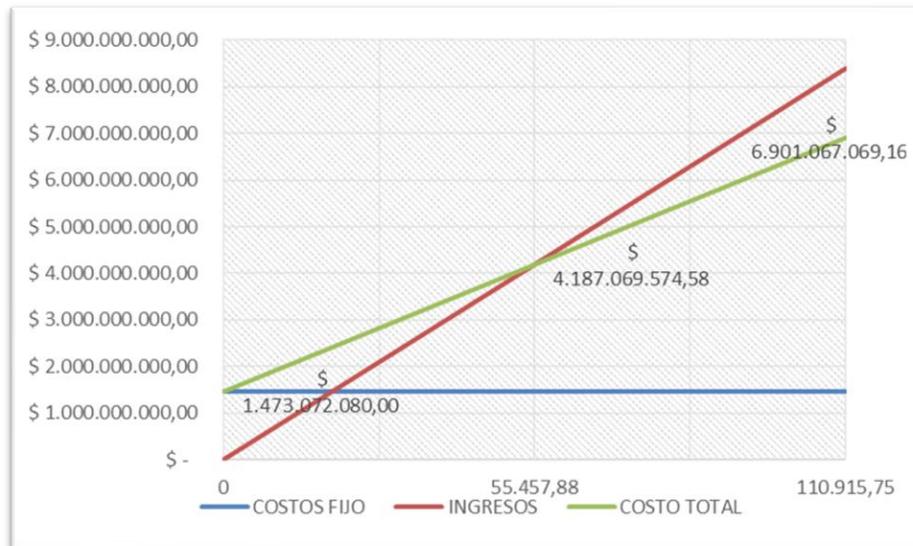
2026	\$ 4.311'520.586	\$ 2.364'755.057	\$ 2.363'247.314	\$ 1.607'008.174
Balance				
Año	Total, Activos	Total, Pasivos	Total, Patrimonio	Total, Pas + Pat
0	\$ 1.500'000.000	\$ 0	\$ 1.500'000.000	\$ 1.500'000.000
2022	\$ 5.780'546.616	\$ 3.227'874.917	\$ 2.552'671.698	\$ 5.780'546.616
2023	\$ 5.005'037.146	\$ 2.439'770.735	\$ 2.565'266.410	\$ 5.005'037.146
2024	\$ 4.411'400.330	\$ 1.667'912.376	\$ 2.743'487.954	\$ 4.411'400.330
2025	\$ 3.758'725.916	\$ 831'948.776	\$ 2.926'777.139	\$ 3.758'725.916
2026	\$ 3.863'247.314	\$ 756'239.140	\$ 3.107'008.173	\$ 3.863'247.314
Flujo de Caja del Proyecto				
Año	KTNO	Activo Fijo Neto	Activo Fijo Bruto	Capital Operativo
0	\$-1.232'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 1.500'000.000
2022	\$ 2.854'671.699	\$ 2.430'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 5.285'171.699
2023	\$ 2.375'235.306	\$ 2.128'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 4.503'735.306
2024	\$ 1.999'729.529	\$ 1.826'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 3.826'229.529
2025	\$ 1.562'801.380	\$ 1.524'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 3.087'301.380
2026	\$ 1.884'508.174	\$ 1.222'500.000	\$ 2.732'500.000	\$ 3.107'008.174
Flujo de Caja Libre				
Año	Ebit	Noplat	Inversión Neta	Flujo de Caja Libre del Periodo
0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
2022	\$ 1.548'046.616	\$ 495'375.917	\$ 3.785'171.698	\$ 4.837'843.398
2023	\$ 1.744'729.046	\$ 558'313.295	\$ -781'436.392	\$ 404'979.359
2024	\$ 1.945'123.335	\$ 622'439.467	\$ -677'505.777	\$ 645'178.091
2025	\$ 2.148'176.242	\$ 687'416.397	\$ -738'928.148	\$ 721'831.696
2026	\$ 2.364'755.057	\$ 756,721.618	\$ 19'706.794	\$ 1.627'740.233

Fuente: Elaboración propia, modelo tomado de simulador financiero.

En la tabla se muestran los resultados financieros del proyecto al aumentar a 2 turnos la operación de la planta de producción. Se muestran los nuevos estados de resultados, el nuevo balance general proyectado y los flujos de caja y flujo libre del proyecto.

El nuevo punto de equilibrio se sitúa en 55.457 metros cuadrados de vidrio templado como se muestra en la figura 24.

Figura 23: Punto de equilibrio para dos turnos



Fuente: Elaboración propia, modelo tomado de simulador financiero.

La anterior figura muestra el nuevo punto de equilibrio, al aumentar a 2 turnos de trabajo la planta de producción de vidrio templado, con un valor en ventas estimado de \$ 4.187.069.5764

Con la misma rentabilidad mínima esperada, el proyecto generar utilidad desde el primer año y la tasa interna de retorno es del 43.31%, por lo que el proyecto sería rentable bajo esta condición.

Con respecto al estudio energético, se realizó el registro del consumo de energía durante un mes en una planta de producción existente, con los procesos simulados por medio de SuperPro Designer, de igual manera, el personal operativo y los volúmenes de vidrio procesados no tienen una variación significativa con respecto a las variables de proceso establecidas en la simulación.

Los resultados de las mediciones en cuanto al el consumo de energía y su respectivo costo se muestran en la tabla 28.

Tabla 28: Medición y costos de energía en planta de producción.

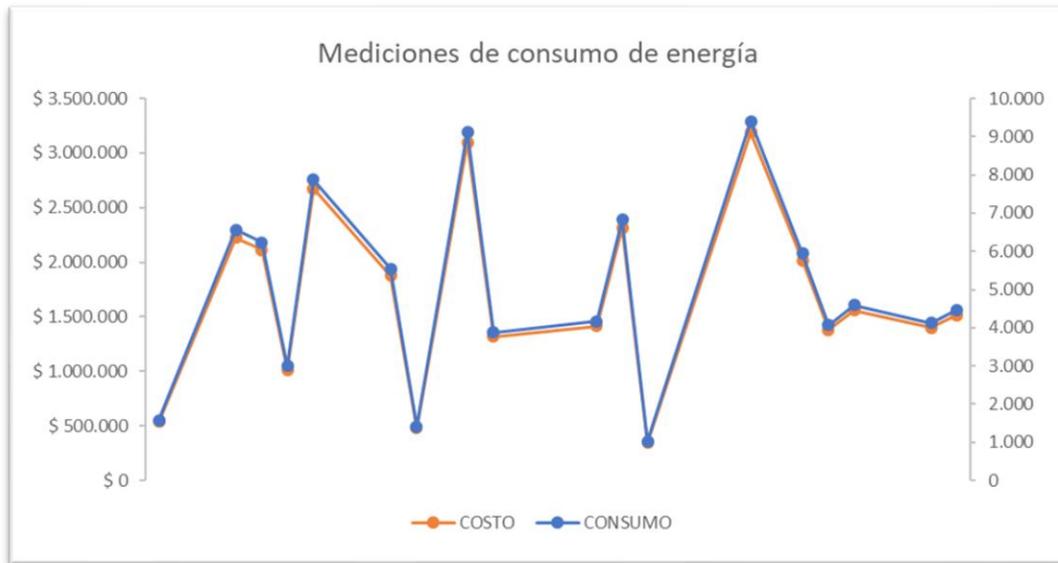
GASTOS DE ENERGÍA						
LECTURA	FECHA	CONSUMO	FACTOR	ENERGIA	TARIFA	COSTO
810.446	30/10/2021	1.582	720	1139,04	\$ 471,20	\$ 536.716
817.007	2/11/2021	6.561	720	4723,92	\$ 471,20	\$ 2.225.911
823.235	3/11/2021	6.228	720	4484,16	\$ 471,20	\$ 2.112.936
826.231	4/11/2021	2.996	720	2157,12	\$ 471,20	\$ 1.016.435
834.107	5/11/2021	7.876	720	5670,72	\$ 471,20	\$ 2.672.043
839.647	8/11/2021	5.540	720	3988,8	\$ 471,20	\$ 1.879.523
841.061	9/11/2021	1.414	720	1018,08	\$ 471,20	\$ 479.719
850.187	11/11/2021	9.126	720	6570,72	\$ 471,20	\$ 3.096.123
854.069	12/11/2021	3.882	720	2795,04	\$ 471,20	\$ 1.317.023
858.237	16/11/2021	4.168	720	3000,96	\$ 471,20	\$ 1.414.052
865.063	17/11/2021	6.826	720	4914,72	\$ 471,20	\$ 2.315.816
866.085	18/11/2021	1.022	720	735,84	\$ 471,20	\$ 346.728
875.479	22/11/2021	9.394	720	6763,68	\$ 471,20	\$ 3.187.046
881.425	24/11/2021	5.946	720	4281,12	\$ 471,20	\$ 2.017.264
885.491	25/11/2021	4.066	720	2927,52	\$ 471,20	\$ 1.379.447
890.083	26/11/2021	4.592	720	3306,24	\$ 471,20	\$ 1.557.900
894.211	29/11/2021	4.128	720	2972,16	\$ 471,20	\$ 1.400.482
898.675	30/11/2021	4.464	720	3214,08	\$ 471,20	\$ 1.514.474
TOTAL				64.663,92		\$ 27'707.012

Fuente: Elaboración propia.

La tabla muestra los consumos corresponden a los datos reportados por el medidor instalado por la empresa encargada del suministro de energía en la zona de ubicación de la planta y el factor es el utilizado por dicha empresa para calcular el respectivo consumo. La tarifa de energía en la aplicada por la empresa de acuerdo con el sector industrial en el que se encuentra.

A continuación, se presenta una figura con los consumos de energía para los días en los que se realizaron las mediciones.

Figura 24: Mediciones de consumo de energía



Fuente; Elaboración propia

La figura muestra los picos de consumo los cuales corresponden a los días en los que el horno de templado fue utilizado la mayor cantidad de tiempo y los menores consumos, corresponden a días en los que no fue utilizado el horno de templado, solamente se utilizaron los equipos de proceso.

4.5 Proyecto de Intervención

De acuerdo con el diseño del proceso de producción, y a cada una de las operaciones unitarias, al igual que de la maquinaria requerida, se establece el siguiente cronograma que incluye todas y cada una de las actividades que se deben desarrollar como plan de intervención para llevar a cabo el adecuado desarrollo del proyecto.

Figura 25: Cronograma de intervención.



Fuente; Elaboración propia

La figura muestra la duración en semanas de cada una de las actividades establecidas para desarrollar el proyecto. Adicional al montaje e instalación de los equipos y maquinaria requeridos, en el cronograma se incluyen los tiempos necesarios para el trámite ante la empresa encargada de la distribución de la energía, para la energización de la subestación.

No se incluye dentro del cronograma el tránsito de compra e importación de la maquinaria y equipos, algunos de los cuales, como en el caso del horno, requieren tiempos de fabricación prolongados, ya que no son equipos que se fabrican bajo pedido por parte del proveedor.

4.6 Conclusiones

- Con este estudio fue posible ahondar en las características del vidrio en general, sus procesos de fabricación y las diferentes normativas que rigen su utilización tanto a nivel local como internacional, pero sobre todo permitió entender el impacto que tiene su uso sobre el medio ambiente, debido al alto consumo de energía que se requiere para su producción junto con el cemento y el aluminio, siendo uno de los mayores generadores de gases de efecto invernadero causantes del cambio climático como lo es el CO₂, por lo que la optimización de sus procesos se convierte en prioridad para las compañías que lo procesan.
- Aunque la literatura con respecto a los procesos de transformación y temple de vidrio para uso industrial, automotriz y arquitectónico no es muy amplia, y la poca que se encuentra se enfoca específicamente en el funcionamiento de los hornos y en el temple en sí del vidrio, fue posible profundizar en la caracterización de los demás procesos tales como corte, biselado, perforación y lavado, lo cual permitió establecer sus diferentes variables, su desempeño y los residuos e impactos ambientales que cada uno de ellos generan.
- La simulación del proceso productivo por medio del programa SuperPro Designer, que se obtuvo con la caracterización del proceso productivo de transformación y temple de vidrio, permitió establecer los consumos de energía por cada unidad de trabajo de acuerdo con los estimados de producción, dejando claro el enfoque de optimización del proceso de temple, debido a su alto consumo de energía correspondiente a más del 85% del requerimiento total del proceso. Además, facilitó la comparación con los procesos de las plantas de producción de vidrio templado permitiendo el hallazgo de fallas en los procesos.
- Se logró plantear el estudio técnico económico de una planta de producción de vidrio templado, en donde fue posible determinar el valor de la inversión de acuerdo con la distribución de planta sugerida y a las variables de proceso establecidas.

- El consumo de energía de la planta de transformación y temple de vidrio de acuerdo con el diseño de la simulación se sitúa en 42.965,54 kilovatios correspondientes a \$ 20'245.352 y el consumo medido de la planta existente se sitúa en 64.663,92 kilovatios correspondiente a \$ 27'707.012. por lo que el consumo de energía presentado en los registros tomados del medidor se encuentra un 36.86% por encima con respecto a los valores generados en la simulación, lo que puede dar a entender que estas desviaciones se deben a problemas de optimización de procesos y especialmente a aprovechamientos de cargas del horno de temple
- Al hacer la revisión de los presupuestos se establece que el consumo óptimo de energía en el horno es de 4,02 kilovatios/m², pero al calcular las eficiencias de carga está se sitúa por debajo del 50% con un consumo de 5,21 kilovatios/m², lo que aumenta el costo del kilovatio por metro cuadrado de vidrio templado en un 29.60%.
- El proceso de producción presenta diferencias significativas con respecto a la velocidad de producción de cada proceso unitario, ya que, aunque la mesa de corte solo puede procesar 4 entidades por hora, el horno tiene la capacidad de procesar 10 entidades por hora, es por esto que la eficiencia de cargar se sitúa por debajo del 40%.
- Se logró establecer el costo total de la inversión por \$ 4.232'500.000 y un nivel de ventas para el primer año de \$ 5.824'825.000 de acuerdo precio de venta y capacidad del proceso, lo que permitió establecer que se requiere de la programación de más de un turno de trabajo para lograr la viabilidad de un proyecto de este tipo, ya que, con un solo turno, aunque para el quinto año el proyecto lograría generar utilidades, la TIR se sitúa en -2.78%, por lo que se hace inviable.
- Realizando los ajustes en cuanto a mano de obra, gastos fijos, ingresos por ventas y producción al estudio técnico económico con el fin de adicionar un turno más de trabajo, se puede concluir que el proyecto genera rentabilidad a partir del

segundo año, y la tasa interna de retorno se ubica en el 43.31 %, por lo que se convierte en un proyecto atractivo para el inversionista, teniendo en cuenta que la demanda debe absorber la totalidad de los metros cuadrados de vidrio producidos en ambos turnos.

- Debido a las bajas eficiencias de carga que está presentando el horno, y que por ende están incrementando el costo de la energía por metro cuadrado, se sugiere ampliar las horas de trabajo en las demás operaciones unitarias con el fin de aumentar el material disponible para temple en el turno de trabajo del equipo o en su defecto, disminuir las horas de operación del horno.
- Aunque los desechos generados por el proceso productivo en su mayoría llegan a reciclarse, especialmente el casco de vidrio, el cual se comercializa con la empresa vidrio andino por medio de intermediarios como materia prima para la fabricación de lámina de vidrio, se presenta una dificultad para el tratamiento de dos materiales, el icopor y el sedimento de vidrio generado en la operación unitaria de biselado, los cuales deben tener un manejo diferente debido a que su disposición final se está realizando como si fuera un desecho común que va a un relleno sanitario.

4.7 Estudios Futuros

Debido a la falta de literatura en cuanto a procesos de transformación y temple de vidrio, y en especial en cuanto a su desempeño, optimización y manejo de residuos, se pueden sugerir los siguientes estudios que permitan complementar este documento.

Desarrollo de estudios para el manejo y control de desechos del proceso de transformación de vidrio plano monolítico, que abarque desde la recepción de materia prima, incluya los procesos de corte y optimización de lámina, biselado, perforado y lavadora, ya que como se pudo concluir en este estudio, el proceso genera diversos desechos que deben ser tratados y dispuestos de la manera adecuada, siguiendo procesos y premisas de producción verde.

Estudios de diseño de procesos y consumo de energía que incluyan operaciones adicionales a la transformación de vidrio, como operaciones de serigrafía y procesos posteriores al templado, como laminación de vidrio templado y procesos de fabricación de vidrios termoacústicos o DVH

También se pueden adelantar estudios más intensivos en cuanto a la utilización del horno de temple de vidrio, como aprovechamiento de carga y consumo de energía para diferentes espesores de vidrio como 4, 5 8 y 10 mm, además, para de estudios similares para vidrios semi-templados y termo endurecidos.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abia Hof Lucas, W. R. (3 de junio de 2021). *Glass Precision micro-cutting using spark assisted chemical engraving*. Obtenido de Sciencedirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S266691292100026X?token>
- Almutairi Naif, Z. M. (2015). Sliding mode controllers for a tempered glass furnace. *ISA Transactions*, 1 - 2.
- Ambiente, M. d. (25 de noviembre de 2014). *Nueva Legislación*. Obtenido de http://www.nuevalegislacion.com/files/susc/cdj/conc/metod_r754_14.pdf
- Arias-Gaviria Jessica, C.-Q. S.-A. (2018). Understanding dynamics and policy for renewable energy diffusion in Colombia. *Renewable Energy*, 1111 - 1112.
- Ashrith H.S, M. D. (16 de agosto de 2018). *Effect of wall thickness and cutting parameters on drilling of glass microballoon/poxy syntactic foam composites*. Obtenido de Sci-hub: <https://sci-hub.se/10.1016/j.compstruct.2018.12.022>
- Azevedo Alfonso, M. M. (20 de agosto de 2021). *Effect of the addition and processing of glass polishing waste on the durability of geopolymeric mortars*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2214509521001777?token>
- Bagheri Ali, M. S. (20 de junio de 2021). *A new approach to the rouse of waste glass in the production alkali-activated materials*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2666790821001725?token>

- Bakari Ramadhani, K. X. (16 de julio de 2020). *Simulation and optimisation of the pyrolysis of rice husk: Preliminary assessment for gasification applications*. Obtenido de ScinceDirect: <https://sci-hub.se/10.1016/j.jaap.2020.104891>
- Béchet Fabien, N. S. (21 de abril de 2014). *Two-dimensional finite element modeling of glass forming and tempering processes, including radiative effects*. Obtenido de ScienceDirect: <https://sci-hub.se/10.1016/j.finel.2014.09.008>
- Benitez Cortés Isnel, P. M. (29 de marzo de 2018). *Simulación de una planta de producción de moringa empenado el simulador de procesos SuperPro Designer*. Obtenido de Redialyc.org: <https://redalyc.org/journal/4455/445558422003/html/>
- Bernal Loaiza Maria Helena, C. S. (31 de agosto de 2013). *Productividad ed una celada de manufactura flexible simulada en promodel utilizando Path Networks Type Crane*. Obtenido de Bibioteca Universidad EAN: <https://eds.p.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=5&sid=368d79b4-3428-49b1-81cb-ee6e8d9c93e4%40redis>
- Betancourt Daylin Julieth, S. J. (14 de julio de 2016). *Sintesis y caracterización e la mezcla polipropileno-poliestireno expandido (icopor) reciclado como altrnativa para el proceso de producción de utopartes*. Obtenido de Biblioteca Universidad EAN: <https://eds-s.ebscohost-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=2&sid=c89-bcb13-6557-4a51-8990-12fe1259e410%40redis>

- Bhuyan B.K, T. S. (2020). Study of the effect of process variables on output response in electro chemical discharge drilling of borosilicate glass. *Materials Today: Proceedings*, 335.
- Borra Chenna Rao, V. t. (9 de mayo de 2020). *Recovery of rare earths from glass polishing waste for the production of aluminium-rare earth alloys*. Obtenido de Sciencedirect: <https://sci-hub.se/10.1016/j.resconrec.2021.105766>
- Business, M. o. (11 de abril de 1999). *Building Code Hub*. Obtenido de <https://codehub.building.govt.nz/resources/nzs-4223-31999/>
- Camacol. (1997). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Obtenido de https://camacol.co/sites/default/files/T%C3%ADtulo%20K%20NSR-10%20del%20Decreto%20926%20del%2019032010_0.pdf
- Camacol, C. C. (2017). *Proyecto de Investigación del Sector de la Construcción de Edificaciones en Colombia*. Bogotá.
- Camargo Manuel, D. M.-R. (26 de marzo de 2020). *Automated discovery of business process simulation models from event logs*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0167923620300397?token>
- Canciano Fernandez, J. R. (2020). Estimación de la Huella de Carbono de Vidrio en Cuba. *Minería y Geología*, 428-440.
- Canciano Janeth, R. M. (2019). Estimación de la huella de carbono en la producción de vidrio en Cuba. *Minería y geología*, 431.

- Carabalí Diana, F. C. (2017). Energy diagnosis and structuring an energy saving proposal for the metal casting industry: An experience in Colombia. *Applied Thermal Engineering*, 2.
- Charry, S. I. (Bogotá de junio de 2018). Análisis Sectorial e Interno Mundial de Vidrios S.A.S.
- Chen Shun-Tong, J. Z.-H.-Y.-Y. (30 de marzo de 2010). *Development of a grinding–drilling technique for holing optical grade glass*. Obtenido de Sci-hub: <https://sci-hub.se/10.1016/j.ijmachtools.2010.12.001>
- Chen YuHui, H. X. (24 de febrero de 2021). *Obtaining transparent silica glass from nano-silica hydrosol*. Obtenido de ScienceDirect: <https://sci-hub.se/10.1016/j.ceramint.2021.03.270>
- Christopher Anzastiga González, i. M. (2018). Importancia de la Simulación en Procesos Productivos. *Revista Ciencia Administrativa*, 5 - 6.
- Cossavella M, M. K. (2008). The tempering of glass and the failure of tempered glass plates with pin-loaded joints: Modelling and simulation. *Materials & Design*, 944-945.
- Daniel, B. N. (5 de octubre de 2009). *Fabricación de Piezas de Vidrio Mediante la Ruta de Procesado de Moldeo por Inyección de Polvos*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/29401276.pdf>
- Datsio kyriaki Corinna, O. M. (11 de septiembre de 2015). *The mechanical response of cold bent monolithic glass plates during the bending process*. Obtenido de ScienDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0141029616300396?token>

- Degryse Patrick, S. A.-M. (3 de junio de 2020). *Isotopic evidence for the use of antimony in late bronze age glass making*. Obtenido de Sci-hub: <https://sci-hub.se/10.1016/j.jas.2020.105195>
- Designer, S. (2020). Guía del usuario. *El Programa Computacional SuperPro Designer*.
- Devi Gapalakrishnan Ramya, P. K. (15 de enero de 2018). *Analysis on drilling of woven glass fibre reinforced aluminium sandwich laminates*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2238785418300413?token>
- Diplakiz, W. (2010). *Ondas y Partículas*. Obtenido de <https://ondasyparticulas.com/2020/09/30/las-4-leyes-termodinamica/>
- Energética. (2 de diciembre de 2021). *El crecimiento de las energías renovables se acelera en todo el mundo tras la COP26*. Obtenido de Energética: <https://energetica21.com/noticia/el-crecimiento-de-las-energias-renovables-se-acelera-en-todo-el-mundo-tras-la-cop26>
- España, M. d. (2015). *Guías Tecnológicas*. Obtenido de <https://prtr-es.es/data/images/gu%C3%ADa%20tecnol%C3%B3gica%20fabricaci%C3%B3n%20de%20vidrio-0d12688c194c3907.pdf>
- Eugenio, G. P. (1 de Julio de 2015). *Formulación de vidrio sodio-calcico con bajo contenido de óxido de magnesio y estudio de propiedades físicas para su aplicación en procesos de prensa y sople-prensa*. Obtenido de Universidad Autónoma de Nuevo León: <http://eprints.uanl.mx/4136/1/1080253831.pdf>

- Fan Bao-Wei, Z. K.-Q.-Y.-N. (9 de noviembre de 2015). *Effect of glass thickness on temperature gradient and stress distribution during glass tempering*. Obtenido de ScienceDirect: <https://sci-hub.se/10.1016/j.jnoncrysol.2016.01.008>
- Farm, R. (14 de noviembre de 2017). *El Consumo Energético del Templado de Vidrio*. Obtenido de <https://www.glastory.net/es/el-consumo-energetico-del-templado-de-vidrio-como-no-dejarse-enganar-por-datos-falsos-parte-1-de-2/>
- Farm, R. (3 de noviembre de 2017). *GLASTORY*. Obtenido de El Consumo Energético del Templado de Vidrio: <https://www.glastory.net/es/glass-tempering-energy-consumption-not-misled-false-data-part-22/>
- Fiehl Marcel, L. J. (22 de julio de 2017). *Biogas as a co-firing fuel in thermal processing industries: implementation in a glass melting furnace*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1876610217327911?token>
- Furszifer Del Rio Dylan, S. B. (05 de marzo de 2022). *Decarbonizing the glass industry: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options*. Obtenido de Sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121011527>
- Gholipour Amir, Z. H. (2020). A novel pilot and full-scale constructed wetland study for glass industry wastewater treatment. *Chemosphere*, 2 - 3.
- Glastory. (11 de 3 de 2017). *El consumo Energético del Templado de Vidrio*. Obtenido de <https://www.glastory.net/es/glass-tempering-energy-consumption-not-misled-false-data-part-22/>

- Griffin Paul, H. G. (26 de febrero de 2021). *Sciencedirect*. Obtenido de <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2666792421000299?token>
- Guerreo Dávila GUadalupe, G. D. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: Grupo Editorial Patria.
- Guy, T. (1996). La industria del Vidrio y el Medio Ambiente evolución, Obligaciones y Oportunidades. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 154-163.
- Hampshire Stuart, P. M. (2014). Grain boundary glasses in silicon nitride: A review of chemistry, properties and crystallisation. *Journal of the European Ceramic Society*, 1925 - 1932.
- Harn Wei Kua, Y. L. (2016). Environmental Impacts of Substituting Tempered Glass with Polycarbonate in Construction-an Attributional and Consecquential Life Cycle Perspective. *Journal of Cleaner Production*, 910-911.
- Hector., M. R. (2012). *Metodología de la Investigación*. Medico DF: Cengage Learning Editores.
- Hof Lucas Abia, W. R. (14 de junio de 2021). *Glass precision micro-cutting using spark assisted chemical engraving*. Obtenido de ScienDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S266691292100026X?token>
- Hubert Mathieu, L. P. (2021). Glass: Anneling and Tempering. *Encyclopedia of Material: Technical Cermics and Glasses*, 623.
- Icontec. (2011). *Nroma Técnica Colombiana NTC 1467*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/67620432/Ntc-1467>

- Imanol, G. (27 de diciembre de 2012). *Ingeniería Química*. Obtenido de ingenieriaquimica.net: <https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/310-icomo-se-obtiene-el-vidrio>
- Institute, A. N. (24 de mayo de 1984). *ANSI webstore*. Obtenido de <https://webstore.ansi.org/standards/bsi/bs34471962>
- Institute, A. N. (18 de agosto de 2003). *Morglass*. Obtenido de https://www.morglass.com/wp-content/uploads/2018/12/ANSI_Z97.1-2004.pdf
- International, A. (1 de abril de 2005). *Engineering 360*. Obtenido de <https://standards.globalspec.com/std/3820787/astm-c1422-99-2005>
- International, A. (31 de diciembre de 2010). *AENOR*. Obtenido de <https://tienda.aenor.com/norma-astm-c1172-09-069434>
- International, A. (25 de junio de 2018). *Data Base Cart*. Obtenido de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C1048-04.htm>
- International, A. (25 de mayo de 2018). *Data Base Cart*. Obtenido de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C1376-03.htm>
- International, A. (1 de abril de 2019). *Engineering 360*. Obtenido de <https://standards.globalspec.com/std/13310714/astm-e2190>
- James, A. (2010). La industria del vidrio refleja cómo China cierra la brecha tecnológica. *The wall Street Journal*, 3-4.
- Jena Hemalata, K. M. (17 de junio de 2019). *Study of influence of process parameters in drilling of glass fibre reinforced polymer composite with clam shell filler*. Obtenido de Sci-hub: <https://sci-hub.se/10.1016/j.matpr.2019.07.622>

- Keith Burrows, V. F. (18 de septiembre de 2014). *Glass Needs for a Growing Photovoltaics Industry*. Obtenido de ScienceDirect: <https://scihub.se/10.1016/j.solmat.2014.09.028>
- kemmerer Federico, R. A. (10 de diciembre de 2016). *Análisis y mejora de procesos*. Obtenido de Universidad Católica de Córdoba.: http://pa.bibdigital.uccor.edu.ar/1382/1/TF_Kemmerer_Ruibal.pdf
- Khan Sultan, A. A. (1 de enero de 2022). *Use of colemanite and borax prenta-hydrate in soda lime silicate glass melting - A strategy tp reduce energy consumption an improve glass properties*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884221029977>
- Khezri Mohsen, H. A. (22 de septiembre de 2021). *Enviromental implications of economic complexity and its role in determinig how renewable energies affect CO2 emissions*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0306261921012587?token>
- Kourti, T. (2020). Multivariate Statistical Process Control and Process Control, Using Latent Variables. *Comprehensive Chemometrisc*, 275 - 303.
- Kovac̃ec Miroslav, P. A. (3 de febrero de 2011). *Improving the quality of glass containers production with plunger process control*. Obtenido de ScienceDirect: <https://scihub.se/10.1016/j.cirpj.2011.02.003>
- Kovacec Miroslav, P. A. (2011). Improvic the quality of glass containers production with plunger process conrol. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 304 - 305.

- Lawrence, W. (1 de diciembre de 2021). *A precision manual grinding tool for sample preparation*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0304399121002126?toke>
- Lecanuet Guillaume, R. E.-A. (2021). Mechanism of alteration of the surface of lead crystal glass in contact with food: A chemical study of the surface layer. *Applied Surface Science*, 1 - 2.
- Li Binlin, H. N. (28 de diciembre de 2021). *Reducing CO2 emissions in G7 countries: The role of clean energy consumption, trade openness and urbanization*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352484722002384?token>
- Li ping, C. S. (8 de octubre de 2020). *Machining behaviors of glass-ceramics in multi-step high-speed grinding: Grinding parameter effects and optimization*. Obtenido de Elsevier: <https://sci-hub.se/10.1016/j.ceramint.2020.10.033>
- Li Yaguo, Z. Q. (30 de marzo de 2017). *Precision Grinding, Lapping, Polishing, and Post-Processing of Optical Glass*. Obtenido de Sci-Hub: <https://sci-hub.se/10.1016/b978-0-12-803581-8.09152-9>
- Li Yuao, L. H.-J.-J. (11 de julio de 2017). *Influence of spout lip set-height on flow behavior during the glass float process*. Obtenido de ScienDirect: <https://sci-hub.se/10.1016/j.jnoncrysol.2017.07.011>
- Li-Hong Chen, D.-W. H. (2013). Highway Freight Terminal Facilities Allocation Based on Flexsim. *ScienceDirect*, 371-372.

- Luis, J. M. (5 de noviembre de 2018). Aplicación de Promodel en Problemas de Producción y Logística para su implementación en el Laboratorio de Simulación de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga.
- Ma Ning-ning, C. J.-r.-j.-j.-m.-z. (2020). Joining of sintered SiC ceramics at a lower temperature using borosilicate glass with laser cladding Si modification layer. *Journal of the European Ceramic Society*, 1 - 2.
- Mabashir Muhammad, A. M. (21 de abril de 2021). *Process modeling and simulation of ethylene oxide production by implementing pinch and cost analysis*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2090447921003506?token>
- Marinelli, M. F. (22 de julio de 2016). Proceso de Fabricación del Vidrio. Universidad José Antonio Paez.
- Martinez Viviana, C. O. (2019). Colombian energy planning - Neither for energy, no for Colombia. *Energy policy*, 1132 - 1133.
- Materials, A. S. (3 de octubre de 2002). *ASTM International*. Obtenido de <https://www.astm.org/stp1434-eb.html>
- Materials, A. S. (30 de abril de 2004). *ASTM International*. Obtenido de https://webstore.ansi.org/Standards/ASTM/ASTME28304?gclid=EAIaIQobChMI8PW-n-bW9AIVfcmUCR0uKQImEAAYASAAEgKNwfd_BwE
- Materials, A. S. (4 de mayo de 2005). *ANSI Webstore*. Obtenido de <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmc1422992005e1>

- Materials, A. S. (1 de octubre de 2005). *IHS Markit Standards Store*. Obtenido de https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ASTM%20C162&item_s_key=00014362
- Materials, A. S. (6 de febrero de 2008). *ANSI Webstore*. Obtenido de <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmf123308>
- Materials, A. S. (7 de noviembre de 2010). *ASTM International*. Obtenido de <https://www.astm.org/c1349-04.html>
- Materials, A. S. (31 de diciembre de 2010). *ASTM intrnational*. Obtenido de <https://www.astm.org/e1915-07.html>
- Materials, A. S. (2013). *ASTM International*. Obtenido de <https://www.astm.org/c1503-08.html>
- Materials, A. S. (4 de agosto de 2014). *ASTM International*. Obtenido de <https://www.astm.org/e2353-06.html>
- Mauricio, R. G. (2013). *Simulador Financiero*. Universidad EAN.
- Mehmet, A. (21 de junio de 2016). *Experimental investigation of the relationship between heat transfer rate and number of broken glass particles in tempering process of glass plates*. Obtenido de Sci-hub: <https://sci-hub.se/10.1016/j.expthermflusci.2017.01.013>
- Mesurex. (2017). *Control de Temperatura en la Fabricación de Vidrio Flotado*. Obtenido de <https://mesurex.com/control-de-temperatura-en-la-fabricacion-de-vidrio-flotado/>

- Michael Zier, P. S. (9 de junio de 2021). *A Review of Decarbonization Options of the Glass Industry*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2590174521000088?token>
- Ming Liu, Xuenan Yang, F. C. (2019). Energy-oriented bi-objective Optimization for the tempered Glass Scheduling. *International Journal of Production Research*, 5974 - 5995.
- Ministerio de Comercio, I. y. (21 de abril de 2008). *Sistema Único de Información Normativa*. Obtenido de <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=4024824>
- Mogus-Milankovic Andrea, S. A. (2021). Glasses: Phosphates. *Encyclopedia of Materials: Technical ceramics and glasses*, 580 - 590.
- Morton, D., Reyes, A., & Clausen, A. (2020). Mechanical response of low density expanded polypropylene foams in compression and tension at different loading rates and temperatures. *Materials Today Communications*, 1-2.
- Motta Toledo Claudio Fabiano, D. S.-L. (17 de marzo de 2016). *Mathematical programming-based approaches for multi-facility glass container production planning*. Obtenido de ScienceDirect: <https://sci-hub.se/10.1016/j.cor.2016.02.019>
- Muniz R F, S. V. (2021). Thermal, optical and structural properties of relatively depolymerized sodium calcium silicate glass and glass-ceramic containing CaF₂. *Ceramic International*, 3 - 4.
- Nahmias, S. (2007). *Análisis de la Producción y las Operaciones*. México: McGraw Hill.

- Nielsen Jens, T. K. (15 de julio de 2021). *Compressive zone depth of thermally tempered glass*. Obtenido de Sciencedirect:
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0950061821029809?token>
- Nielsen Jens, T. K. (15 de julio de 2021). *Compressive zone depth thermally tempered glass*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0950061821029809?token>
- Nieves J.A, A. A. (21 de 05 de 2018). Energy demand and greenhouse gas emissions analysis in Colombia: A LEAP model application. *Energy*, 380 - 381. Obtenido de ScienceDirect.
- Normas, D. G. (19 de abril de 2016). *IDC online*. Obtenido de http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6411/seeco11_C/seeco11_C.html
- ONU, m. (23 de julio de 2015). *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.unwomen.org/es/what-we-do/2030-agenda-for-sustainable-development>
- Ortíz Barrios Miguel Angel, F. J. (2014 de abril de 2014). *Metodología miceps para control estadístico de procesos: caso aplicado al proceso de producción de vidrio templado*. Obtenido de Universidad Autónoma del Caribe:
<https://www.redalyc.org/pdf/4962/496250640008.pdf>
- Pallapothu Harika, K. U. (13 de noviembre de 2019). *Micro drilling of glass fibre reinforced polymer composites*. Obtenido de Sci-hub: <https://sci-hub.se/10.1016/j.matpr.2020.01.545>

- Parreño F, A.-V. R. (2020). Mathematical models for a cutting problem in the glass manufacturing industry. *Elsevier ltd*, 1-2.
- Patiño Luordes Isabel, A. V. (2019). Driving forces of CO2 emissions and energy intensity in Colombia. *Elservier Energy policy*, 1-2.
- Pérez Martínez Jineth, F. H. (4 de octubre de 2017). *Procedimiento para el diagnóstico del proceso de control e gestión basado en variables Fuzzy para la incertidumbre*. Obtenido de Biblioteca Universidad EAN: <https://eds-p-ebsohost-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid>
- Pérez Sánchez Amaury, B. C. (2020). *Siulación de Procesos Químicos y Aplicaciones del Simulador SuperPro Designer*. Buenos Aires: Ediciones Gráfica Libertad.
- Pérez Sánchez Amaury, R. G. (25 de agosto de 2020). *Simulación del Proceso de Producción de Anhíbrido Maleico Mediante el Simulador ChemCAD*. Obtenido de Universidad EAN: <https://eds-s-ebsohost-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/>
- Piarristeguy Andrea, N. R. (3 de febrero de 2021). *High-resolution electrical characterization of RuO2-borosilicate glass composites*. Obtenido de ScienceDirect: <https://sci-hub.se/10.1016/j.jallcom.2021.160123>
- Portillo Ramos, R. E., Segura, J. M., & Florez Marulanda, J. F. (2020). Análisi de Consumos y Costos Eléctricos de Producción por Producto en una Empresa Licorera. *Revista Producción + Limpia*, 49-61.
- Povorov A.A, N. I. (24 de marzo de 2002). *Hydrofluoric acid recovery integrated membrane technology from glass production concentrated washing waters*. Obtenido de ScienceDirect: [https://sci-hub.se/10.1016/s0011-9164\(02\)00741-5](https://sci-hub.se/10.1016/s0011-9164(02)00741-5)

- Product, S. (22 de marzo de 2010). Plant Simulation, Optimización y Simulación de planta, Líneas y Procesos.
- Pupo-Roncillo O, C. J. (7 de noviembre de 2020). *The Role of energy storage and cross-border interconnections for increasing the flexibility of future power systems: The case of Colombia*. Obtenido de Sciencedirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2666955221000162?token>
- Rahman Mohammad Mafizur, A. K. (14 de septiembre de 2021). *Reduction of CO2 emissions: The role of renewable energy, technological innovation and export quality*. Obtenido de Sciencedirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352484722002001?token>
- Ramirez Gonzalez, P. E. (2019). Vidrios, Geles y otros Materiales Desequilibrados. *Instituto de Fisica UASLP*, 18-23.
- República, P. d. (18 de diciembre de 1974). *Función Pública*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551>
- Ricardo Pérez, A. H. (25 de octubre de 2018). Simulación de Procesos de Producción en Configuración JobShop. Aguascalientes.
- Roman, G. B. (5 de julio de 2015). *Efecto de la composición en las propiedades de vidrios del sistema Ca-M-Si-Al-O-N-F (M=Y / Er / Nd / Mg)*. Obtenido de file:///D:/Downloads/2015_Tesis_Garcia%20Belles_Angel%20Roman.pdf
- Sandín., R. (2015). Fractología Industrial del Vidrio Templado. *Tesis de Doctorado*.
- Santoso Imam, R. M.-k. (6 de enero de 2022). *Impack of Recently discovered sodium calcium silicate solutions on the phase diagrams of relevance for glass-ceramis in*

the Na₂O-CaO-SiO₂ system. Obtenido de Scienedirect:
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0955221922000103?token>

Schicht H, E. M. (1997). Pin-pointed modification of glass surfaces by using specific washing compounds. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 210 - 211.

Schmitz Andreas, K. J. (28 de abril de 2010). *Energy consumption and CO₂ emissions of the European glass industry.* Obtenido de Sci-hub: <https://sci-hub.se/10.1016/j.enpol.2010.09.022>

Schroeder, R. G. (2004). *Administración de Operaciones. Casos y Conceptos Contemporáneos.* México: McGraw Hill.

Sebastian Lang, T. R. (2021). Open-source discrete-event simulation software for applications in production and Logistics: An alternative to comercial tools? *ScienceDirect*, 981-982.

Seo kyeongjun, E. T. (13 de diciembre de 2019). *Optimal demand response operation of electric boosting glass furnaces.* Obtenido de ScienceDirect: <https://sci-hub.se/10.1016/j.apenergy.2020.115077>

Sharma Ankit, J. V. (2 de marzo de 2018). *Characterization of Chipping and Tool wear during drilling of Float glass using rotary ultrasonic machining.* Obtenido de Sci-hub: <https://sci-hub.se/10.1016/j.measurement.2018.06.040>

Shuflan Abu, R. M. (18 de enero de 2022). *Electronics and waste material recycler energy-efficient electric.* Obtenido de ScienceDirect:
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S266679082200012X?token>

- Social, C. N. (23 de junio de 2008). *Departamento Nacional de Planeación*. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3530.pdf>
- Social, C. N. (21 de noviembre de 2016). *Departamento Nacional de Planeación*. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>
- Social, M. d. (27 de junio de 2013). *ICBF*. Obtenido de https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minsaludps_0835_2013.htm
- Sostenible, M. d. (26 de julio de 2018). *Andi*. Obtenido de <http://www.andi.com.co/Uploads/RES%201407%20DE%202018.pdf>
- Strugaj Gentiana, H. A. (2021). AES and EDX surface analysis of weathered float glass exposed in different environmental conditions. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1 - 2.
- Systems, D. D. (2017). *Las propiedades del Vidrio Borosilicato*. Obtenido de <https://www.dedietrich.com/es/soluciones-y-productos/esmalte-vidrio-de-borosilicato/las-propiedades-del-vidrio-de-borosilicato>
- Tackels, G. (1996). La industria del Vidrio y el Medio Ambiente, Evolución, Obligaciones y Oportunidades. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 155.
- Tearwattanarattikal Pochamam, N. S. (25 de septiembre de 2007). *Using ProModel as a simulation tools to assist plant layout design and planning: Case study plastic packaging factory*. Obtenido de Biblioteca Universidad EAN: <https://eds.p.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid>

- Unidas, N. (14 de junio de 1992). *Declaración de Río Sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/302444901/Declaracion-de-Rio-Sobre-El-Medio-Ambiente-y-El-Desarrollo>
- Unidas, N. (27 de abril de 2000). *Biblioteca Semana*. Obtenido de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/recursos/224844/Contenido/H%20programas/23%20Agenda%2021.pdf>
- Unidas, N. (2015). *Acuerdo de París*. París.
- Varshneya Arun K, j. C. (2019). *Fundamentals of Inorganic Glasses Third Edition*. Pennsylvania: Editorial Project Manager.
- Vidrio, I. d. (2003). *Residuos Industria del Vidrio*. Obtenido de <https://prtres.es/Data/images//Resumen%20Ejecutivo%20BREF%20Vidrio-95C9842B5A381DCD.pdf>
- Vivienda, M. d. (3 de diciembre de 2014). Norma Ecuatoriana de La construcción. Guayaquil: Dirección de comunicación social.
- W. David Kelton, R. P. (2010). *Simulación con Software Arena*. McGraw Hill.
- Wang Tianchun, N. R. (24 de agosto de 2021). *Sustainable utilisation of low-grade and contaminated waste glass fines as a partial sand replacement in structural concrete*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2214509521003090?token>
- Wang Yingbin, L. J. (26 de febrero de 2020). *Effects of wet-grinded superfine waste glass on the fresh properties and reaction characteristic of cement pastes*. Obtenido de ScienceDirect: <https://sci-hub.se/10.1016/j.conbuildmat.2020.118593>

- Willsey, A. (2017). *Como Fabrican el Vidrio*. Obtenido de https://www.cinconoticias.com/todo-necesitas-como-fabrican-el-vidrio/#Como_se_fabrica_el_vidrio_Tecnicas_mas_utilizadas
- Wlodarczyk Krystian, B. A. (10 de junio de 2015). *Picosecond laser cutting and drilling of thin flex glass*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0143816615002146?token>
- Wulf Chritina, Z. P. (08 de marzo de 2022). *Analyzing the future potencial of defossilizing industrial specialty glass production with hydrogen by LCA*. Obtenido de ScienceDirect: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2212827122001123?token>
- www.esan.edu.pe. (10 de 10 de 2018). Obtenido de www.esan.edu.pe: <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2018/10/las-etapas-del-scrum-como-aplicar-este-metodo/>
- Yang Hua, L. F. (24 de enero de 2022). *Spray cooling heat transfer during glass tempering process and influencing factors on the quality of tempered glass*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072922000187>
- Zhang Qin, C. Z. (2010). Simulation of tin penetration in the float glass procees (float glass tin penetration). *Applied Thermal Engenieering*, 1272.
- Zhiwei Li, X. H. (2014). Desing of a Flat Glass Furnace Waste Heat Power Generation System. *Applied Thermal Engineering*, 290-296.
- Zhou Tiafeng, W. Z. (2021). Study on the blackening phenomenon of leaded glass during microgroove molding using nockel phosphorous mold. *Ceramic International*, 5 - 6.