

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX-SIGMA PARA REDUCCIÓN DE COSTOS EN EL
PROCESO DE PRODUCCIÓN DE POLIESTIRENO

LEXY MIRELLA QUINTERO ROA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2004

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX-SIGMA PARA REDUCCIÓN DE COSTOS EN EL
PROCESO DE PRODUCCIÓN DE POLIESTIRENO

LEXY MIRELLA QUINTERO ROA

Trabajo de grado presentado para optar el título de
Ingeniera Química

Director:

CLEMENTE RETAMOSO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2004

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	XI
1. METODOLOGÍA SIX-SIGMA	3
1.1. ETAPAS DE LA METODOLOGÍA SIX-SIGMA	3
1.1.1. Definir.	3
1.1.2. Medir.	4
1.1.3. Analizar.	4
1.1.4. Mejorar.	5
1.1.5. Controlar.	5
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	6
2.1. QUÍMICA DE LA POLIMERIZACIÓN DEL ESTIRENO	6
2.2. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE POLIESTIRENO A ESCALA INDUSTRIAL.....	7
2.2.1. Poliestireno de Propósito General.	7
2.2.2. Proceso de Poliestireno de Alto Impacto.	8
3. DISOLUCIÓN DE POLIESTIRENO FUERA DE ESPECIFICACIÓN EN EL PROCESO	10
3.1. INTRODUCCION.....	10
3.1.1. Justificación económica.	10
3.1.2. Carta del Proyecto – SIX SIGMA	11
3.1.3. Mapa de Proceso.	12
3.1.4. Diagrama de Flujo de la Producción de poliestireno de propósito general.	13
3.2. MEDICION DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE PRODUCCION DE POLIESTIRENO DE PROPOSITO GENERAL.....	14
3.2.1. Variables de Entrada	14
3.2.2. Variables de Proceso	15
3.2.3. Variables de Salida	15
3.3. ANÁLISIS DE LAS CAUSAS DE GENERACION DE POLIESTIRENO FUERA DE ESPECIFICACION	16
3.3.1. Análisis Causa-Raíz.	16
3.3.2. Porcentaje de Poliestireno a Disolver.	19

3.3.3. Selección de Productos a Disolver.	22
3.4. MEJORAMIENTO DEL PROCESO. INGENIERIA DEL SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMATICO.	22
3.4.1. Factores de Diseño	22
3.4.1.1. Capacidad requerida.	22
3.4.1.2. Longitud de desplazamiento y elevación de los sólidos.	23
3.4.2. Características del material.	23
3.4.2.1. Caracterización del poliestireno.	23
3.4.3. Diseño del Sistema de Transporte Neumático.	23
3.4.3.1. Cálculo del soplador rotatorio.	24
3.4.3.2. El alimentador de sólidos.	30
3.4.3.3. El ciclón.	31
3.4.3.4. Válvula "Diverter".	36
3.4.3.5. Tolva de almacenamiento.	36
3.4.4. Beneficio esperado por la implementación del sistema.	39
3.5. CONTROL	40
4. ATMÓSFERA INERTE EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO	41
4.1. INTRODUCCION	41
4.1.1. Límites del proyecto	41
4.1.1.1. Arranque	41
4.1.1.2. Parada	42
4.1.2. Carta Del Proyecto – Six Sigma	42
4.1.3. Diagrama de Flujo del suministro de nitrógeno a la planta de poliestireno	43
4.2. MEDICION DE LAS VARIABLES QUE DETERMINAN LOS CONSUMOS DE NITROGENO DENTRO DEL PROCESO	43
4.2.1. Definición de las variables del Sistema de Atmósfera inerte	43
4.2.2. Sistema de distribución de N₂ en la planta de poliestireno	44
4.3. ANALIZAR	46
4.4. MEJORA	46
4.4.1. Etapas en el diseño	47
4.4.1.1. Calcular el espacio del vapor del tanque.	47
4.4.2. Dimensionar el sistema de atmósfera inerte "blanketing".	48
4.4.2.1. Sistema de atmósfera inerte por control de presión.	48
4.4.2.2. Descripción del proceso de inertización con control de la concentración de oxígeno	50
4.4.3. Definición de los Venteos del tanque.	53
4.4.3.1. Venteo de vacío.	53

4.4.3.2. Venteo de presión.	53
4.4.3.3. Venteo de emergencia.	53
5. CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFIA	55
ANEXOS	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Pérdidas anuales por producto fuera de especificación.	10
Tabla 2. Viscosidad de mezclas estireno-caucho a 23°C.....	19
Tabla 3. Viscosidad de mezclas Estireno - Caucho a 23°C	20
Tabla 4. Viscosidad de mezclas Estireno - Caucho -Poliestireno Fuera de Espec. a 23°C.....	21
Tabla 5. Pérdidas de presión y energías requeridas para vencer la fricción del sólido.	27
Tabla 6. Pérdidas de presión en el gas	29
Tabla 7. Cálculo del soplador requerido para transporte neumático	30
Tabla 8. Velocidad de giro para válvula estrella	31
Tabla 9. Consumo de potencia según velocidad de giro de válvula estrella	31
Tabla 10. Cálculo de las dimensiones del ciclón.	35
Tabla 11. Dimensiones sección vertical Tolva de almacenamiento.....	37
Tabla 12. Dimensiones tolva de almacenamiento	38
Tabla 13. Valor de productos de poliestireno antes y después de la disolución de poliestireno fuera de especificación	39
Tabla 14. Variables que afectan el sistema de distribución de nitrógeno.....	44
Tabla 15. Capacidad de los tanques que requieren atmósfera inerte.....	45
Tabla 16. Masa de nitrógeno requerida para mantener los tanques bajo atmósfera inerte	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Reacción de Polimerización del Estireno.....	6
Figura 2. Cronograma del proyecto de disolución de poliestireno.....	12
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de producción de poliestireno de propósito general.	13
Figura 4. Diagrama del análisis causa-raíz para la generación de poliestireno fuera de especificación	17
Figura 5. Viscosidad de mezclas estireno-caucho a 23°C.....	20
Figura 6. Viscosidad de mezclas Estireno-Caucho-Poliestireno Fuera de Espec. a 23C	21
Figura 7. Diagrama del sistema de transporte neumático de poliestireno.....	24
Figura 8. Velocidad de aire vs densidad del sólido para transporte neumático.....	25
Figura 9. Esquema del ciclón convencional	32
Figura 10. Relaciones dimensionales para el cálculo del ciclón.....	33
Figura 11. Válvula "diverter" tipo "Y"	36
Figura 12. Diagrama de flujo para el suministro de nitrógeno a la planta de producción de poliestireno.	43
Figura 13. Mapa de distribución del nitrógeno en la planta de poliestireno.....	45
Figura 14. Esquema típico de válvulas y accesorios para control en tanques de almacenamiento	47
Figura 15. Componentes del sistema de "blanketing" por control de presión.....	49

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Mapa del Proceso de Producción de Poliestireno de Propósito General	12
Cuadro 2. Variables de entrada al proceso de producción de poliestireno de propósito general	14
Cuadro 3. Variables de proceso en la producción de poliestireno de propósito general	15
Cuadro 4. Variables de salida del proceso de producción de poliestireno de propósito general.....	15
Cuadro 5. Criterios para la selección del diámetro de corte	35

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Almacenamiento de estireno.....	58
Anexo B. Etapas de la polimerización del estireno.....	60
Anexo C. Diagrama de flujo del proceso de producción de poliestireno de propósito general.....	63
Anexo D. Diagrama del proceso de producción de poliestireno de alto impacto.....	64
Anexo E. Mapa de procesos producción de poliestireno de alto impacto.....	65
Anexo F. Caracterización y aplicaciones del poliestireno cristal y de alto impacto.....	69
Anexo G. Viabilidad económica del proyecto.....	72
Anexo H. Modelo matemático que define el sistema de atmósfera inerte.....	78

TITULO
APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX-SIGMA PARA REDUCCIÓN DE COSTOS
EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE POLIESTIRENO*

AUTOR
LEXY MIRELLA QUINTERO ROA**

PALABRAS CLAVES
Poliestireno, six-sigma, disolución, transporte neumático, nitrógeno.

DESCRIPCIÓN O CONTENIDO

La producción de poliestireno de propósito general, consiste en la polimerización del estireno bajo condiciones controladas de temperatura y catalizador. El poliestireno de alto impacto se produce adicionando polibutadieno antes de iniciarse la polimerización. En el proceso, el nitrógeno es usado para la creación de atmósfera inerte en los tanques de almacenamiento de materias primas, control de vacío y limpieza de filtros.

El propósito principal de este trabajo fue la aplicación de las etapas de la metodología Six-Sigma (definición, medición, análisis, mejora y control) para reducción de costos en el proceso de producción de poliestireno. Se definieron las causas de generación de poliestireno fuera de especificación en el proceso. Se realizaron pruebas de laboratorio para medir la viscosidad de mezclas estireno-caucho-poliestireno fuera de especificación que permitieran encontrar la capacidad del sistema de transporte neumático. Se realizó el diseño de los equipos del sistema de transporte neumático (soplador, ciclón, tolva de almacenamiento, válvula diverter, alimentador de sólidos) que permitan la disolución de poliestireno fuera de especificación en el proceso y se evaluó la viabilidad económica del proyecto de disolución.

Se determinaron las condiciones para el control de atmósfera inerte usando nitrógeno en tanques de almacenamiento de materias primas por definición de las válvulas de admisión de nitrógeno, válvulas de venteo normal y válvulas de emergencia de cada tanque de almacenamiento.

* Trabajo de Grado

** Facultad De Ingenierías Físicoquímicas. Escuela De Ingeniería Química. Clemente Retamoso Rodríguez

TITLE

APLICACION OF SIX-SIGMA METHODOLOGY FOR COST REDUCTION IN POLYSTYRENE PRODUCTION PROCESS*

AUTOR

LEXY MIRELLA QUINTERO ROA**

KEY WORDS

Polystyrene, six-sigma, dissolution, pneumatic transport, nitrogen.

DESCRIPTION OR CONTENT

General purpose polystyrene is produced by styrene polymerization under controlled conditions of temperature and catalyst. High impact polystyrene is produced by addition of poly-butadiene before polymerization is initiated. In the process, the nitrogen is used for creation of inert atmospheres in raw material storage tanks, vacuum control and filters cleaning.

The main purpose of this work was the application of Six-Sigma methodology (definition, measure, analysis, improvement and control) in order to achieve cost reductions in the polystyrene process. The causes of wide specifications polystyrene generation were found. The laboratory tests to measure the viscosity of wide specification polystyrene-rubber-styrene mixtures were realized to find the capacity of pneumatic transport system. The pneumatic transport equipments (blower, cyclone, hopper, diverter valve, rotary valve) for the dissolution of wide specification polystyrene in the process were designed and the economic viability of the dissolution project was evaluated.

The conditions for nitrogen hert atmosphere in raw material storage tanks were determined defining the blanketing valves, normal vents and emergency vents for each storage tank.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas . Escuela De Ingeniería Química. Clemente Retamoso Rodríguez

INTRODUCCIÓN

El proceso de producción de poliestireno a escala industrial se hace cada vez más exigente con el fin de mantener la competitividad y asegurar la excelencia del negocio. La globalización y el fácil acceso a la información exigen maximizar esfuerzos para superar las expectativas de los clientes con el menor costo de inversión.

La reducción de costos en la producción de poliestireno implica buscar alternativas que aumenten la eficiencia y mejoren la rentabilidad del proceso. La aplicación de la metodología Six-Sigma permitirá desarrollar las estrategias propuestas mediante la aplicación de las etapas de definición, medición, análisis, mejora y control.

La producción de resinas de poliestireno consiste en la polimerización del estireno bajo condiciones controladas de temperatura y cantidad de catalizador. Las especificaciones finales del producto son cuidadosamente ajustadas mediante el control riguroso del proceso en cada etapa. Sin embargo, debido a fallas durante la operación o problemas de contaminación de la materia prima se obtiene producto fuera de especificaciones de calidad. La disolución de este poliestireno en el tren de reacción sin afectar la calidad final del producto, se presenta como alternativa de mejora al proceso.

En el área de Disciplina Operacional se presenta el diseño de una base de datos para el registro continuo de información de proceso: materias primas, condiciones de operación, cambios en la producción, revisión de los equipos de seguridad, prioritariamente. Esta información permitirá hacer seguimiento al proceso y llevar a cabo acciones preventivas y correctivas de acuerdo con los requisitos de calidad.

La producción de poliestireno requiere como servicios industriales energía eléctrica y calorífica, nitrógeno, aire comprimido, agua de proceso y agua potable. Dentro de las oportunidades de reducción de consumo de servicios industriales, se evalúa en el presente trabajo, la reducción de consumos de nitrógeno en el proceso.

El desarrollo de las tres estrategias planteadas implica conocer el proceso de producción de poliestireno, las reacciones de polimerización, el funcionamiento de los equipos de proceso, los sistemas de registro y control, los requerimientos de calidad del producto final, los lineamientos de seguridad industrial, la metodología Six-Sigma y demás fundamentos en otras áreas involucradas en el proceso de transformación de estireno a poliestireno.

1. METODOLOGÍA SIX-SIGMA

El presente trabajo se desarrolló siguiendo las etapas de la metodología Six-Sigma para introducir mejoras en el proceso de producción de poliestireno.

La metodología Six-Sigma es una forma de medir el desempeño de un proceso en cuanto a su nivel de productos o servicios fuera de especificación; y permite establecer mejoras al proceso para desempeñar trabajo libre de defectos, entendiéndose por defecto, cualquier variación de un producto, servicio o proceso que agrega costo y/o no permite satisfacer las necesidades del cliente.

En 1988, la compañía Motorola ganó el Premio Nacional de Calidad de Estados Unidos; su esfuerzo estuvo basado en el objetivo de lograr la "satisfacción total del cliente" como estrategia de negocio desde 1987. A partir de tal iniciativa, se definió en 1992 la metodología Six-Sigma, adecuada para mejorar continuamente los procesos y productos.

1.1. ETAPAS DE LA METODOLOGÍA SIX-SIGMA

1.1.1. Definir. Consiste en describir el efecto provocado por una situación adversa dentro del proceso, entender la situación y definir objetivos. Como herramientas para definir el problema se usan la carta del proyecto y el mapa de procesos.

En la carta del proyecto, se deben incluir los siguientes ítems: Justificación económica del proyecto con respecto a los objetivos de la empresa; definición específica del problema indicando donde y cuando ocurre; verificación de si el problema y los objetivos cumplen las características de ser específicos, medibles, alcanzables, relevantes y con límite de tiempo y la definición de los límites; condición actual y punto de parada del proyecto.

En el mapa de procesos se tiene en cuenta el diagrama de flujo del proceso a mejorar.

1.1.2. Medir. Consiste en describir el proceso (entradas, salidas y características) y diseñar un plan sólido de recolección de datos el cual incluye un análisis de los sistemas de medición. Como herramienta se presentan las Tablas de identificación de las variables claves de entrada, de proceso y de salida del proceso existente.

1.1.3. Analizar. Consiste en confirmar las variables del proceso y determinar su variación en el mismo. Consiste en hacer el análisis de las etapas anteriores, en cuanto a los datos disponibles y conocimiento del proceso. En esta etapa se analiza si el mapa de procesos está lo suficientemente detallado como para identificar los pasos críticos del proceso.

Como herramienta fundamental de esta etapa se tiene el Análisis Causa Raíz, el cual es particularmente útil para situaciones donde hay pocos datos disponibles. Para llevarlo a cabo puede utilizarse el Método Apollo, método que se basa en el principio de que no existe una sola respuesta correcta para los problemas, las soluciones se encuentran en un conjunto infinito de causas. Se buscan soluciones efectivas que previenen la recurrencia; aquellas que están bajo control y satisfacen las metas y objetivos.

En la definición del problema se deben responder cuatro preguntas: ¿Que?, ¿Cuándo?, ¿Dónde? ¿Porque?. El qué, permite identificar el problema que se desea evitar que ocurra. Corresponde al efecto primario. El cuándo, permite identificar el momento real en que sucede el problema; momento o condiciones relativas. El dónde, permite Identificar el sitio específico del problema , puede ser un proceso o una pieza de un equipo. La relevancia, busca priorizar incidentes, puede ser dada la frecuencia o su potencial.

Cada vez que se pregunte el por qué se debe buscar acciones y condiciones para determinar las causas. Las acciones son causas momentáneas que disponen las condiciones de manera tal que ocurre un efecto. Las condiciones son causas que existen en el tiempo.

Con frecuencia las mejores soluciones están ligadas a las condiciones, por lo general las acciones involucran personas. Las condiciones son más fáciles de controlar que las acciones.

El primer paso en este método es definir el efecto primario, el cual debe responder a la pregunta por que? y luego enlazarlo a las causas mediante la frase “causado por” (CP); a cada causa es necesario encontrarle un “causado por” (CP) y así sucesivamente hasta cuando se crea que ya no existen más causas.

1.1.4. Mejorar. Consiste en generar y probar posibles soluciones, seleccionar la mejor solución y diseñar el plan de implementación. Deben hacerse un mapa para el proceso nuevo y mejorado y un análisis costo beneficio de la solución a implementar; es importante reportar cuales fueron las suposiciones fundamentales en este análisis y definir la forma en que se va a asegurar que la solución funcione.

1.1.5. Controlar. Consiste en diseñar un plan de control para dar seguimiento al proceso, manteniendo la mejora a largo y corto plazo. En esta etapa es necesario definir los procesos estándar y documentación para operación normal, para mejorar y buscar continuamente las condiciones de operación, materiales, procedimientos, que conduzcan a un mejor desempeño del proceso.

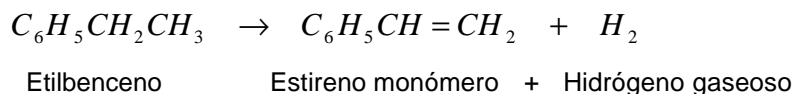
2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. QUÍMICA DE LA POLIMERIZACIÓN DEL ESTIRENO

El estireno es la materia prima para la producción de poliestireno. El estireno, por ser un compuesto orgánico volátil, requiere ser almacenado bajo condiciones especiales de atmósfera inerte. En el Anexo A, se presenta una descripción de los factores que deben ser considerados durante su almacenamiento.

El etileno que se obtiene a partir de "cracking", reacciona por alquilación con benceno para formar etilbenceno, el cual por des-hidrogenación catalítica produce estireno.

La reacción principal que describe la producción de estireno corresponde a



El estireno monómero se polimeriza rápidamente a poliestireno, mediante reacción en cadena por radicales libres y puede iniciarse térmicamente o mediante el uso de un iniciador.

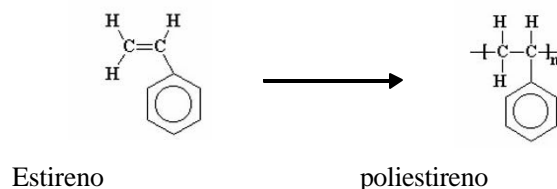


Figura 1. Reacción de Polimerización del Estireno

Los tres tipos de poliestireno más usados son el poliestireno cristal, el de alto impacto y el expandible. En ellos la estructura molecular es atáctica, es decir, el grupo fenil (C₆H₅-) se localiza aleatoriamente a lo largo de las cadenas de polímero.

La polimerización del estireno monómero es altamente exotérmica y las propiedades del polímero están gobernadas por factores como el control de la concentración de catalizador, la temperatura y el tiempo de reacción, entre otros. Las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo la reacción tienen un gran efecto sobre la longitud de la cadena, grado de ramificación, distribución en la composición del polímero, distribución de la secuencia del polímero y otras medidas de las estructuras moleculares que afectan directamente sus propiedades finales.

En el Anexo B, se presenta una breve descripción de las etapas que gobiernan la polimerización del estireno.

2.2. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE POLIESTIRENO A ESCALA INDUSTRIAL

Para propósitos de este trabajo se considerarán la producción de poliestireno: poliestireno cristal o de propósito general y poliestireno de alto impacto.

2.2.1. Poliestireno de Propósito General. El poliestireno cristal es producido por polimerización en masa continua del estireno monómero. La agitación controla el tamaño de los cristales y el ciclo de calentamiento y catalizador controlan el peso molecular y la distribución de peso molecular.

El poliestireno cristal presenta transparencia, y rigidez, es químicamente inerte y resistente al agua, lo que lo hace útil en aplicaciones electrónicas, de alimentos, automóviles, etc.

El proceso de producción de poliestireno de propósito general consiste de un reactor de ebullición con agitación, dos devolatilizadores con sistema de vacío para recuperar el estireno que no reacciona y un sistema de terminación del producto mediante extrusión, granulación y empaque.

El estireno es alimentado desde los tanques de almacenamiento al reactor a través de bombas, pasando antes por una torre de alúmina para retirar el inhibidor. El reactor, es un tanque bien agitado con flujo continuo de alimentación y producto. El reactor presenta una chaqueta de enfriamiento con aceite térmico, para regular la temperatura de la reacción. Del condensador se regresan al reactor todos los condensables que se evaporan del mismo por ebullición del material.

Aditivos como el agente desmoldante, oxidantes, aceite mineral y compuestos de Titanio “blue tone” son agregados al reactor para mejorar las propiedades finales del producto, como son el peso molecular, la distribución del peso molecular, nivel de plasticidad, color, índice de fluidez, entre otros.

El Iniciador, aumenta la concentración de radicales libres, acelera la velocidad de reacción; el aceite mineral mejora el flujo y la procesabilidad de moldeo por inyección; el etilbenceno, disminuye la viscosidad del reactante; su presencia cambia la concentración del monómero y el coeficiente de actividad, disminuye el porcentaje de sólidos, baja el peso molecular del polímero y aumenta el índice de fluidez; los compuestos de Titanio, absorben longitudes de onda de la luz que causan el efecto de coloración amarilla en el producto. Los antioxidantes son compuestos fenólicos, agregados para retardar la degradación de los polímeros debido a la oxidación del aire.

En el primer devolatilizador, lo que se desea recuperar es el etilbenceno y el monómero que no reaccionó con la mínima formación de cadenas cortas. En una sola etapa se requeriría elevar mucho la temperatura, favoreciendo la formación de cadenas cortas que son indeseables. La primera devolatilización llega hasta el 80% de sólidos; los vapores de estireno y etilbenceno se condensan en un intercambiador vertical de tubo y carcaza.

En el segundo devolatilizador, se busca obtener el 100% de sólidos. La condensación de los vapores se da en dos etapas: un condensador parcial busca la separación de dímeros y trímeros. El condensador final recupera trazas del estireno que no reaccionó para permitir su aplicación en productos de la industria médica y alimenticia.

En el Anexo C se presenta el diagrama de flujo para la producción de poliestireno de propósito general.

2.2.2. Proceso de Poliestireno de Alto Impacto. El poliestireno de alto impacto es producido por adición de pequeñas cantidades de polibutadieno al poliestireno. Los grados de alto impacto típicamente incluyen 2-12% de polibutadieno. El polibutadieno es disuelto en el estireno monómero y el proceso de polimerización en masa es usado para producir los copolímeros con las propiedades deseadas. Este poliestireno es más resistente al impacto, lo cual lo hace útil en las aplicaciones electrónicas y de refrigeración.

Es un proceso continuo. Las balas de poli-butadieno se muelen y se mezclan con el estireno monómero. Luego se permite un tiempo de disolución en un tanque con agitación. Fase crítica del

proceso ya que en esta fase se controlan las propiedades físicas y la morfología del caucho en el producto terminado.

Una vez diluido el caucho, se pasa por una etapa de filtración. Simultáneamente, se mezclan el diluyente y el iniciador y se dosifican al reactor. La fase de pre-polimerización se da mediante calentamiento en un intercambiador de tubo y carcaza para alcanzar un porcentaje inicial de sólidos.

La reacción se sucede en tres reactores donde la temperatura asciende gradualmente y se controla mediante un serpentín por donde circula aceite térmico "DTA". Este fluido tiene la particularidad de que a elevadas temperaturas y bajas presiones no se vaporiza, por lo cual soporta temperaturas hasta de 350°C y permanece líquido.

Aditivos tales como el agente desmoldante y antioxidantes, se agregan al sistema para mejorar las propiedades finales del producto. El mercaptano permite controlar el tamaño de la partícula de caucho y el peso molecular.

En el devolatilizador se remueve el monómero residual desde el polímero fundido y se alcanza un porcentaje de sólidos del 100%. El polímero fundido es peletizado y tamizado y luego es transportado neumáticamente hasta los silos de almacenamiento donde se tienen facilidades de empaque.

En el Anexo D se presenta el esquema para la producción de poliestireno de alto impacto.

3. DISOLUCIÓN DE POLIESTIRENO FUERA DE ESPECIFICACIÓN EN EL PROCESO

3.1. INTRODUCCION

Dentro de las oportunidades de ahorro de costos en el proceso de producción de poliestireno se ha detectado la evaluación de las causas de generación de producto fuera de especificación, su posible eliminación del proceso o la búsqueda de alternativas para su disposición final.

La definición del problema según la metodología Six-Sigma, incluye la justificación económica del proyecto, la elaboración de una carta de proyecto, el mapa de proceso y el diagrama de flujo del proceso existente.

3.1.1. Justificación económica. El poliestireno fuera de especificación generado por fallas durante la operación o problemas de contaminación de la materia prima se vende en el mercado a un precio inferior a su valor comercial. En la Tabla 1 se muestran las pérdidas en dólares para el poliestireno fuera de especificación que se genera en una planta de producción de 71400 ton/anales producto.

Tabla 1. Pérdidas anuales por producto fuera de especificación.

	Poliestireno de alto impacto	Poliestireno Cristal	Total
<i>Producción anual [ton]</i>			
Producto Prime	37.000	24.200	61.200
Producto Fuera de especificación	6.705	3.495	10.200
<i>Precios [US\$/ton]</i>			
Producto Prime	900	860	
Producto Fuera de especificación	495	473	
Total Pérdidas por producto fuera de especificación [US\$/año]			
	2.715.525	1.492.365	4.207.890

Adicionalmente, el poliestireno fuera de especificación almacenado genera altos costos de almacenamiento, ya que su demanda en el mercado nacional e internacional es considerablemente baja.

3.1.2. Carta del Proyecto – SIX SIGMA.

Título del Proyecto:

Disminución del volumen de venta de poliestireno fuera de especificación.

Impacto del Proyecto:

El poliestireno fuera de especificación es actualmente vendido en un mercado en el cual se pierde un elevado porcentaje de su valor comercial. Esta reducción de valor tiende a desplazar potencialmente las ventas de producto bajo especificación, afecta los índices de calidad del producto y representa una oportunidad de disminución de valor agregado a las materias primas.

Oportunidad:

La implementación de una alternativa que disminuya la necesidad de vender producto fuera de especificación en el mercado, permite aumentar los ingresos de la planta y reducir el inventario de producto fuera de especificación existente.

Alcance y límites del Proyecto:

Identificar las causas de generación de poliestireno fuera de especificación en el proceso.

Proponer una alternativa para reducir la venta de poliestireno fuera de especificación.

El proyecto se limita a disminuir el poliestireno fuera de especificación de propósito general y se propone desarrollar otra fase para evaluar alternativas de reducción para el poliestireno de alto impacto.

Cronograma:

En la Figura 2 se muestran los tiempos programados para el desarrollo del proyecto de disolución de poliestireno fuera de especificación en el proceso.

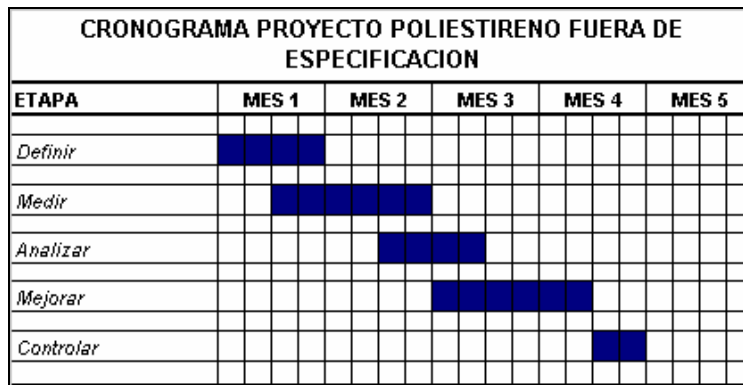


Figura 2. Cronograma del proyecto de disolución de poliestireno

Entregables:

Propuesta para reducción de poliestireno fuera de especificación generado en el proceso.

3.1.3. Mapa de Proceso. Con el fin de identificar las causas de generación de producto fuera de especificación, se realizó una revisión detallada de las diferentes etapas del proceso de producción de poliestireno de propósito general, las cuales se detallan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Mapa del Proceso de Producción de Poliestireno de Propósito General

Item	Entradas	Medición - entradas	Flujo de Proceso	Medición - salida
1	Cantidad de estireno	Pureza estireno Flujo de estireno	Alimentación de Estireno al proceso	Flujo de estireno
2	Razón de alimentación al filtro	lb/hr de estireno	Filtrado	% Inhibidor en estireno Caída de presión en filtro
3	Aditivos	Flujo de aditivos	Alimentación de aditivos	Composición corriente de entrada al reactor
4	Razón de Alimentación de estireno	Volumen de estireno	Reacción	% sólidos
5	Flujo de alimentación Perfil de proceso	Flujo de salida del reactor	Alimentación de polímero al primer Devolatilizador	Presión, Temperatura (chaqueta y calentador de polímero)
6	Flujo de alimentación Perfil de proceso	Flujo de salida primer devolatilizador	Segunda devolatilización	Presión, Temperatura (chaqueta y calentador de polímero), % sólidos
7	Polímero Rata de alimentación	rpm de bombas % sólidos	Flujo del polímero hacia el dado extrusor	Temperatura del dado Granulación (peso y dimensiones)
8	Procedimientos analíticos Espec.producto terminado	Propiedades finales del polímero	Análisis de propiedades del poliestireno en el Laboratorio	Resultados de calidad de producto terminado
9	Clasificación del producto	Flujo de Pellets	Almacenamiento en Silos de Producto dentro y fuera de espec.de calidad	Nivel en silos

3.1.4. Diagrama de Flujo de la Producción de poliestireno de propósito general. A partir del análisis del proceso se obtuvo el diagrama de flujo para la producción de poliestireno de propósito general, como se muestra en la Figura 3.

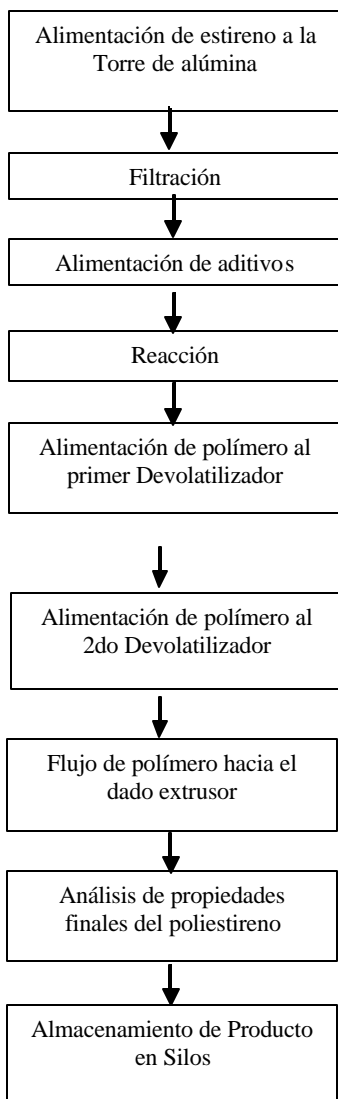


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de producción de poliestireno de propósito general.

3.2. MEDICION DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE PRODUCCION DE POLIESTIRENO DE PROPOSITO GENERAL

La fase medir, implicó un análisis de las variables que afectan el proceso de producción de poliestireno de propósito general, sus relaciones y el grado de relevancia en el proceso.

3.2.1. Variables de Entrada

Cuadro 2. Variables de entrada al proceso de producción de poliestireno de propósito general

Variable	Relevancia	Sistema de Medición
VARIABLES EN EL ALMACENAMIENTO		
Concentración de polímero	Controlar la polimerización en el tanque de almacenamiento	Cromatógrafo de gas, con detector de ionización de llama
Impurezas en el monómero	Afectan la velocidad de polimerización y el peso molecular	
VARIABLES DEL REACTOR		
Razón de Alimentación total (Lb/h)	Define volumen de producción y cantidad de aditivos al proceso.	Medidor de flujo
Concentración de Iniciador (ppm)	Control del peso molecular, disminución polidispersidad, controla niveles de estireno residual.	Análisis de laboratorio - Medidor de flujo
Concentración de Etibenceno (ppm)	Reduce viscosidad de la reacción, disipa calor de rx.	Medidor de flujo
	Transferente de cadena - Cambia coef. actividad - Baja %sólidos	Análisis de laboratorio
Flujo de aceite mineral (lb/hr)	Incrementa la flexibilidad, mejora el inyección y el moldeo.	Medidor de flujo
Concentración de Antioxidante (ppm)	Retarda la oxidación del polímero con aire.	Balanza
Flujo de Aditivos (lb/hr)	Desmoldante, agente de lubricación interna	Medidor de flujo
VARIABLES DEL DEVOLATILIZADOR		
Razón de alimentación (lb/h)	Capacidad del sistema	Cromatógrafo de gas, con detector de ionización de llama

3.2.2. Variables de Proceso

Cuadro 3. Variables de proceso en la producción de poliestireno de propósito general

Variable	Relevancia	Sistema de Medición
VARIABLES EN EL REACTOR		
Torque de Agitación	Distribución tamaño de partícula de caucho	Medición rpm
% sólidos	Grado de polimerización	Pérdida de peso a determinada T y P.
Temperatura	Viscosidad, velocidad de reacción, peso molecular	Termómetros en zonas de reacción
VARIABLES DEL DEVOLATILIZADOR		
Temperatura del fondo	Determina % de residuales	Termómetros
Presión de Vacío	Determina % de residuales	Manómetro
% Sólidos	Determina pureza del polímero	Pérdida de peso a determinada T y P.

3.2.3. Variables de Salida

Cuadro 4. Variables de salida del proceso de producción de poliestireno de propósito general

Variable	Relevancia	Sistema de Medición
Propiedades Finales del Producto		
Peso Molecular	Afecta el MFR, viscosidad de la solución, el esfuerzo tensil y de flexión, tamaño de partícula	cromatografía de líquidos
Vicat/°F	Determina el rango de temperatura para usos del material	Termómetro / sensor de desplazamiento electrónico [ASTM 1525 – 96]
Tensile Rupture/Psi	Determina límites de esfuerzo para aplicaciones finales	[ASTM D 638-96]
% Elongación	Define grado de deformación permisible para aplicaciones finales	[ASTM D 638-96]
Estireno Residual (ppm)	Restricciones en aplicaciones de empaques para alimentos	Cromatógrafo de gas / detector ionización de llama
Oligómeros (ppm)	Pureza del producto final	Cromatógrafo de gas / detector ionización de llama
Izod/FT-Lb/In	Resistencia al impacto	[ASTM D 256-93A]
MFR	Determina grado de degradación del plástico por moldeo	Plastómetro [ASTM D 1238 – 95]
Color	Controla coloración amarilla en el polímero	Espectrocolorímetro

3.3. ANALISIS DE LAS CAUSAS DE GENERACION DE POLIESTIRENO FUERA DE ESPECIFICACION

Las causas de generación de poliestireno fuera de especificación en el proceso de producción de poliestireno fueron analizadas mediante el método de análisis causa-raíz.

3.3.1. Análisis Causa-Raíz.

Las causas de generación de poliestireno fuera de especificación e corresponden principalmente a:

- La transición de productos con diferentes propiedades dentro de un proceso continuo, genera productos intermedios fuera de especificación.
- Falta de progreso en el control de calidad del polímero, debido principalmente a que las reacciones de polimerización son procesos altamente no lineales, donde las diferentes variables pueden resultar afectadas por cambios en una condición de una etapa anterior.
- Las propiedades moleculares como el peso molecular promedio, composición del co-polímero, entre otras, a menudo evolucionan en direcciones opuestas a las variables de control manipuladas temperatura, concentración de iniciador, etc.
- Falta de medidas "on-line" de propiedades moleculares retrasan la caracterización de la calidad del polímero.
- Fallas durante la operación que causan desviación de las propiedades finales del producto. La disminución de producto fuera de especificación por ajuste de condiciones de operación, requiere estudios detallados del proceso que incluyan modelos matemáticos, aproximaciones estadísticas y control avanzado del proceso, con base en información estrictamente confidencial de las tecnologías aplicadas. Estos estudios, no se incluyen dentro del alcance del proyecto Six-Sigma propuesto.

En la Figura 4, se presenta el resumen del análisis causa-raíz realizado para encontrar las causas de generación de poliestireno fuera de especificación.

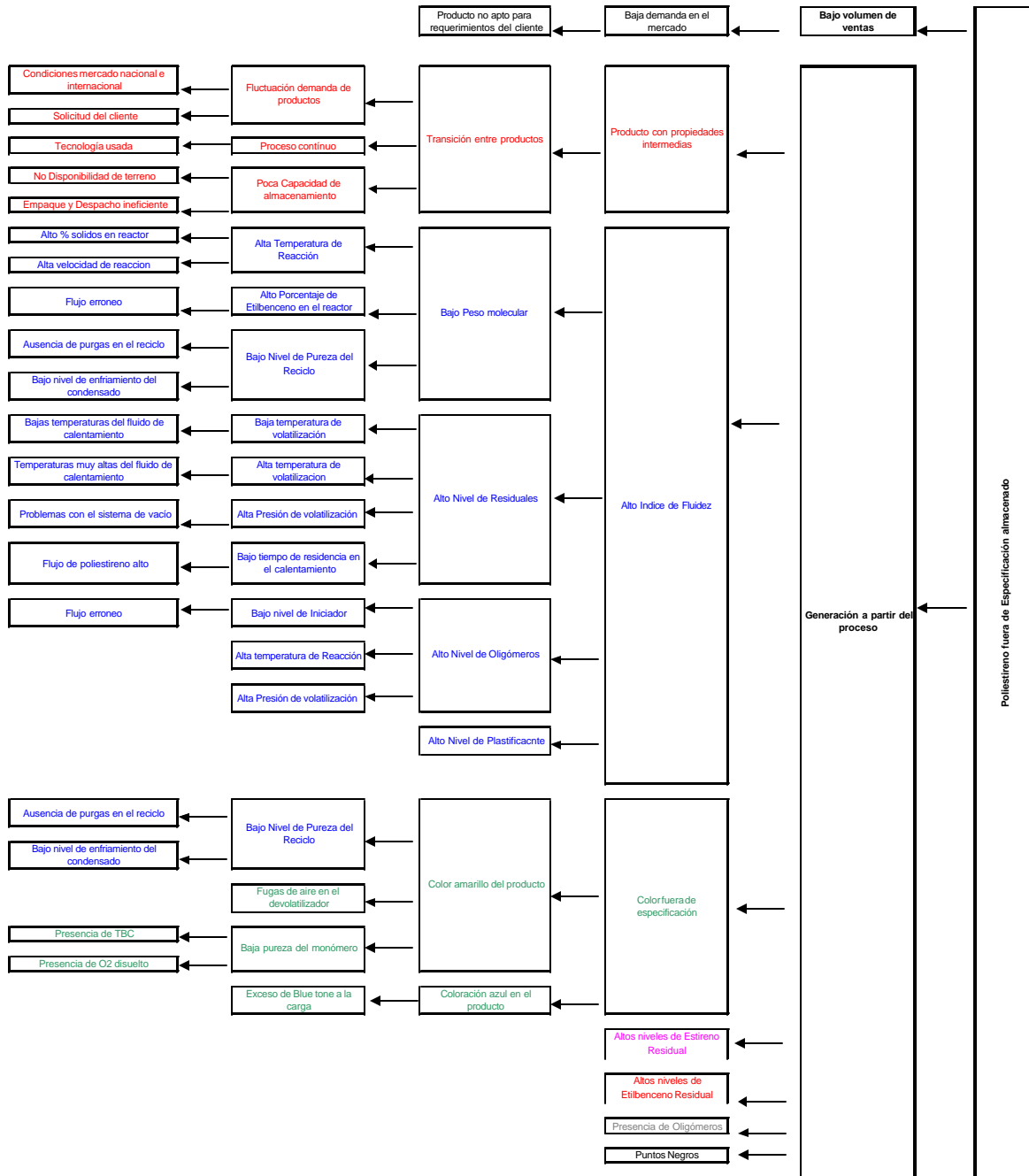


Figura 4. Diagrama del análisis causa-raíz para la generación de poliestireno fuera de especificación

Con base en el análisis causa-raíz, se ha identificado la necesidad de evaluar la alternativa de disolver poliestireno fuera de especificación en el proceso, ya que las causas de generación de este poliestireno no pueden ser eliminadas bajo las condiciones actuales del proceso.

La disolución de poliestireno fuera de especificación dentro del proceso se limita a la disolución de poliestireno de propósito general en el proceso de producción de alto impacto, dada la facilidad de incorporar el poliestireno al proceso durante la etapa de molienda y disolverlo durante el tiempo de disolución de la mezcla caucho-estireno.

Para el poliestireno de alto impacto fuera de especificación generado durante el proceso puede evaluarse la posibilidad de disolverlo en el proceso existente, pero se requiere una evaluación rigurosa de las condiciones de inversión de fase y demás factores que puedan afectar las propiedades finales del producto.

Para encontrar la alternativa que permitiera disolver poliestireno fuera de especificación, fue necesario realizar la definición del mapa del proceso, el diagrama de flujo, el estudio de las variables de entrada, de proceso y de salida que gobiernan la producción de poliestireno de alto impacto. Este análisis se presenta en el Anexo E.

El estudio de las variables del proceso de producción de poliestireno de alto impacto, permitió establecer restricciones en la implementación de la disolución de poliestireno fuera de especificación:

Las propiedades finales del producto, corresponden a las variables de salida del proceso. Estas propiedades pueden oscilar en intervalos establecidos en la especificación del producto. Los valores de la propiedad final dependen de las condiciones de proceso establecidas por la tecnología utilizada. La disolución de poliestireno fuera de especificación no debe afectar las propiedades finales del producto.

El poliestireno fuera de especificación debe introducirse al proceso durante la etapa de molienda y disolución para lograr una mezcla homogénea antes de su alimentación al reactor; de manera que no se requieran modificaciones a la tecnología durante el desarrollo del proyecto. Ajustes a las variables de proceso deberán considerarse dentro del alcance de nuevos proyectos Six-Sigma.

Las condiciones de diseño de los equipos (bombas de alimentación al reactor, filtros, precalentador) restringen la viscosidad de la mezcla estireno-caucho-poliestireno fuera de especificación a alimentar al reactor. Por tanto, se evaluó la viscosidad de diferentes mezclas estireno-caucho-poliestireno fuera de especificación para establecer el máximo porcentaje de poliestireno a disolver para la capacidad instalada, considerando como límite máximo de viscosidad los 10000 cp.

3.3.2. Porcentaje de Poliestireno a Disolver. Se llevaron a cabo mediciones de viscosidad en el laboratorio para encontrar el máximo porcentaje de poliestireno a disolver. Las pruebas se realizaron bajo las siguientes condiciones:

Se calculó la temperatura del estireno en los tanques de disolución a condiciones de temperatura mínima del ambiente, para medir la viscosidad de las muestras preparadas en el laboratorio a esa temperatura.

$$T_B = T_{AA} + 6a - 1 \quad (3.1)$$

Donde

TB : Temperatura del líquido en °C

TAA : Temperatura ambiente mínima, °C = 23°C

α : Absortancia solar del tanque pintado, adimensional = 0.22

De la fórmula se obtiene que la temperatura mínima del líquido que corresponderá al valor más alto de viscosidad para cada mezcla es de 23°C.

En la Tabla 2, se muestran los valores de viscosidad medidos para mezclas estireno-caucho del tanque de disolución y de muestras preparadas en el laboratorio, sin encontrar diferencias significativas.

Tabla 2. Viscosidad de mezclas estireno-caucho a 23°C

No Exp	% Caucho	% Estireno monómero	Tiempo disolución [h]	Detalle	viscosidad promedio [cp]
1	12	88	5	TEORICO	9940
2	12	88	5	Tanque	9600
3	12	88	5	Tanque	9605
4	12	88	5	Tanque	9600
5	12	88	5	Laboratorio	9770
6	12	88	5	Laboratorio	9730
7	12	88	5	Laboratorio	9780

Contenidos de caucho entre 8 y 12% en peso, se alimentan al proceso para obtener diferentes grados de poliestireno según las aplicaciones finales del producto en el mercado. El comportamiento de la viscosidad se evaluó en muestras con porcentajes de caucho de 8, 10 y 12% en peso, tal como se presenta en la Tabla 3 y la Figura 5.

Tabla 3. Viscosidad de mezclas Estireno - Caucho a 23°C

No Exp	% Caucho	% Poliestireno fuera de espec.	% Estireno monómero	Tiempo disolución [h]	viscosidad [cp]	viscosidad promedio [cp]
12% Caucho						
1	12	0	88	5	9980	
2	12	0	88	5	9620	
3	12	0	88	5.5	9620	
4	12	0	88	5	9675	
5	12	0	88	5	9700	
						9719
10% Caucho						
1	10	0	90	5	4320	
2	10	0	90	5	4100	
3	10	0	90	5	4200	
						4207
8% Caucho						
1	8	0	92	5	1450	
2	8	0	92	5	1440	
3	8	0	92	5	1440	
						1443

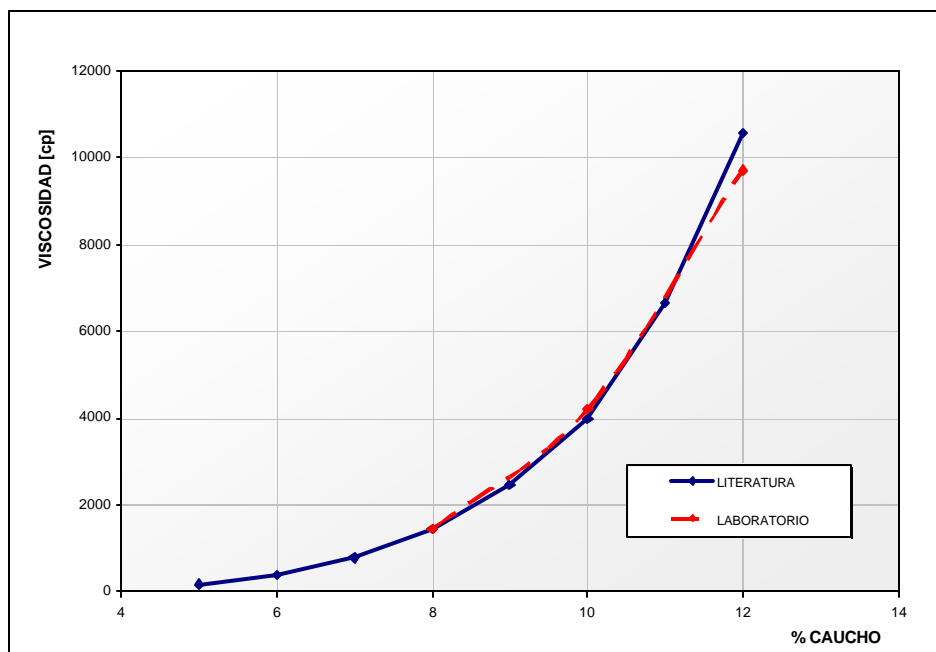


Figura 5. Viscosidad de mezclas estireno-caucho a 23°C

La Tabla 4 y la Figura 6 presentan los valores de viscosidad medidos para mezclas estireno-caucho-poliestireno fuera de especificación. Estas mediciones de viscosidad permitieron encontrar el valor máximo de poliestireno fuera de especificación a disolver.

Tabla 4. Viscosidad de mezclas Estireno - Caucho -Poliestireno Fuera de Espec. a 23°C

No Exp	% Caucho	% Poliestireno fuera de espec.	% Estireno monómero	Tiempo disolución [h]	viscosidad [cp]	viscosidad promedio [cp]
10% Caucho						
1	10	5	85	8	7615	
2	10	5	85	8	7460	
3	10	5	85	8	8460	
4	10	5	85	8	6170	
10% Caucho						
1	10	7	83	8	9450	
2	10	7	83	8	9450	
8% Caucho						
1	8	5	87	8	2150	
2	8	5	87	8	2185	
3	8	5	87	8	2220	
8% Caucho						
1	8	7	85	8	2200	
2	8	7	85	8	2300	
3	8	7	85	8	2700	

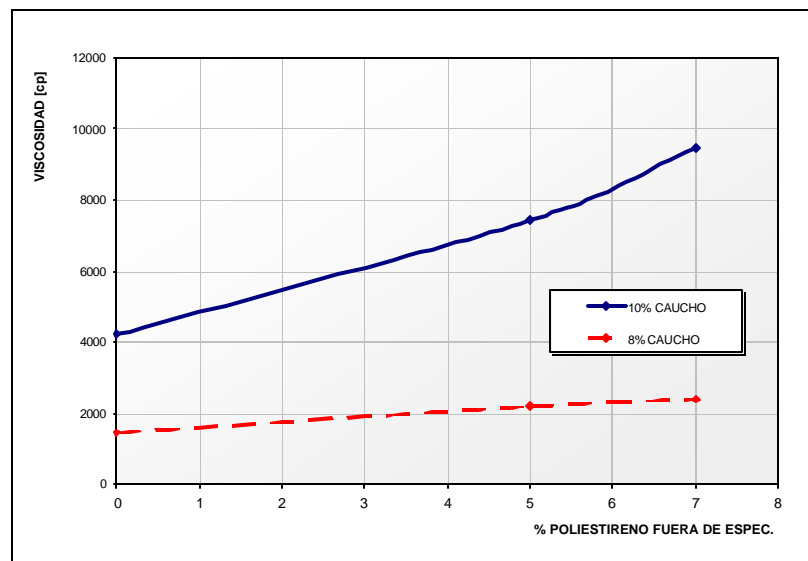


Figura 6. Viscosidad de mezclas Estireno-Caucho-Poliestireno Fuera de Espec. a 23C

A partir de las pruebas de viscosidad realizadas en el laboratorio se llegó a las siguientes conclusiones:

- La viscosidad de las mezclas estireno-caucho aumenta al adicionar pequeños porcentajes de poliestireno fuera de especificación.

- El elevado valor de la viscosidad para productos con porcentajes de caucho del 12% o mayores, no permite la disolución de poliestireno fuera de especificación.

- Para productos con porcentajes de caucho cercanos al 10%, es posible disolver hasta 7% de poliestireno fuera de especificación a la capacidad instalada.

- Para productos de bajo porcentaje de caucho, la disolución de poliestireno fuera de especificación puede incrementarse, sin embargo, se mantendrá como límite el 7%, ya que estudios realizados por la empresa a este porcentaje, no se reportaron alteraciones en las propiedades finales del producto.

3.3.3. Selección de Productos a Disolver. Dentro del proceso de producción de poliestireno, en la planta de estudio se tienen productos con diferentes aplicaciones. En el Anexo F se muestran las distintas aplicaciones para cada uno de los productos y las posibilidades de disolución de dichos productos de poliestireno cristal en productos de poliestireno de alto impacto.

3.4. MEJORAMIENTO DEL PROCESO. INGENIERIA DEL SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMATICO.

Con base en los criterios establecidos a partir de las fases de definición, medición y análisis, se desarrollaron los cálculos básicos para un sistema de transporte neumático que permita la alimentación de poliestireno fuera de especificación a los tanques de dsolución del proceso de producción de poliestireno de alto impacto.

La selección del sistema de transporte neumático se basó en su facilidad de instalación, mínimo espacio requerido por los equipos, bajos costos de equipos, comparado con otros sistemas de transporte y los bajos consumos de energía en el sistema.

3.4.1. Factores de Diseño

3.4.1.1. Capacidad requerida. El máximo flujo de poliestireno fuera de especificación a disolver se calculó en 54 lb/min, para una carga al 7% de este poliestireno, en un volumen de 51 m³ de estireno, y en un tiempo límite de alimentación de poliestireno de 4 horas, que corresponde al

tiempo requerido para la molienda de una carga de caucho cuando se produce a la máxima capacidad instalada.

3.4.1.2. Longitud de desplazamiento y elevación de los sólidos. En el transporte neumático de sólidos debe considerarse tanto la distancia horizontal como la distancia vertical a recorrer para estimar las pérdidas de energía en el sistema. Se ha seleccionado una distancia horizontal de transporte de 164 ft y una distancia vertical de 25 ft, requeridos para entregar los sólidos a la entrada del molino de caucho.

3.4.2. Características del material. El poliestireno, es un material que se maneja en gránulos, de flujo libre, no abrasivo. Los transportadores neumáticos manejan densidades de masa de 1 a más de 200 lb/ft³. Se calculó la densidad de masa a partir de mediciones promedio del peso de una cantidad de poliestireno fuera de especificación ocupado por determinado volumen. El valor obtenido fue de 63lb/ft³.

3.4.2.1. Caracterización del poliestireno. La densidad del sólido se obtuvo a partir de la caracterización final del producto comercial, obteniéndose un valor de 858 kg/m³.

3.4.3. Diseño del Sistema de Transporte Neumático. El sistema de transporte neumático para la alimentación de pellets de poliestireno fuera de especificación a la etapa de molienda de caucho dentro del proceso de producción de poliestireno de alto impacto consta principalmente como se presenta en la Figura 7, de un filtro para el aire alimentado al proceso, un soplador que suministra al aire una velocidad tal que permita el transporte en fase diluida de los sólidos en la corriente de aire, una válvula de alimentación de los pellets desde la tolva de almacenamiento, una válvula “diverter” para direccionar la corriente de sólidos, la tubería de transporte y el ciclón que permite la separación de los sólidos de la corriente de aire, ya que el molino requiere bajas concentraciones de oxígeno con el fin de evitar mezclas explosivas aire-estireno.

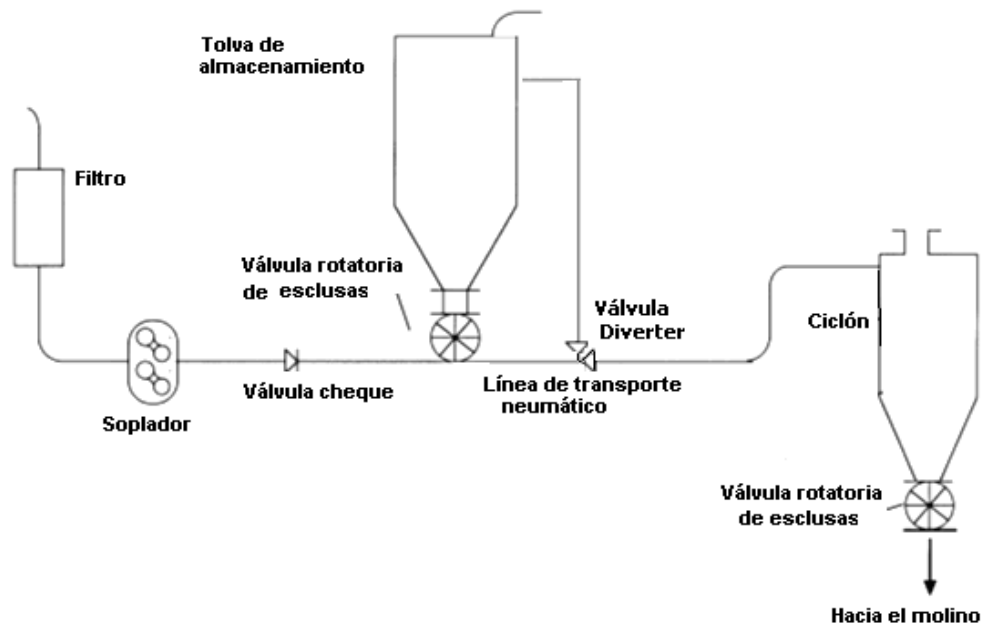


Figura 7. Diagrama del sistema de transporte neumático de poliestireno

3.4.3.1. Cálculo del soplador rotatorio. El cálculo del soplador se realizó por el método de Fischer, que permite calcular las energías requeridas para el transporte de los sólidos y las pérdidas por la fricción del gas.

Pérdidas de presión por fricción del sólido

Los requerimientos energéticos del sistema E_T , son:

$$E_T = E_a + E_p + E_h + E_c \quad (3.2)$$

La energía de aceleración, E_a , Es la energía necesaria para vencer la inercia de los sólidos y darles movimiento desde la válvula estrella hacia la línea de transporte.

$$E_a = \frac{m * v^2}{2 * g_c} \quad (3.3.)$$

Donde

E_a : Energía de aceleración, ft^*lb_f / \min

m : Flujo de poliestireno, lb / \min

v : Velocidad de transporte neumático, $\frac{ft}{s}$

$$g_c : 32.174 \frac{lb \text{ ft} / s^2}{lb_f}$$

La Figura 8, muestra la velocidad de transporte neumático, que corresponde a la velocidad de aire requerida para transportar sólidos de determinada densidad de masa.

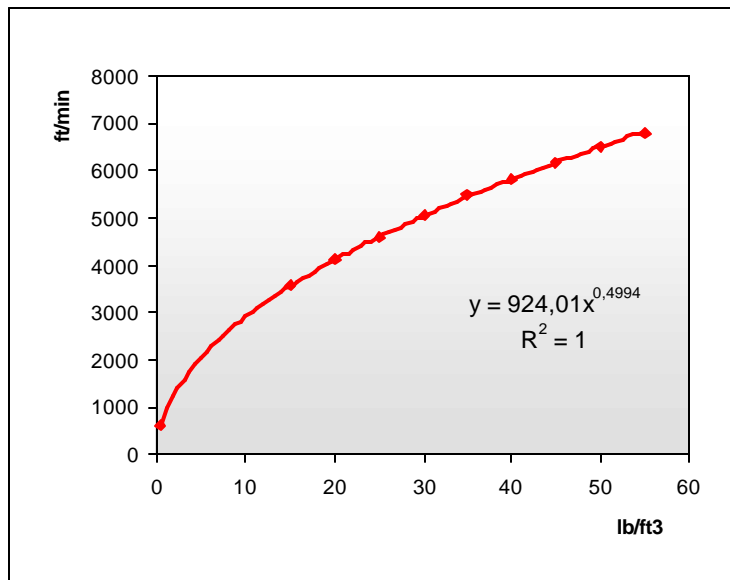


Figura 8. Velocidad de aire vs densidad del sólido para transporte neumático

Energía potencial, Ep , requerida para elevar los sólidos en tramos de tubería vertical.

$$Ep = m * d * \frac{g}{g_c} \quad (3.4)$$

Donde

Ep : Energía potencial, $\frac{ft * lb_f}{min}$

d : Distancia vertical, ft

g : Aceleración de la gravedad, $32,2 \frac{ft}{s^2}$

Energía para compensar las pérdidas por fricción del material con la pared del tubo.

$$Eh = m * L * F \quad (3.5)$$

Donde

Eh : Energía por fricción de los sólidos con el tubo, $\frac{ft * lb_f}{min}$

L : Longitud horizontal, ft

F : Coeficiente de Fricción, adimensional

$$F = \tan f$$

f : Angulo de deslizamiento.

Pérdidas por cambio de dirección del fluido. Se recomienda usar codos de gran radio de curvatura para minimizar las pérdidas.

$$Ec = \frac{m * v^2}{g_c * R} * d * F \quad (3.6)$$

Donde

Ec : Energía por cambios de dirección del fluido, $\frac{ft * lb_f}{min}$

R : Radio de curvatura, ft

Finalmente, las pérdidas en el sólido, se obtienen a partir del cálculo de las energías requeridas para mover el material entre dos puntos de la tubería. En la Tabla 5, se presentan los resultados obtenidos para el diseño propuesto.

Estas pérdidas se expresan en in de H₂O mediante la ecuación:

$$\Delta P_s = \frac{E_T}{5.2 * Q} \quad (3.7)$$

Donde

Q : Flujo de aire, $\frac{ft^3}{min}$

ΔP_s : Pérdidas del sólido, inH_2O

E_T : Pérdida de presión total, $\frac{ft * lb_f}{min}$

Tabla 5. Pérdidas de presión y energías requeridas para vencer la fricción del sólido.

Pérdidas en el sólido, Ps	18	in H2O
Flujo de aire, Q	1088	ft ³ /min
Diámetro de la tubería, D	6	in
<u>Energía Total requerida, Et</u>	101371	ft*lb/min
<u>Energía de aceleración, Ea</u>	7169	ft*lb/min
Flujo de sólidos, m	54,10	lb/min
Velocidad de transporte neumático, v	92,38	ft/s
Valor de la gravedad, g	32,20	ft/s ²
lo		
<u>Energía Potencial, Ep</u>	1082	ft*lb/min
d = distancia vertical	20	ft
<u>Energía horizontal, Eh</u>	7098	ft*lb/min
Distancia horizontal a recorrer, L	164	ft
Coefficiente de fricción, f	0,8	
ángulo de deslizamiento, f	38	
<u>Energía en los codos, Ec</u>	86022	ft*lb/min
Radio de curvatura, R	4	ft
Número de codos	5	

Pérdidas por fricción del Aire

Energía por pérdidas por fricción del aire en el sistema. Estas pérdidas incluyen:

$$\Delta P_g = \Delta P_{tub} + \Delta P_{cic} + \Delta P_{div} + \Delta P_{sop} \quad (3.8)$$

Pérdidas en el ciclón, in H₂O

$$\Delta P_{cic} = 2 * v_p \quad (3.9)$$

Donde

ΔP_{cic} : Pérdidas en el ciclón, in H₂O

v_p : Velocidad dinámica, in H₂O

$$v_p = \left(\frac{v}{4000} \right)^2 \quad (3.10)$$

Pérdidas en la válvula diverter ΔP_{div} , in H₂O

$$\Delta P_{div} = 0.2 * v_p \quad (3.11)$$

Pérdidas a la entrada del soplador ΔP_{sop} , in H₂O

$$\Delta P_{sop} = 1.24 * v_p \quad (3.12)$$

Pérdidas en la tubería ΔP_{tub} , in H₂O

$$\Delta P_{tub} = 0.000336 * \frac{f * W^2}{d^5 * r_a} * \frac{L}{100} \quad (3.13)$$

Donde

r_a : Densidad del aire, $\frac{lb}{ft^3}$

W : Flujo de aire, lb/hr

f : Factor de fricción, adimensional

El factor de fricción se calcula a partir del número de Reynolds para flujos compresibles:

$$Re = 6.31 * \frac{W}{d * \mu} \quad (3.14)$$

Donde

μ Viscosidad del aire, cp.

Tabla 6. Pérdidas de presión en el gas

Pérdidas en el gas, P_g	19	in H2O
Pérdidas en la tubería, P _{tub}	12,47	in H2O
Longitud, Lequiv	215	ft
Longitud equivalente codo de 90°	6,25	ft
Número de Reynolds, Re	259422	
Factor de fricción, F	0,0167	
Flujo de aire, Q	65297	ft ³ /h
Densidad, den	0,068	lb/ft ³
Díámetro, d	6	in
Viscosidad, u	0,018	cp
flujo másico aire, W	4440	lb/h
Velocidad de transporte neumático, v	5543	[ft/min]
Velocity pressure, vp	1,920	in H2O
Pérdidas en el soplador, P _{sop}	2,38	in H2O
Pérdidas en la Válvula diverter, P _{div}	0,38	in H2O
Pérdidas en el ciclón, P _{cic}	3,84	in H2O

Potencia del Soplador

Las pérdidas totales en el sistema corresponden a:

$$P_T = \Delta P_s + \Delta P_g \quad (3.15)$$

Y la potencia requerida para el soplador se calcula a partir de la ecuación:

$$P = \frac{Q * P_T}{6350 * h_{sop}} \quad (3.16)$$

Donde

P_T = Pérdidas totales, in H₂O

h_{sop} = Eficiencia del soplador (0.5 – 0.7)

P = Potencia del soplador, hp

Tabla 7. Cálculo del soplador requerido para transporte neumático

Potencia Soplador	16	hp
Eficiencia (0.5 - 0.7)	0,5	
PérdidasTotales, Pt	37	in H2O
Pérdidas en el gas, Pg	19	in H2O
Pérdidas en el sólido, Ps	18	in H2O

3.4.3.2. El alimentador de sólidos. El alimentador de los sólidos es un equipo fundamental en el diseño del sistema de transporte neumático. El alimentador se asemeja a una bomba rotatoria de desplazamiento positivo, tal como la válvula estrella. Consiste de un rotor que gira a velocidad constante, donde los sólidos provenientes de la tolva fluyen a los bolsillos del alimentador para luego introducirse en la línea de transporte. Cada sector es un ángulo, lo cual hace que la descarga sea continua.

La rata de entrega es controlada por la velocidad del rotor y depende de la densidad de masa. Otros aspectos que definen el alimentador son las dimensiones características, localización y forma de la entrada y salida de la válvula, la caída de presión a través de la válvula, la velocidad de fuga de aire, entre otros.

Dimensionamiento

Se ha seleccionado una válvula de estrella de 8 hojas o aspas, para control de las fugas de aire. El tamaño de la válvula se determina por la capacidad volumétrica:

$$Q_{VR} = \frac{m_1}{60 * r_{masa}} \quad (3.17)$$

Donde

Q_{VR} = Capacidad volumétrica de la válvula rotatoria, ft³/min

m_1 = Flujo másico de poliestireno fuera de especificación, lb/hr

r_{masa} = densidad de masa, lb/ft³

A partir de la ecuación, se obtuvo una capacidad de 1 ft³/min.

La velocidad de descarga corresponde a la velocidad de giro del rotor, la cual fue obtenida a partir de las Tablas reportadas por Prater Industries, INC. correspondiendo a un valor de 10 rpm.

Tabla 8. Velocidad de giro para válvula estrella

rpm capacidad modelo	5		10		15		20		25		30	
	Full	80%	Full	80%	Full	80%	Full	80%	Full	80%	Full	80%
PAV-6	0,75	0,60	1,50	1,20	2,25	1,80	3,00	2,40	3,75	3,00	4,50	3,60
PAV-8	1,50	1,20	3,00	2,40	4,50	3,60	6,00	4,80	7,50	6,00	9,00	7,20
PAV-10	2,65	2,10	5,30	4,20	7,95	6,30	10,60	8,40	13,25	10,50	15,90	12,60
PAV-12	4,75	3,80	9,50	7,60	14,25	11,40	19,00	15,20	23,75	19,00	28,50	22,80
PAV-14	7,40	5,90	14,80	11,80	22,20	13,30	29,60	23,60	37,00	29,50	44,40	35,40
PAV-16	11,50	9,20	23,11	18,40	34,50	27,60	46,11	36,80	57,50	46,00	69,00	52,20
PAV-1420	6,50	5,20	13,11	10,40	19,50	15,60	26,00	20,80	32,50	26,00	39,00	31,20

Para la velocidad de descarga establecida, el consumo de potencia es de 0.5 HP, calculado a partir de las Tablas de BUSH & WILTON, Inc.

Tabla 9. Consumo de potencia según velocidad de giro de válvula estrella

Diámetro de la entrada	HP	Capacidad por revolución	Capacidad en ft ³ /h a las rpm indicadas	
			6 rpm	12,5 rpm
4	1/4	0,04	13	20
6	1/2	0,1	36	75
8	1/2	0,24	85	177
10	1/2-3/4	0,46	167	349
12	1 1/2-2	0,79	286	596

Fuente: <http://www.bushandwilton.com>

3.4.3.3. El ciclón. Es un dispositivo donde actúa radialmente una fuerza centrífuga, la cual es 5 veces mayor que la gravedad. El camino del aire sigue un vórtice o espiral adyacente a la pared hasta alcanzar el fondo del cono.

Se ha seleccionado un ciclón convencional para separar el aire en la descarga del poliestireno al molino, ya el porcentaje de oxígeno en el molino debe ser inferior al 7% dada la atmósfera explosiva que puede presentarse al mezclar el caucho con el estireno alimentado al tanque.

Las ventajas de usar un separador ciclónico son los bajos costos de mantenimiento ya que no posee partes móviles y presenta bajos costos de capital de inversión.

El separador está compuesto básicamente por un cilindro vertical con fondo cónico, dotado de una entrada tangencial normalmente rectangular. El modelo de flujo seguido por el gas que entra al ciclón tangencialmente, es un espiral hacia abajo y por la zona exterior, para después ascender por la zona interior describiendo igualmente una hélice. La fuerza centrífuga y la inercia causan la caída de las partículas por el fondo del ciclón y del gas por la parte superior por un ducto de salida del gas. En la Figura 9, se presenta el modelo de flujo de las corrientes de entrada y salida del ciclón.

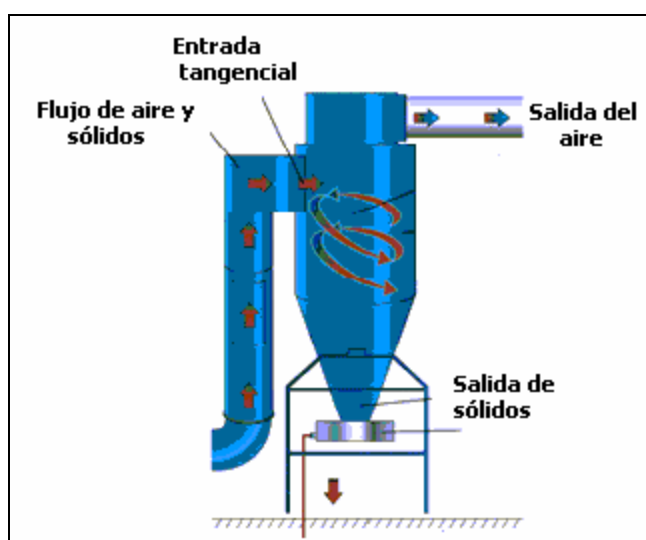


Figura 9. Esquema del ciclón convencional

Los parámetros clave en el diseño de un ciclón son la eficiencia y la caída de presión.

La caída de presión es la cantidad de energía requerida para realizar la separación del aire y el sólido. Estas pérdidas están asociadas a la fricción en el ducto de entrada, la contracción / expansión en la entrada, la fricción en las paredes, las pérdidas cinéticas en el ciclón, las pérdidas en la entrada del tubo de salida y las pérdidas de presión estática entre la entrada y la salida.

La eficiencia del ciclón se define como la capacidad de separación de las partículas de la corriente de aire. La eficiencia depende del tamaño de partícula y el diseño del ciclón.

El aumento del diámetro de la partícula, la densidad de la partícula, la velocidad del gas aumentan la eficiencia del ciclón. Mientras el aumento del radio de curvatura y la viscosidad del gas, disminuyen su eficiencia.

La velocidad de entrada es clave para la operación del ciclón. La velocidad de entrada debe ser baja para minimizar las pérdidas de presión por retroceso y a la vez alta para una separación efectiva.

Los costos del ciclón se incrementan con la eficiencia, debido a las mayores caídas de presión requeridas. Existen ciclones de alta eficiencia (98-99%), convencionales (70-80%), y de baja eficiencia (50%).

Restricciones dimensionales

En la Figura 10 se muestran las relaciones que definen las dimensiones del ciclón.

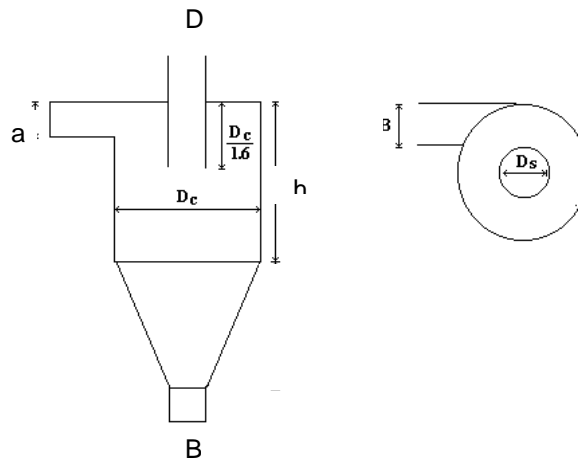


Figura 10. Relaciones dimensionales para el cálculo del ciclón.

$$a = F_1 * Dc$$

$$b = F_2 * Dc$$

$$De = F_3 * Dc$$

$$S = \frac{De}{16} = 0.65 * Dc$$

$$B = 0.375 * Dc$$

$$h = 2 * Dc$$

$$H = 4 * Dc$$

El diámetro del ciclón se calculó a partir del diámetro de corte y las demás dimensiones se calcularon con base en el diámetro de corte.

La ecuación que determina el diámetro del ciclón corresponde a:

$$D_c = \left[\left(\frac{1.085}{F_3^4} + \frac{0.32}{(F_1 * F_2)^2} \right) * \frac{r_a * Q^2}{\Delta P * g} \right]^{1/4} \quad (3.18)$$

Donde

F1, F3 : constantes = 0.5

F2 : Factor de ajuste

Q : caudal de aire, ft/s

ΔP : Caída de presión, lb_f/ft²

r_a : Densidad del aire, lbm/ft³

D_c : Diámetro del ciclón, ft

Kalen y Zenz demostraron que la máxima eficiencia de colección se alcanza para una relación entre la velocidad de entrada de aire y la velocidad de saltación menor a 1.35.

La ecuación que define la velocidad de saltación corresponde a:

$$v_s = 2.055 * w * \left[\frac{\left(\frac{b}{D_c} \right)^{0.4}}{\left(1 - \left(\frac{b}{D_c} \right) \right)} \right]^{1/3} * b^{0.067} * v_i^{2/3} \quad (3.19)$$

Donde

v_s : Es la velocidad de saltación, ft/s

v_i : Es la velocidad a la entrada del ciclón, ft/s

w : es la velocidad equivalente, ft/s

$$w = \left(\frac{4 * g * m * (r_s - r_a)}{3 * r_a^2} \right)^{1/3} \quad (3.20)$$

Para el diseño, se partió de un valor de F2 = 0.2 y se fue incrementando hasta satisfacer la relación deseada para maximizar la eficiencia del ciclón.

$$b = F_2 * D_c \quad (3.21)$$

A partir del valor encontrado para D_c , y con base en las relaciones mencionadas anteriormente, se establecieron todas las dimensiones del ciclón, tal como se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Cálculo de las dimensiones del ciclón.

<u>Diámetro del ciclón, D_c</u>	2,27	ft
F1	0,50	
F2	0,50	
F3	0,50	
Caudal de aire, Q	18,14	ft ³ /s
Caida de presión, dP	0,57	lb/ft ²
Viscosidad del aire, u	0,000012	lb/fts
Densidad del sólido, den	53,68	lb/ft ³
Densidad del aire, denair	0,07	lb/ft ³
Gravedad	32,20	fts ⁻²
Velocidad del aire a la entrada del ciclón, v_i	92	ft/s
Velocidad equivalente, w	1,86	
Velocidad de saltación, v_s	75,06	ft/s
b	1,14	ft
v_i/v_s	1,23	
<u>Dimensiones del ciclón</u>		
a	1,1	ft
b	1,1	ft
DE	1,1	ft
S	1,5	ft
H	9	ft
h	3,0	ft
B	0,9	ft

Para las dimensiones del ciclón, KOCH Y LICHT, establecieron algunas restricciones que aseguran las condiciones normales de operación del equipo. Véase Cuadro 5.

Cuadro 5. Criterios para la selección del diámetro de corte

	$v_i/v_s < 1.35$
Prevención de contraflujos	$a < s$
Prevenir contracción brusca	$b < 0.5 \cdot (D_c - D_e)$
Mantener vórtice interno del ciclón	$S + s \leq H$
Otras relaciones	$S < h$
	$h < H$
	$0.18 < B/DC < 0.40$
Altura del ciclón	$2d < H < 6d$
Caida de Presión	$< 10 \text{ in H}_2\text{O}$

Para el diseño calculado se cumplen todas las restricciones y por tanto, se mantienen las dimensiones calculadas.

3.4.3.4. Válvula "Diverter". La válvula "diverter" permite direccionar el flujo desde la línea de descarga de la válvula rotatoria hacia el ciclón que descarga al molino o hacia la tolva de almacenamiento en caso de presentarse una interrupción en la alimentación del caucho al molino. En la Figura 15 se presenta un esquema típico de la válvula "diverter" tipo "y", que corresponde a la válvulas mas comúnmente empleada para direccionar la corriente sólido-gas.

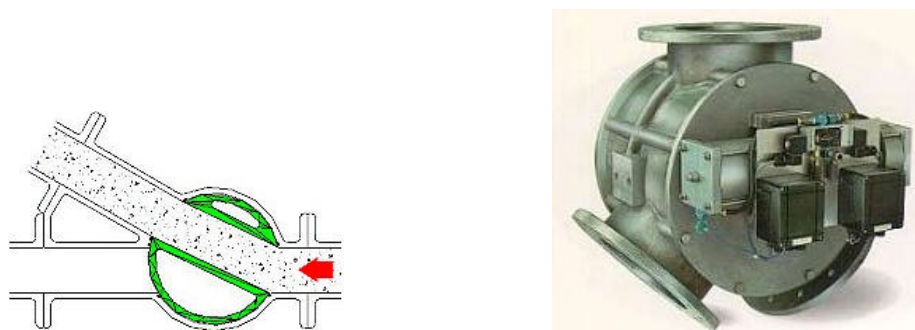


Figura 11. Válvula "diverter" tipo "Y"

La "Diverter" es controlada mediante la acción de una válvula solenoide que permite direccionar el flujo. Se usan además interruptores indicadores de posición.

3.4.3.5. Tolva de almacenamiento. El recipiente de almacenamiento del material peletizado se compone de un depósito y una tolva. El depósito es la sección superior rectangular o circular y la tolva es la sección entre el depósito y la válvula de alimentación, que tiene por lo menos un lado inclinado.

La descarga de material desde la tolva se rige por dos modelos básicos, el flujo en masa o pistón y el flujo en túnel.

El flujo en masa o pistón, se da cuando todo el material está en movimiento en cualquier punto de la tolva. Los límites para el flujo en masa dependen del ángulo de inclinación de las paredes de la tolva con respecto a la horizontal, el ángulo de fricción con las paredes y el ángulo efectivo de fricción interna.

El flujo en túnel ocurre cuando los sólidos a granel se agrupan de tal forma que crean un canal vertical por donde fluirán primero los sólidos de la parte superior del depósito. Este tipo de flujo

ocurre cuando las paredes son rugosas y el ángulo de la tolva con respecto a la horizontal es pequeño.

El principal problema operacional de las tolvas es la formación de arcos cohesivos inestables que forman los sólidos sobre la abertura en el fondo del silo o la adherencia contra las paredes, causando la interrupción del flujo. La formación de arcos incrementa con la densidad, la compresibilidad, el tiempo de permanencia, la humedad, el diseño de la tolva y la naturaleza de la superficie.

El diseño de la tolva se centra por tanto en el cálculo de la dimensión del agujero de salida, que depende de las propiedades del material determinantes del ángulo de inclinación de la tolva.

Para que los sólidos se deslicen, debe vencerse la fricción interna del material. Para efecto de los cálculos se tomó el ángulo de fricción del material como el ángulo de reposo del mismo por tratarse de material granular no cohesivo.

La finalidad del diseño consiste en determinar la capacidad de almacenamiento y lograr flujo por efecto de la gravedad.

Cálculo de la sección vertical

Para el cálculo de la tolva se consideró el volumen de almacenamiento para una carga completa de poliestireno fuera de especificación a ser alimentado al tanque de disolución en la proporción anteriormente establecida (7%), tal como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Dimensiones sección vertical Tolva de almacenamiento

Masa de 1 carga	13000	lb
Densidad del poliestireno	54	lb/ft ³
Volumen Sección vertical, Vs	364	ft ³
Diámetro de Sección vertical, ds	6,8	ft
Altura Sección Vertical, hs	10	ft

A partir del volumen calculado, se encontró el diámetro de la sección vertical considerando un depósito de sección cónica. La altura de la sección vertical se calculo a partir de la relación:

$$H = 1.5 * ds \quad (3.22)$$

Donde

H : es la altura de la sección vertical, ft

ds: es el diámetro de la sección vertical, ft

Cálculo de la tolva.

La altura total del cono y la altura de corte del cono para localizar la compuerta de salida se calcularon con base en el diámetro del depósito vertical, el ángulo de reposo del material. Se asumió el ángulo de inclinación de la tolva como 5% mayor que el ángulo de reposo del material.

La altura total del cono se calcula mediante la ecuación:

$$Y = \frac{ds}{2} * TAN(B) \quad (3.23)$$

$$B = S * 1.05 \quad (3.24)$$

Donde

Y : es la altura total del cono, ft

S : es el ángulo de reposo del material

B : es el ángulo de inclinación de la tolva

La altura de corte del cono para localizar la compuerta de descarga, se calculó mediante la ecuación:

$$Y1 = \frac{D_3}{2} * TAN(B) \quad (3.25)$$

Donde

D_3 : El diámetro de la descarga de la tolva, ft

En la Tabla 12 se resumen las dimensiones de la tolva, calculadas según las anteriores ecuaciones.

Tabla 12. Dimensiones tolva de almacenamiento

<i>Altura total del cono, Y</i>	2,7	ft
Angulo de inclinación de la tolva, b	38,85	
Angulode reposo, f1	37	
<i>Altura localización compuerta de salida, y1</i>	0,17	ft
Diámetro orificio de salida, D3	0,41	ft
Diámetro de la partícula, D1	0,014	ft
Relación de los diámetros	30	

3.4.4. Beneficio esperado por la implementación del sistema

La producción anual de producto *prime* (Poliestireno HIPS) de la planta es 37,000 ton. La producción de producto fuera de especificaciones (*WideSpec*) es de aproximadamente 15% de la carga total, lo cual resulta en 6,705 ton/año.

Conforme a la evaluación técnica del proceso es posible disolver hasta un 7% de poliestireno fuera de especificaciones en la corriente de entrada del proceso. Se desea disolver producto *WideSpec* en una corriente de 25,000 ton/año de materia prima (estireno).

Una corriente de entrada de 25,000 ton/año produce 21,250 ton/año de producto *prime* y 3,750 ton/año producto "*WideSpec*". De este último se pueden reciclar 1,750 ton/año (equivalente a 7% de la carga).

El proceso de reciclaje da como resultado una producción de 22,737.5 ton/año de producto *prime* y 4,012.5 ton/año de producto "*WideSpec*" de los cuales quedarían disponibles para la venta 2,262.5 ton/año.

El beneficio económico por la implementación del proceso de reciclaje es de US\$ 602,437.50. La siguiente Tabla muestra la comparación del valor de los productos antes y después de la montaje del reciclo de poliestireno fuera de especificaciones.

Tabla 13. Valor de productos de poliestireno antes y después de la disolución de poliestireno fuera de especificación

Producción anual, ton/año	25000			
Disolución, %	7			
PS a disolver, ton	1750			
	Antes		Después	
	ton/año	US\$	ton/año	US\$
Prime	21250	\$ 19.125.000,00	22737,5	\$ 20.463.750,00
Fuera de especificación	3750	\$ 1.856.250,00	2262,5	\$ 1.119.937,50
		\$ 20.981.250,00		\$ 21.583.687,50
Beneficio, US\$/año	\$		602.437,50	

En el Anexo G, se presenta una descripción con mayor detalle, de la evaluación económica del proyecto de disolución de poliestireno fuera de especificación en el proceso de producción de poliestireno de alto impacto.

3.5. CONTROL

La fase de control dentro de la metodología Six-Sigma, que ha de desarrollarse una vez el diseño sea implementado en el proceso, se desarrolla mediante la base de datos en Microsoft Access que fue creada durante el desarrollo de este trabajo, para recopilar toda la información del proceso.

Esta base de datos es una herramienta para conocer puntualmente las condiciones de operación, las materias primas utilizadas, los resultados de laboratorio, etc.

4. ATMÓSFERA INERTE EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

4.1. INTRODUCCION

Los elevados consumos de nitrógeno dentro del proceso de producción de poliestireno hacen necesario evaluar los requerimientos dentro del proceso para identificar alternativas que permitan reducir estos consumos. Dentro de la fase de definición de la metodología Six-Sigma se han evaluado los límites del proyecto, la carta del proyecto y el diagrama de flujo del proceso de suministro de nitrógeno a la planta de producción de poliestireno de propósito general y de alto impacto.

4.1.1. Límites del proyecto

4.1.1.1. Arranque

Los consumos de nitrógeno en el proceso corresponden principalmente a la creación de atmósferas inertes en los tanques de almacenamiento, control de vacío y procedimientos de parada y arranque de la planta.

El Estireno y vapores condensados de la devolatilización del producto terminado, que tienen alto grado de explosividad $N_f \geq 3$, requieren la creación de atmósferas inertes usando nitrógeno para reducir los niveles de explosividad. La presión en los tanques debe mantenerse superior a la presión de vapor de estos compuestos para controlar además, la emisión de compuestos orgánicos volátiles.

El Etilbenceno, agente diluyente del proceso, debe mantenerse bajo atmósfera inerte dada su incompatibilidad con agentes oxidantes. Es un líquido inflamable.

El aceite térmico y el mercaptano, sufren degradación oxidativa, por tanto, se usa nitrógeno, para desplazar el oxígeno que tiende a formar subproductos que deterioran la calidad de estos compuestos.

El nitrógeno se usa además, para el control de vacío en el devolatilizador y para el drenaje de líneas donde se han de realizar trabajos en caliente o para drenar el tren de reacción durante procedimientos de parada de la planta.

4.1.1.2. Parada

Identificar una alternativa que permita reducir consumos de nitrógeno en la planta.

4.1.2. Carta Del Proyecto – Six Sigma

Título del Proyecto:

Reducción de consumos de nitrógeno en la planta de producción de poliestireno.

Impacto del Proyecto:

Eliminar pérdidas de nitrógeno en el proceso y reducir las emisiones de vapores orgánicos a la atmósfera desde los tanques de almacenamiento.

Alcance y límites del Proyecto:

Definición de mejores condiciones de operación para el sistema que regula las condiciones de atmósfera inerte en los tanques de almacenamiento.

Objetivos del Proyecto:

Identificar las causas de los altos consumos de nitrógeno en la planta.

Proponer mejoras al sistema existente.

Cronograma:

Definir	: 1 mes
Medir	: 1 mes
Analizar	: 1 mes
Mejorar	: 2 meses
Controlar	: 6 meses

Entregables:

Diseño del Sistema de atmósfera inerte en tanques de almacenamiento.

Plan de seguimiento y control para la mejora propuesta.

4.1.3. Diagrama de Flujo del suministro de nitrógeno a la planta de producción de poliestireno

En la Figura 12, se presenta el diagrama de flujo para el sistema de suministro de nitrógeno a los diferentes usuarios de la planta.

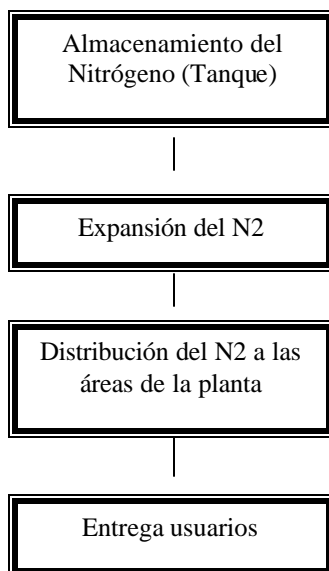


Figura 12. Diagrama de flujo para el suministro de nitrógeno a la planta de producción de poliestireno.

4.2. MEDICION DE LAS VARIABLES QUE DETERMINAN LOS CONSUMOS DE NITROGENO DENTRO DEL PROCESO

4.2.1. Definición de las variables del Sistema de Atmósfera inerte

En la Tabla 14 se presentan las variables de entrada, proceso y salida que afectan el sistema de distribución de nitrógeno a los diferentes usuarios de la planta de producción de poliestireno.

Tabla 14. Variables que afectan el sistema de distribución de nitrógeno

Variable	Relevancia	Sistema de Medición
Condiciones de suministro del nitrógeno		
<i>Presión</i>	Definir la presión de suministro en el sistema.	manómetro
<i>Flujo</i>	Definir el flujo de suministro de nitrógeno al sistema	medidor de flujo
Variables de los Tanques		
<i>Flujo de alimentación</i>	Afecta la presión en el espacio del vapor	medidor de flujo
<i>Flujo de descarga</i>		medidor de flujo
Válvulas de seguridad del tanque		
<i>Presión de desfoque</i>	Limita los valores de setting para el sistema de atmósfera inerte	manómetro
<i>Flujo</i>		medidor de flujo
Condiciones ambientales		
<i>Temperatura</i>	Modifica la temperatura del líquido	termómetro
<i>Absortancia</i>		Valores tabulados
<i>Radiación</i>		Valores reportados en la literatura
VARIABLES DE PROCESO		
Variable	Relevancia	Sistema de Medición
Variables de los Tanques		
<i>Presión</i>	Define los sistemas de alivio y atmósfera inerte	manómetro
<i>Nivel</i>	Genera cambios de volumen del espacio del vapor y por tanto en la presión	indicador de nivel
<i>Temperatura</i>	Afecta el % de volátiles	Termómetro
Atmósfera Inerte en los tanques		
<i>presión</i>	Control niveles de explosividad	manómetro
<i>% oxígeno</i>	Mantiene la concentración esperada de oxígeno en el líquido. Previene riesgos de explosividad.	Sensor de O2
VARIABLES DE SALIDA		
Variable	Relevancia	Sistema de Medición
<i>Flujo de nitrógeno</i>	Cuantificar gasto mensual	medidor de flujo
<i>presión de venteo</i>	Cuantificar VOC's	manómetro

4.2.2. Sistema de distribución de N₂ en la planta de poliestireno

Figura 13. Mapa de distribución del nitrógeno en la planta de poliestireno

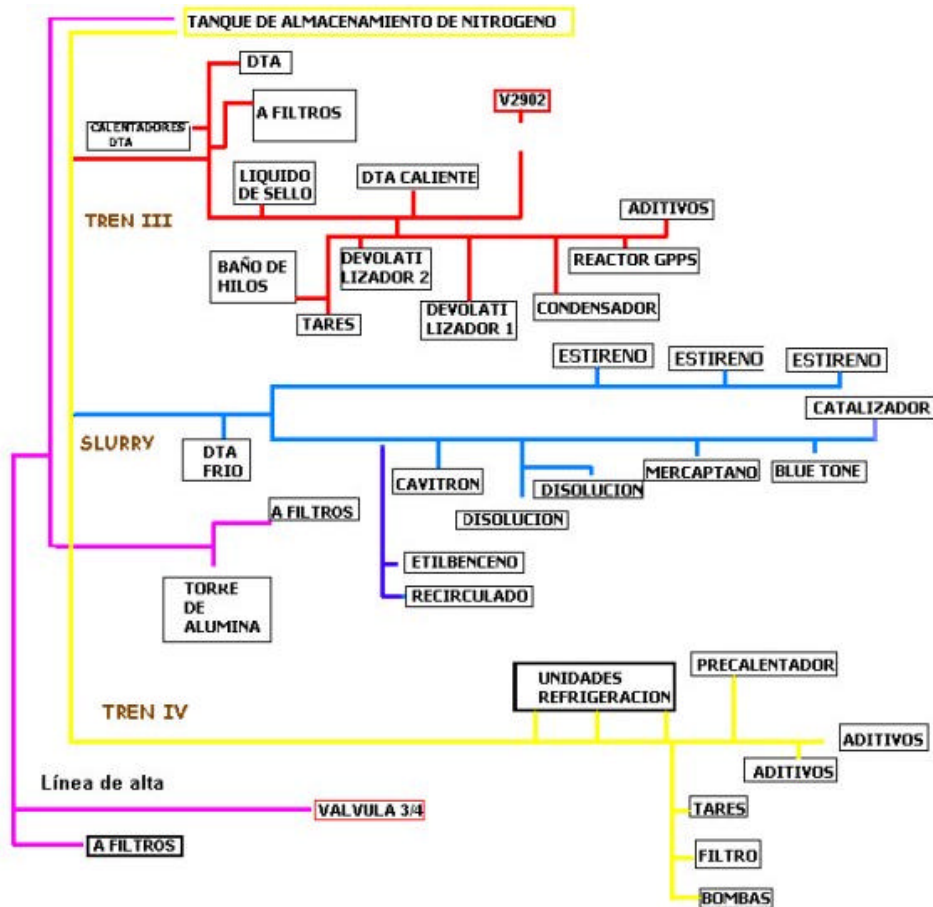


Tabla 15. Capacidad de los tanques que requieren atmósfera inerte

ATMÓSFERA INERTE	Altura tanque - Hs- (in)	Diámetro (in)	Volumen tanque (m3)	Altura líquido (in)	Volumen líquido (m3)
Mercaptano	36	28	0,36	9,60	0,10
Blue Tone	48	42	1,09	13,20	0,30
Iniciador	54	42	1,23	15,60	0,35
Tares	36	30	0,42	20,40	0,24
Recirculado 1 y 2	112	120	20,76	31,20	5,78
DTA - Caliente	84	72	5,60	24,00	1,60
DTA - Frío	60	48	1,78	24,00	0,71
Estireno 1	360	840	3269,29	108,00	980,79
Estireno 2	528	528	1894,50	108,00	387,51
Estireno 3	528	528	1894,50	108,00	387,51
Disolución 1 y 2	240	144	64,05	67,20	17,93
Etilbenceno	96	72	6,41	28,80	1,92
Aditivos 1	60	40	1,24	16,80	0,35
Aditivos 2	72	60	3,34	16,80	0,78
Líquido de sello 1	54	36	0,90	22,80	0,38
Líquido de sello 2	83	48	2,46	22,80	0,68

4.3. ANALIZAR

De acuerdo con el estudio de las variables del proceso de creación de atmósfera inerte en tanques y equipos de proceso dentro del proceso de producción de poliestireno, se encuentra que:

Los consumos importantes de nitrógeno dentro del proceso corresponden a los tanques de almacenamiento de materias, ya que los consumos de nitrógeno a equipos como el devolatilizador y equipos menores tales como bombas y filtros no son considerables.

Dentro de los tanques de almacenamiento, el almacenamiento de estireno es excesivamente mayor a los tanques de las demás materias primas y por tanto, la mejora propuesta debe controlar la atmósfera inerte en dichos tanques, permitiendo el control de la concentración de oxígeno en el espacio del vapor.

Según la Tabla 15 otros tanques de almacenamiento de materias primas (recirculado, disolución, aceite térmico y etilbenceno) requieren atmósferas inertes para mantener el tanque aislado del aire atmosférico y por tanto, el sistema diseñado debe favorecer el control de flujo de nitrógeno a dichos tanques.

4.4. MEJORA

El método más efectivo para mantener el oxígeno en un nivel apropiado en tanques grandes es almacenarlo bajo nitrógeno, con aire agregado al líquido por medio de un tubo inmerso. La agitación del monómero es recomendada para eliminar las regiones de agotamiento de oxígeno; este método es particularmente usual para almacenamiento en tanques sin revestimiento y que tienen una rotación lenta de estireno.

Los consumos de nitrógeno para tanques que no requieren oxígeno disuelto, se limita al control de la presión al interior del tanque según variaciones de nivel del líquido.

En la Figura 18, se presenta un esquema típico de la instrumentación, válvulas y accesorios requeridos para mantener los tanques de almacenamiento a condiciones controladas de temperatura, atmósfera inerte, nivel de líquido y control del flujo de alimentación y descarga de líquido.

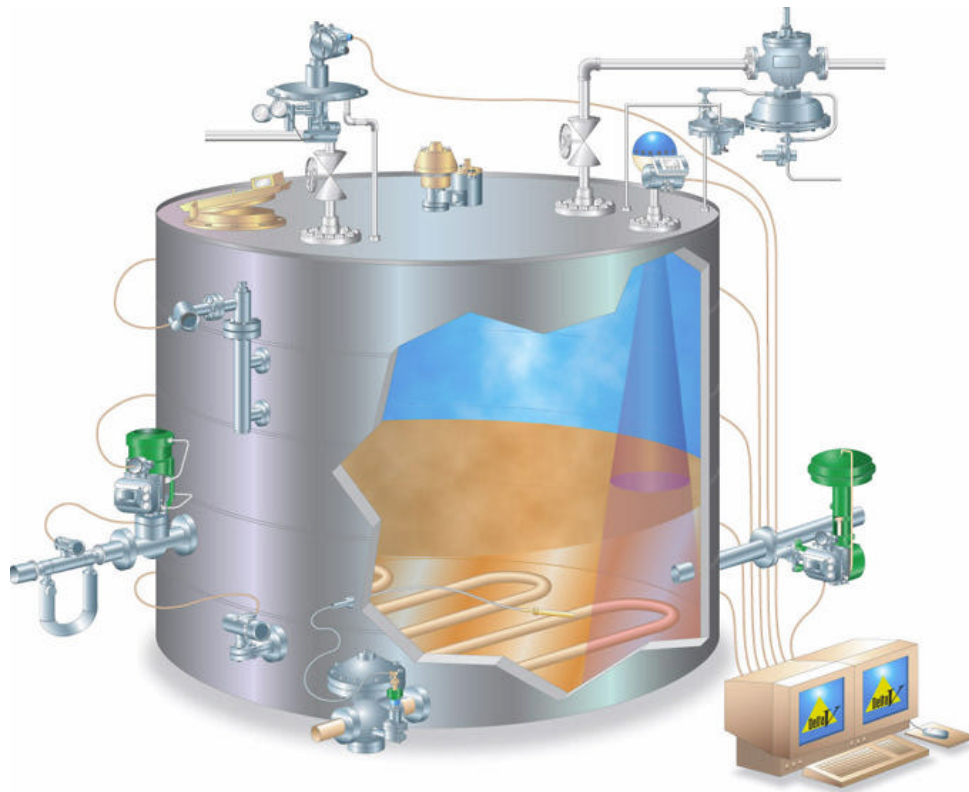


Figura 14. Esquema típico de válvulas y accesorios para control en tanques de almacenamiento

4.4.1. Etapas en el diseño

4.4.1.1. Calcular el espacio del vapor del tanque. Las materias primas que requieren atmósfera inerte con nitrógeno, se almacenan en tanques de capacidades definidas según criterios de máximo consumo, disponibilidad de materia prima, tiempo de entrega, entre otros.

Para dimensionar los tanques de almacenamiento es necesario consultar las prácticas para la construcción y operación del tanque según las referencias API FM, NFPA y UL, ASME

El cálculo del máximo volumen libre para el espacio de vapor se realizó teniendo en cuenta que los tanques se desocupan hasta un 30% de su capacidad, y que el espacio ocupado bajo el techo del tanque tiene forma cónica.

El espacio de vapor de cada tanque de almacenamiento de materias primas se muestra en la Tabla 16. Este espacio es necesario para la expansión del fluido con el cambio de la temperatura y de nivel en el líquido para prevenir el rebose del líquido.

Tabla 16. Masa de nitrógeno requerida para mantener los tanques bajo atmósfera inerte

Volumen gas (m3)	Volumen Nitrógeno (m3)	Volumen Oxígeno (m3)	Volumen vap. Styr. (m3)	Masa de Nitrógeno (kg)
0,27	0,27	-	-	0,30
0,79	0,79	-	-	0,90
0,87	0,87	-	-	0,99
0,18	0,18	-	-	0,20
14,97	14,97	-	-	16,97
4,00	4,00	-	-	4,54
1,07	1,07	-	-	1,21
2288,50	1955,33	160,20	172,98	2215,65
1506,99	1287,59	105,49	113,91	1459,01
1506,99	1287,59	105,49	113,91	1459,01
46,12	46,12	-	-	52,26
4,48	4,48	-	-	5,08
0,89	0,89	-	-	1,01
2,56	2,56	-	-	2,90
0,52	0,52	-	-	0,59
1,79	1,79	-	-	2,02

4.4.2. Dimensionar el sistema de atmósfera inerte "blanketing". Los sistemas de atmósfera inerte dentro del proceso de producción de poliestireno se realizan mediante control de presión en el espacio de vapor de tanques de proceso y mediante control del porcentaje de oxígeno registrado en el espacio del vapor para tanques de estireno.

4.4.2.1. Sistema de atmósfera inerte por control de presión. El método de atmósfera inerte basado en la presión, consiste en mantener continuamente una presión positiva, mediante un regulador de presión. El sistema de inertización debe ser capaz de presurizar el espacio del vapor y mantener exactamente esa presión.

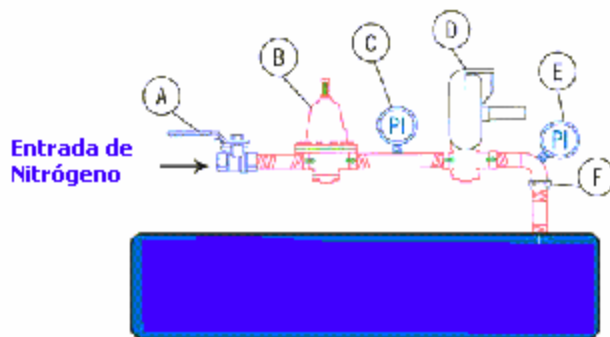


Figura 15. Componentes del sistema de "blanketing" por control de presión

Componentes

- A. Válvula de bola para suspender la entrada de gas inerte.
- B. Regulador de presión para controlar el flujo de nitrógeno al tanque, con válvula de alivio para reducir y regular grandes presiones a la entrada y mantener la presión en sus límites (0.25 in H₂O - 0.5 in H₂O)
- C. Manómetro de presión de indicación positiva al regulador principal.
- D. Regulador auto o con regulación piloto.
- E. Manómetro para indicación de la presión al interior del tanque.
- F. Válvula cheque para asegurar la correcta dirección del flujo.
- G. Válvulas de alivio de sobre-presión y vacío.

La cantidad de admisión es proporcional a la compensación del punto de ajuste. A medida que la presión del tanque incrementa y alcanza el punto de ajuste, la válvula principal de admisión se cierra. Esto mantiene un punto de ajuste preciso y reduce la posibilidad de rebosar los límites.

La presión de inertización debe ser menor que la capacidad de presión del tanque y también debe permitir algún rango muerto por debajo de la presión de operación del venteo del tanque para evitar interacciones.

El adecuado dimensionamiento es importante para una operación estable. Si se dimensiona a menos de lo requerido, puede resultar en una caída de presión en el tanque por debajo de su punto de ajuste así como un sobreesfuerzo de la válvula de control principal para sostener la demanda.

El sobre-dimensionamiento es menos crítico. Sin embargo, en el extremo puede resultar en una operación inestable debido a que se excede continuamente el punto de ajuste

Para determinar los requerimientos de salida a través del venteo del tanque se debe tener en cuenta:

Máxima rata de bombeo al tanque

Máximo flujo de salida por cambios térmicos

Eventuales fallas en el sistema de atmósfera inerte.

El proceso tiene dos componentes: pad (make-up) y depad (vent).

Pad es la porción del proceso que provee gas al espacio de vapor del tanque, manteniendo su presión. El nivel del líquido varía cuando se está descargando desde el tanque, aumentando el espacio del vapor y requiriendo la entrada de gas para mantener la presión. La presión en el espacio del vapor cae además por efectos diurnos, cambios de clima o disminución de la temperatura en el proceso, requiriéndose la adición de gas inerte para restaurar la presión.

Las funciones del proceso depad son remover gas desde el espacio del vapor en el tanque cuando la presión se incrementa. Está es un función de venteo. El nivel del líquido incrementa durante el llenado del tanque, reduciendo el volumen en el espacio del vapor y por tanto se requiere remover el gas para mantener la presión. La presión del gas puede incrementar por efectos diurnos, cambios en el clima o incrementos en la temperatura del proceso.

Conservar la cantidad de gas inerte usado, requiere que la presión de inertización sea muy baja. Adicionalmente, debe ser menor que la capacidad de presurización del tanque y la presión normal de venteo del tanque para prevenir el uso innecesario de estos dispositivos y la subsiguiente descarga del nitrógeno así como de pérdida de producto.

Los venteos que se deben instalar en el tanque corresponden a un venteo de emergencia y venteos de vacío y presiones normales adecuadamente dimensionados para prevenir salidas de los gases por incrementos de la temperatura, caídas de presión barométrica o fuego.

4.4.2.2. Descripción del proceso de inertización con control de la concentración de oxígeno en el tanque. La regulación de flujo de gas inerte hacia el tanque puede realizarse sensando la presión o el % de oxígeno en el espacio del vapor. Los cambios de temperatura y el nivel del líquido en el tanque ocurren por transferencia de líquido, fugas o efectos térmicos.

Adicionalmente, el sistema incluye un venteo adicional de presión y vacío. Estas válvulas protegen el tanque de colapso por vacío o daños por sobre presurización. En caso de riesgo de incendio se debe incluir una válvula de venteo de emergencia.

VARIABLES PARA AJUSTAR LA CANTIDAD DE GAS INERTE A ADICIONAR

- El tamaño y la forma del tanque
- La concentración de oxígeno en el espacio del vapor
- Las condiciones de almacenamiento (temperatura y presión)
- El gas inerte a utilizar
- El volumen del espacio de vapor
- La velocidad de carga y descarga del tanque.
- Las características del fluido

Medida de oxígeno

Está basado en la medida directa de oxígeno, lo cual optimiza el consumo de gas inerte mientras se trabaja en condiciones seguras. El oxígeno sensado mediante celdas analíticas de hidrocarburo, debe estar entre el 5 y 7% en volumen.

Estos tanques tienen celdas analíticas que registran las concentraciones de oxígeno. Una vez se superan los niveles permisibles, la válvula solenoide permite un flujo adicional de nitrógeno al tanque para aumentar la presión en el sistema y activar una válvula de alivio que purga el tanque.

Elementos del sistema:

Válvula solenoide

Sensor de oxígeno

Válvula de seguridad de presión y vacío.

Válvula de alivio de presión y vacío PVRV con arrestador de llama.

Válvulas de aislamiento, manómetros.

Partiendo del hecho de que se tiene estireno líquido en un tanque en presencia de atmósfera inerte y se le ha adicionado inhibidor TBC, se desea ajustar el porcentaje de oxígeno disuelto, ajustando el porcentaje de oxígeno en la atmósfera del tanque. Se burbujea una corriente de aire a un caudal de $4 \text{ ft}^3/\text{h}$, la cantidad de oxígeno disuelto deseada es de 20 ppm, es decir, 20 mg de oxígeno por litro de estireno líquido. Si el volumen de estireno líquido es de 980780 l, entonces la masa de oxígeno disuelto debe ser de 19615 mg es decir, 0.01962 kg O_2 que corresponden a $6.13 \cdot 10^{-4}$ kmol de O_2 .

Además, se requiere que en la atmósfera del tanque exista un 7% de oxígeno que corresponde a 160.195 m^3 . Totalizando, la cantidad de O_2 que debe contener el tanque es de 160.21 m^3 , lo que es igual a $5657,76 \text{ ft}^3$.

Control de oxígeno

Tomando como base el límite de concentración de oxígeno para que el gas explote, se requiere mantener la concentración de oxígeno en el espacio del vapor inferior en 2-3 puntos por debajo del límite de concentración de oxígeno en estireno, LOC. Para sistemas de control de atmósfera inerte se recomienda trabajar con el punto de ajuste del 60% del LOC. El límite LOC para el estireno en aire es de 1.1 a 6.1 % V/V por lo que se debe controlar que la concentración de oxígeno en el espacio del vapor inferior al 10-11%.

Adicionalmente, la concentración de oxígeno en el líquido de estireno requerida para activar el inhibidor TBC corresponde a 15-20 ppm. Por tanto, la atmósfera del tanque debe contener 5-7% de O₂ para mantener las 15-20 ppm de oxígeno disuelto.

La velocidad de burbujeo reportada en la literatura corresponde a 3-4 ft³/h para tanques de capacidades hasta 2050 m³.

Los cálculos de la presión de vapor del estireno según Antoine con la temperatura en °C, corresponde a:

$$\begin{aligned} \log_{10} P \text{ (mm Hg)} &= 6.95711 - \frac{1446.578}{T + 210.2} \\ P_{\text{vapor}_{30^{\circ}\text{C}}} &= 8.21 \text{ mmHg} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Masa de nitrógeno requerida

Teniendo las dimensiones del tanque y la altura del líquido se puede conocer el volumen ocupado por el líquido y por diferencia se tiene el volumen del gas.

La atmósfera del tanque está conformada por nitrógeno, oxígeno y vapor de estireno.

Para los cálculos se determina primero la cantidad de vapor de estireno con base en la presión de vapor del estireno a la temperatura de almacenamiento 28°C, usando la ecuación de Antoine.

Con esta presión y el volumen que debe ocupar el gas se determina la masa de vapor de estireno por medio de la ley de Gases Ideales.

Para encontrar el volumen real ocupado por dicho vapor, mediante ley de Gases ideales a presión atmosférica, se calcula el volumen real ocupado por el vapor.

El volumen ocupado por el oxígeno, se calculó como el 7% del volumen total en el espacio del vapor.

El volumen ocupado por el nitrógeno, se calculó como la diferencia del volumen total menos el volumen ocupado por el oxígeno y el vapor de estireno.

Finalmente, mediante ley de gases ideales, se encuentra la masa de nitrógeno requerida para el volumen calculado en el paso anterior.

En el Anexo H, se presenta el modelamiento matemático preliminar del sistema de atmósfera inerte considerando una inyección controlada de aire al líquido.

4.4.3. Definición de los Venteos del tanque. De acuerdo con el API 2000, los venteos normales pueden calcularse por el método descrito en la publicación del API, Boletín 2518

Este modelo es empleado actualmente y esta disponible como un programa en la Publicación de la US EPA-AP42.

Durante el calentamiento ocurren dos efectos simultáneamente, la expansión térmica del vapor contenido en el tanque que ocasiona el incremento de la presión de acuerdo a la ley de los Gases ideales a volumen constante. El segundo efecto, es la evaporación desde la superficie del líquido por el incremento de su temperatura y por tanto el número de moles totales en el espacio del vapor incrementa, incrementando así la presión.

4.4.3.1. Venteo de vacío. Este determina la presión de operación mas baja del sistema. Protege el tanque de colapso por vacío. Este venteo permite la entrada de aire atmosférico al tanque.

4.4.3.2. Venteo de presión. Es una presión de venteo necesaria para proteger el tanque. Corresponde a la máxima presión de trabajo durante operación. Compensan la entrada de líquido, la expansión térmica y posibles fallas en la válvula de atmósfera inerte en la posición de falla abierta. Estas válvulas requieren un tiempo para alcanzar el ciclo de los puntos de ajuste. Es la opción más costosa.

4.4.3.3. Venteo de emergencia. Corresponde a una válvula de venteo grande diseñada para pasar suficiente fluido para proteger el tanque cuando esta expuesto a fuego.

5. CONCLUSIONES

Se ha comprobado que la aplicación de las etapas de la metodología Six-Sigma dentro del desarrollo del proyecto, ha permitido un análisis de las causas de generación de poliestireno fuera de especificación y de los altos consumos de nitrógeno en la planta. Adicionalmente, el análisis de las variables del proceso ha permitido definir la capacidad del proceso de disolución y los requerimientos de control para el sistema de atmósfera inerte. A partir de las fases de medición y análisis se definió la mejora a realizar al proceso existente.

Las causas de generación de poliestireno fuera de especificación dentro del proceso de producción de poliestireno corresponden a la transición entre productos que difieren en sus propiedades finales, la dificultad de control de las condiciones de operación dado el amplio número de variables a controlar dentro del proceso, materias primas fuera de los parámetros de calidad y errores del personal que opera la planta.

A partir del análisis económico realizado, la disolución de poliestireno fuera de especificación en el proceso, es una alternativa viable que implica la implementación de un sistema de transporte neumático con un capital de inversión de U\$100.000. El tiempo de retorno de la inversión es inferior a 3 meses, pues el beneficio del proyecto es de aproximadamente US\$602.500 anuales.

Los consumos de nitrógeno dentro del proceso de producción de poliestireno corresponden principalmente a la creación de atmósferas inertes en tanques de almacenamiento de materias primas.

Mediante el análisis de los sistemas de atmósfera inerte se ha logrado establecer la presión de ajuste para cada uno de los usuarios de nitrógeno dentro de los procesos de producción de poliestireno de alto impacto y poliestireno de propósito general.

En el desarrollo del modelo matemático para el tanque de almacenamiento de estireno, se han encontrado las funciones de transferencia del transmisor y controlador de presión y concentración de oxígeno, las válvulas de admisión de nitrógeno, el venteo, y el aspirador.

BIBLIOGRAFIA

1. ESCALANTE, Edgardo J. Seis -Sigma Metodología y Técnicas. México : Limusa Editores, 2003.
2. GANO, Dean. Análisis de Causas y Efectos. EU: Apollo Associated Services, 1999.
3. BISHOP, R. B. Practical Polymerization for Polystyrene. New York: Cahners, 1971.
4. BRANDUP, J. and Immergut, E. H. Polymer Handbook. 2 ed. New York : Wiley-Interscience, 1966.
5. CHEN, C. C. A Continuous Bulk Polymerization Process for Crystal Polystyrene. Polymer Plastic Technology, 1994. p. 33, 55-61.
6. FLORY, P. J. Principles of Polymer Chemistry. London : Cornell University Press, 1953.
7. GONZALEZ, Milton et al. Sizing Gas Cyclones for Efficiency. Chemical Engineering. 1986. p 119-120.
8. FISCHER, John. Practical Pneumatic Conveyor Design. Chemical Engineering. Jun 1958. p. 114 - 118.
9. GERCHOW, F.J. Rotary Valve Selection for Pneumatic Conveying System: Bulk Solids Handling, v. 1. N° 1. February, 1981. p. 83-86.
10. EMISSION FACTOR Documentation for AP-42. Section 7.1: Organic Liquid Storage Tanks. Environmental Protection Agency. 1997.
11. EVAPORATIVE LOSS from Fixed-Roof Tanks, API Draft Publication 2518, 2 ed. Washington : American Petroleum Institute. October 1991.

12. FERRY, R.L., Estimating Storage Tank Emissions. TGB Partnership, 1994.
13. USE OF Variable Vapor Space Systems to Reduce Evaporation Loss. API Bulletin 2520. Washington : American Petroleum Institute. September 1964.
14. VOC EMISSIONS From Volatile Organic Liquid Storage Tanks. EPA-450/3-81-003a. U. S : Environmental Protection Agency. July 1984.
15. BENZENE EMISSIONS From Benzene Storage Tanks. EPA-450/3-80-034a, U. S. : Environmental Protection Agency. December 1980.
16. LAVERMAN, R.J. Emission Reduction Options for Floating Roof Tanks. Houston : Chicago Bridge and Iron Technical Services. January 1992.
17. TOXIC SUBSTANCE Storage Tank Containment. Ecology and Environment. 1985.
18. CURRENT STATUS and Future Prospects. Report on the Alberta Petrochemical Industry. Canada : Petrochemical and Energy Consultants. December, 1998.
19. PERRY, R. Manual del Ingeniero Químico. Tomo II. Mexico : McGraw-HILL. p. 7-22 – 7-27.
20. GERCHOW, Frank. Pneumatic-Conveying System. Chemical Engineering. Feb 1975. p. 73-86.
21. CRANE, CO. Flow of Fluids Through Valves, Fitting and Pipe. Chicago USA : Engineering Division Crane Co. 1957.
22. Mc CABE, WARREN. Unit Operation of Chemical Engineering. Tokyo : McGraw Hill.1956. p. 243-279.
23. Mc CABE, SMITH, J., and HARRIOT, P.. Unit Operations of Chemical Engineers. 4 ed. New York : McGraw Hill International. 1985.
24. PERRY, R., and CHILTON, C. 1973. Chemical Engineer's Handbook. 4 ed. New York : McGraw Hill book Company.
25. COKER, A.K.. Understanding Cyclone Design. Chemical Engineering Progress. v. 89. 1993. p. 5155.

26. STERN, A.C et al. Fundamentals of Air Pollution. New York : Academic Press. 1973.
27. HENDERSON, S.M. and R. L. PERRY.. Agricultural process Engineering. New York. : John Wiley and Sons. 1955. p. 145, 171, 173, 175.
28. STORCH, O. et al. Industrial Separators for Gas Cleaning. Chemical Engineering. New York : Elsevier Scientific Publishing. 1993.
29. GONZALEZ, Milton et al. Gas cyclones for efficiency. Chemical Engineering. April 1986. p. 119-120.
30. SUAREZ, Pablo. Determinación de propiedades de almacenamiento y transporte de productos agrícolas y diseño de silos y transporte neumático. UIS. 1988. p. 59-70
31. W. LICHT and W. H. KOCH. New design approach boosts cyclone efficiency. Chemical Engineering. November 1977. p. 80-88.
32. GERCHOW, Frank. Specifying Components of Pneumatic-Conveying Systems. Chemical Engineering. March 31, 1975. p 88-96
33. API STANDARD 2000: Venting Atmospheric and Low Pressure Storage Tanks, Nonrefrigerated and Refrigerated. Washington, D.C. : American Petroleum Institute (API). 2000.
34. PAUL R. OSTAND. Tank Atmosphere inert: A Complete Guide for Designers, Installers and Users. Joshua Sinsel of McNeil Consumer Healthcare.

Anexo A. Almacenamiento de estireno

El estireno monómero sufre polimerización por mecanismos iónicos y/o por formación de radicales libres. El nivel de polímetro puede ser determinado mediante el método ASTM D-2121.

La polimerización iónica se evita con catalizadores iónicos tipo ácido de Lewis. La polimerización por radicales libres ocurre por efectos térmicos y no necesita de catalizador o iniciador, esto puede evitarse manteniendo el estireno a bajas temperaturas y mediante el uso del 4-Terbutilcatecol (TBC) el cual es el inhibidor universal.

El estireno sin inhibir puede reaccionar con el mismo en una polimerización inducida térmicamente, o puede reaccionar con oxígeno para formar un co-polímero oxígeno-estireno, benzaldehído y formaldehído.

Estas reacciones pueden generar ácidos corrosivos y problemas de color en el producto final, dichas reacciones se vuelven significativas a altas temperaturas.

La concentración óptima de TBC debe estar entre 10 y 15 ppm, aunque cualquier concentración entre 10 y 55 ppm es aceptable. La tasa de disminución del TBC varía con las condiciones de almacenamiento, particularmente con la concentración de oxígeno y la temperatura, por tanto el nivel de inhibidor debe ser chequeado periódicamente según ASTM D-4590. El inhibidor requiere oxígeno disuelto para trabajar efectivamente. El nivel de oxígeno disuelto en estireno monómero es de 15 -20 ppm, este nivel puede mantenerse por recirculación del estireno monómero en el tanque de almacenamiento al menos 3 veces por semana o introduciendo una corriente de aire. El TBC actúa como un donador de protones para estabilizar los radicales libres y prevenir la reacción de los radicales libres con el monómero iniciando así una cadena de polímero.

Si el oxígeno se remueve del espacio de vapor del tanque, el oxígeno disuelto será removido al espacio del vapor y el TBC será ineficiente, iniciando la polimerización. Altas concentraciones de oxígeno no mejoran la inhibición, por el contrario, pueden causar la formación de radicales libres e incrementar la tasa de oxidación del estireno y el agotamiento del TBC.

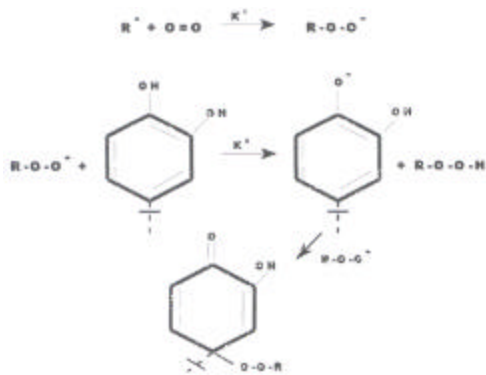


Figura A1. Reacciones de Inhibición del TBC

La presencia de más de 15 ppm de polímero en el estireno monómero puede afectar el color, la claridad y la dureza del polímero producido. Los principales problemas de color son generados por reacciones de oxidación del estireno y el TBC, esto puede evitarse si se presta especial atención al nivel de oxígeno en el estireno y en el espacio del vapor.

Atmósfera Inerte

La atmósfera inerte es el proceso que provee y mantiene un gas inerte sobre el nivel del líquido en un tanque cerrado. Las presiones son usualmente muy bajas, menores a 1 psig. Las principales industrias que usan atmósfera inerte son las de alimentos, manufactura de semiconductores electrónicos, el almacenamiento de químicos orgánicos volátiles, combustibles, entre otros.

Atmósfera inerte con aire.

Este es el sistema más fácil y barato de instalar y operar, pero debido al alto contenido de oxígeno del aire, tiene como desventaja la oxidación del estireno sin inhibir y el alto peligro de fuego o explosión. Se recomienda su uso cuando el tiempo de almacenamiento es suficientemente corto como para prevenir una formación significativa de impurezas oxigenadas y cuando se han tomado todas las precauciones posibles para prevenir explosiones.

Atmósfera inerte con gas inerte.

La eliminación del oxígeno en el espacio del vapor del tanque reduce el peligro de explosión y elimina problemas asociados con la oxidación del monómero. Sin oxígeno en el espacio del vapor, la concentración del oxígeno disuelto en el estireno disminuye rápidamente. Cuando los niveles caen por debajo de 8 ppm, el TBC no es capaz de cumplir su función de manera efectiva y entonces comienza la polimerización. Se requiere por consiguiente la adición de aire al estireno o al espacio del vapor, o de lo contrario, no exceder el almacenamiento en una semana a 21°C, bajo las mejores condiciones.

Anexo B. Etapas de la polimerización del estireno

La reacción tiene tres fases (1) determinadas por la pureza del monómero y la temperatura.

Iniciación de la cadena

Comprende desde la ruptura de la molécula de iniciador para generar radicales hasta la reacción del radical con una molécula de monómero. En esta etapa se forman los radicales libres por temperatura o mediante iniciador, el cual asegura una temperatura más baja en la reacción.

El doble enlace carbono-carbono, tiene un par electrónico susceptible de ser fácilmente atacado por un radical libre. El electrón desapareado, cuando se acerca al par de electrones, establece un nuevo enlace químico entre el fragmento de iniciador y uno de los carbonos del doble enlace de la molécula de monómero.

El iniciador es el factor dominante en el control del peso molecular, disminución de la polidispersidad y el incremento del contenido de sólidos. Los iniciadores comúnmente usados son peróxidos orgánicos capaces de remover un hidrógeno de la molécula de estireno. La rata de descomposición a la cual el iniciador produce radicales libres, determina la temperatura de la reacción. (2)

Esta etapa puede retardarse o inhibirse durante el almacenamiento por el uso del Terbutil Cathecol TBC en presencia de oxígeno, al cual se acoplan los radicales libres y se consume.

¹ Reaction Eng. of Step Growth Polymerization. Santosh K. Gupta y A. Kumar. Plenum Press,N.Y (1987).

² Peter A. Callais; M. G. Moskal. Higher-Solids, Higher Quality Acrylic Coatings Resins Produced With Organic Peroxide Initiators. Atofina Chemicals, Inc.

Propagación

Es una etapa más rápida, que se da por reacción en cadena. Su velocidad depende de la concentración de monómero. La reacción es una reacción exotérmica de aproximadamente 300 BTU/Lb; el calor generado por la reacción debe removerse para controlar la temperatura, ya que temperaturas altas se disminuye el promedio del peso molecular del producto, lo cual reduce la resistencia y aumenta la fluidez. La longitud de las cadenas varía entre 100 y 5000 unidades de monómero por cadena. Los radicales libres del iniciador pueden abstraer hidrógenos del polímero que se está formando, ocasionando ramificaciones en la cadena de polímero.

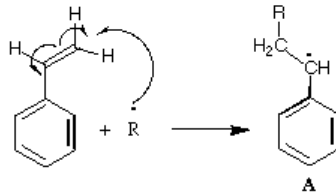
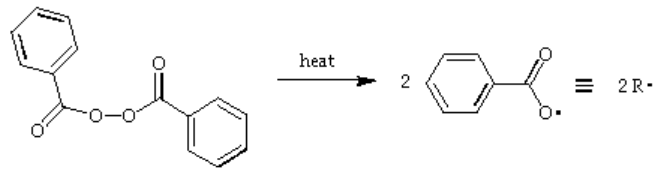
Terminación

Esta etapa determina el peso molecular final. Se puede dar por dos mecanismos:

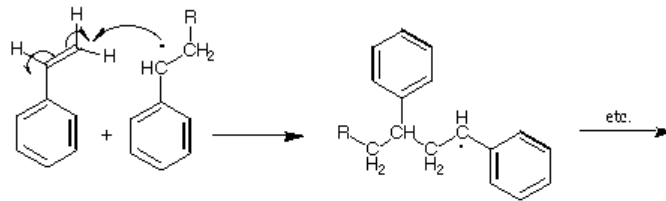
Combinación, donde dos cadenas se encuentran y se acoplan.

Transferencia, la cadena se acopla a la molécula del agente transferente (etilbenceno, mercaptano y otros) dejando como residual otro radical libre. La velocidad de reacción no se afecta ya que se cambia un radical libre por otro; pero el peso molecular sí se afecta pues la cadena se termina.

Chain-Initiating Steps:



Chain Propagating Steps:



Chain-Termination Steps:

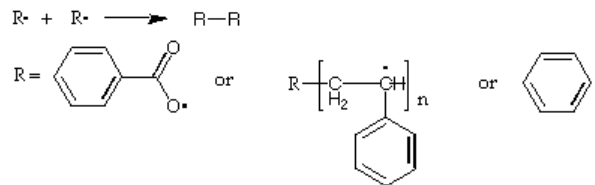


Figura A2. Etapas de la Polimerización del Estireno

En la reacción del poliestireno de alto impacto, los dos enlaces dobles en la estructura del polibutadieno son capaces de polimerizar, obteniéndose el polibutadieno copolimerizado con el monómero estireno. Estas cadenas elastómeras unidas a la cadena principal en los homopolímeros de polibutadieno y poliestireno no se combinan entre sí, esto provoca la formación de dos fases, que absorben energía cuando el polímero es sometido a impacto. Este material se conoce como poliestireno de alto impacto, o HIPS. En la mezcla, se presentan también cadenas de poliestireno lineal y polibutadieno lineal. Esto hace del HIPS una mezcla inmiscible de poliestireno y polibutadieno. Las moléculas injertadas de poliestireno-polibutadieno unen las dos fases.

Anexo E. Mapa de procesos producción de poliestireno de alto impacto

Cuadro 5. Mapa del proceso de producción de Poliestireno de alto impacto					
Item	Entradas	Medición - entradas	Flujo de Proceso	Salidas	Medición - salida
1	Cantidad de estireno-caucho en el tanque de disolución	% estireno % Caucho	Calcular Carga a Preparar (relación caucho-estireno)	Caucho a adicionar	# balas a adicionar
2	Volumen inicial en el tanque	% Nivel del tanque	Carga de estireno al tanque	Cantidad de estireno a adicionar	Volumen de estireno para completar carga
3	Rata de Alimentación de Caucho Rata de Alimentación de estireno	# de balas Volumen de estireno	Inicio de molida de caucho y adición de estireno	Mezcla de caucho, estireno	Viscosidad Amperaje en molino Ruido molino Vibraciones molino % O2 cavitron
4	Mezcla de caucho- estireno % Nivel del tanque	Viscosidad % nivel en el tanque	Se inicia agitación	Mezcla de caucho, estireno	Viscosidad Amperaje de agitador
6	Mezcla estireno-caucho Tiempo de agitación en alta	Viscosidad Tiempo de agitación	Agitación en alta	Homogenización de la mezcla	Viscosidad en el tanque durante agitación Amperaje de agitador % caucho Análisis visual de homogenización de la mezcla
7	Rata de alimentación	lb/hr de alimentación %caucho en producto Viscosidad en el tanque %caucho en el tanque	Filtración	Flujo desde el tanque	Viscosidad a la salida del tanque Amperaje bombas de alimentación Caída de Presión en el filtro
8	Flujo de recirculado Flujo de slurry diluido Perfil de proceso	Viscosidad salida del filtro	Precaentamiento	Flujo de alimentación	Viscosidad salida del precalentador Delta de presión en el prec. Delta de temp en el prec.
9	Flujo de alimentación Alimentación de aditivos	Viscosidad salida del prec. Presión entrada al 1er reactor	Entrada al 1er reactor	Flujo de alimentación	Presión salida del 1er reactor Torque del 1er agitador % sólidos Tamaño de partícula
10	Flujo de alimentación Perfil de proceso Alimentación de aditivos	Presión de salida del 1er reactor	Alimentación al 2do reactor	Flujo de alimentación	Presión salida del 2do reactor Torque del 2do agitador
11	Flujo de alimentación Perfil de proceso	Presión de salida del 2do reactor	Alimentación al 3er reactor	Flujo de alimentación	Presión salida del 3er reactor Torque del 3er agitador % de conversión
12	Flujo de alimentación Perfil de proceso % nivel en el Devolatilizador	Presión de salida del 3er reactor	Alimentación de polimero al Devolatilizador	Polimero Estireno sin reaccionar, otros	Presión Nivel Temperatura (chaqueta y calentador de polimero)
13	Polimero Rata de alimentación	rpm de bombas	Flujo del polimero hacia el dado extrusor	Polimero	Temperatura del dado Presión descarga de las bombas Presión en la línea de transferencia Granulación (peso y dimensiones)
14	Muestra para el Laboratorio Procedimientos analíticos Especificaciones de producto terminado		Análisis de propiedades del poliestireno en el Laboratorio	Resultados calidad y clasificación del producto (dentro o fuera de especificación)	Resultados de calidad de producto terminado
15	Pellets	Clasificación del producto	Almacenamiento en Silos de Producto dentro y fuera de las especificaciones de calidad	Productoalmacenado	Nivel en silos

Diagrama de Flujo del proceso de producción de poliestireno de alto impacto

A partir del análisis de las etapas del proceso de producción de poliestireno de alto impacto, se obtuvo el diagrama de flujo del proceso, tal como se indica en la figura A3.

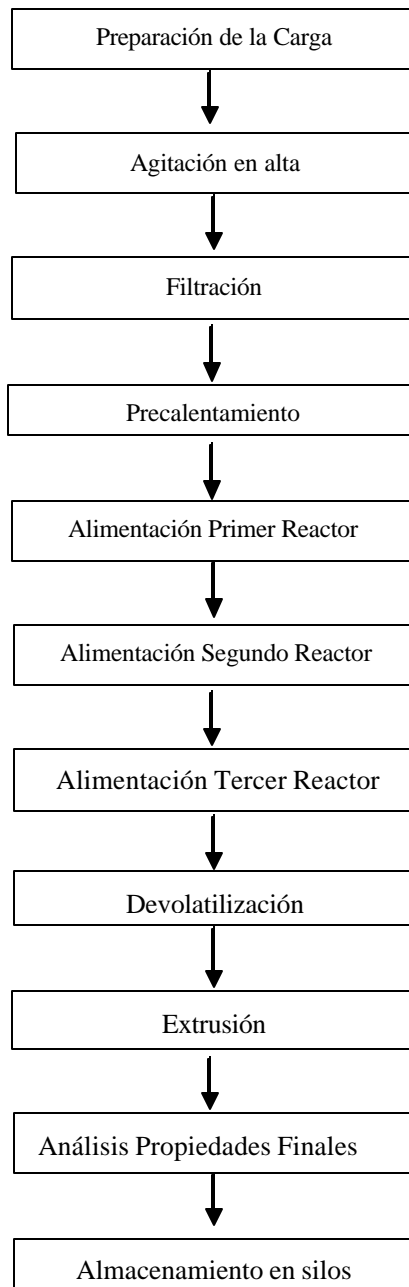


Figura A3. Diagrama de flujo del proceso de producción de poliestireno de alto impacto.

Estudio de Variables del Proceso de producción de poliestireno de alto impacto.

Los cuadros 6, 7 y 8 presentados a continuación, muestran el análisis de las variables de entrada, proceso y salida que afectan la producción de poliestireno de alto impacto.

Variables de Entrada al proceso de producción de poliestireno de alto impacto.

Cuadro 6. Variables de entrada al proceso de producción de poliestireno de alto impacto		
<i>Variable</i>	<i>Relevancia</i>	<i>Sistema de Medición</i>
Variables de la Molienda		
<i>Tipo y cantidad de Caucho</i>	Define la viscosidad en el tanque de disolución Propiedades del producto final Afecta el tamaño de partícula	Balanza Pruebas de laboratorio
<i>Tiempo de la molienda</i>	Define el tiempo para molienda del caucho Define el tiempo total disponible para adición del poliestireno fuera de especificación a disolver	
Variables de los Tanques		
<i>% Nivel en el tanque</i>	Cuantificar masa de estireno disponible en el tanque	Medidor de nivel
<i>% caucho en el nivel inicial del tanque</i>	Cuantificar masa de caucho disponible en el tanque	A partir de datos de la molienda anterior
<i>Rata de alimentación de estireno</i>	Completar carga	Medidor de flujo
Variables del Reactor		
<i>Rata de Alimentación total (Lb/h)</i>	Define volumen de producción. Define cantidad de aditivos al proceso.	Medidor de flujo
<i>Iniciador (ppm)</i>	Control peso molecular, disminución polidispersidad, controla niveles de estireno residual, tamaño de partícula de caucho.	Medidor de flujo
<i>Mercaptano (ppm)</i>	Transferente de cadena - afecta el tamaño y peso molecular del poliestireno - mejora la procesabilidad	Medidor de flujo
<i>Etibenceno</i>	Reduce aumento viscosidad de la reacción, disipa calor de reacción Transferente de cadena - Cambia coeficiente de actividad - Baja % de sólidos	Medidor de flujo
<i>Aceite mineral</i>	Incrementa la flexibilidad, mejora el inyección y el moldeo.	Medidor de flujo
<i>Antioxidante</i>	Antioxidante. Retarda la oxidación del polímero debido a la oxidación del aire.	Balanza
<i>Estearato de Zinc</i>	Desmoldante, agente de lubricación interna	Medidor de flujo
Variables del Devolatizador		
<i>Rata de alimentación (lb/h)</i>	Capacidad del sistema	Medidor de flujo

Variables de Proceso de producción de poliestireno de alto impacto.

Cuadro 7. Variables de proceso en la producción de poliestireno de alto impacto		
<i>Variable</i>	<i>Relevancia</i>	<i>Sistema de Medición</i>
Variables de la Molienda		
<i>Amperaje del equipo de molienda</i>	Consumos de energía	Medidor
<i>Vibraciones del equipo de molienda</i>	Protección de los equipos	Medidor de vibraciones
<i>Inspección/Calibración de cuchillas del molino</i>	Mantener tamaño de las partículas de caucho	Medición espesores
Variables de los Tanques		
<i>Viscosidad</i>	Determina los % de poliestireno fuera de especificación a disolver	Pruebas de laboratorio
Variables de los Equipos		
<i>Amperaje bombas de alimentación al reactor</i>	Consumos de energía	Medidor
<i>Caída de Presión en los filtros</i>	Variaciones en la viscosidad	Manómetro diferencial
Variables en los Reactores		
<i>Torque de Agitación</i>	Consumos de energía	
<i>% sólidos</i>	Grado de polimerización	Pérdida de peso a condiciones específicas de T y P.
<i>Temperatura</i>	Viscosidad, velocidad de reacción, peso molecular	Termómetros en las zonas de reacción
<i>Agitación</i>	Distribución tamaño de partícula de caucho	rpm
Variables del Devolatizador		
<i>Temperatura del fondo</i>	Determina % de residuales	Termómetros en las zonas de reacción
<i>Presión de Vacío</i>	Determina % de residuales	Manómetros
<i>% Sólidos</i>	Determina grado de pureza del polímero	Pérdida de peso a condiciones específicas de T y P.

Variables de Salida del proceso de producción de poliestireno de alto impacto.

Cuadro 8. Variables de salida del proceso de producción de poliestireno de alto impacto		
<i>Variable</i>	<i>Relevancia</i>	<i>Sistema de Medición</i>
Propiedades del Producto Final		
<i>Tamaño de partícula de caucho</i>	Determina resistencia al impacto y dureza	[SP 80 / Multisizer] Coulter Multisizer AccuComp ® Version 1.10 & Version 1.15
<i>Peso Molecular</i>	Afecta el MFR, viscosidad de la solución, el esfuerzo tensil y de flexión, tamaño de partícula	cromatografía de líquidos
<i>Vicat/°F</i>	Determina el rango de temperatura para usos del material	Termómetro / sensor de desplazamiento electrónico [ASTM 1525 – 96, Rate B]
<i>Tensile Rupture</i>	Determina límites de esfuerzo para aplicaciones finales	[ASTM D 638-96]
<i>% Elongación</i>	Define grado de deformación permisible para aplicaciones finales	[ASTM D 638-96]
<i>Estireno Residual (ppm)</i>	Restricciones en aplicaciones de empaques para alimentos	Cromatógrafo de gas / detector ionización de llama
<i>Izod</i>	Resistencia al impacto	[ASTM D 256-93A]
<i>MFR</i>	Determina grado de degradación del plástico por moldeo	Plastómetro [ASTM D 1238 – 95]

Anexo F. Caracterización y aplicaciones del poliestireno cristal y de alto impacto

Poliestireno de Propósito General

Dentro de las propiedades del Poliestireno Cristal se encuentran la transparencia, rigidez, dureza, alto grado de procesabilidad: moleo, extrusión, termo-formado y soplado, resistencia al agua y al calor, estabilidad dimensional, fácilmente coloreable y orientabilidad, entre otras.

Cuadro 9. Caracterización Poliestireno de Propósito General.

Propiedad	Unidades	Método de prueba	Valor
Índice de Fluidez (200 oC/ 5kg)	gr/10 min.	ASTM D - 1238	9.0 - 13.0
Punto de ablandamiento Vicat @ (1kg)	oC	ASTM D - 1525	89.5 min.
Impacto Izod	kJ/m ²	ISO 180/1A	---
Monómero Residual	ppm	GLC LAB PSG0004	500 max.

Entre las aplicaciones más importantes del producto se encuentran: bases para la industria alimenticia, farmacéutica y de cosméticos, cassettes, artículos del hogar, láminas transparentes para puertas de baño, difusores de luz, elementos decorativos y otros.(3)

Poliestireno de Alto impacto

Dentro de las propiedades finales del poliestireno de Alto Impacto están: la resistencia al impacto, resistencia mecánica, aislante eléctrico, estabilidad térmica, entre otros.

Cuadro 10. Caracterización Poliestireno de alto impacto.

Propiedad	Unidades	Método de prueba	Valor
Índice de Fluidez (200 oC/ 5kg)	gr/10 min.	ASTM D - 1238	3.5 - 5.5
Punto de ablandamiento Vicat @ (1kg)	°C	ASTM D - 1525	94 min.
Impacto Izod	kJ/m ²	ISO 180/1A	8.5 min.
Monómero Residual	ppm	GLC LAB PSG0004	500 max.

³ S.M. Mckelvey: "Polymer Processing", John Wiley & Sons 1963.

El Índice de Fluidez, (MFR), mide la velocidad de extrusión del poliestireno a través de un orificio a determinada temperatura y carga. Permite identificar el límite de temperatura que ocasiona la degradación del polímero durante el moldeo. El impacto Izod, mide la resistencia de un material al impacto y se define como la energía cinética requerida para iniciar y continuar la fractura hasta que el material se rompe. Es una medida de la dureza del material.

La temperatura de ablandamiento, Vicat, es la temperatura a la cual una aguja penetra una muestra de polímero a una profundidad de 1 mm. La temperatura medida refleja el punto de ablandamiento esperado cuando el material es utilizado en aplicaciones a alta temperatura.

Las aplicaciones del poliestireno de alto impacto incluyen los envases desechables y en general juguetes, zapatos, artículos del hogar, interiores de neveras, carcasas de electrodomésticos y otros. 4

Se llevó a cabo una revisión de las aplicaciones finales de cada producto para disolver poliestireno fuera de especificación de producto cristal en el poliestireno de alto impacto que conservara más similitud en las propiedades finales. En la tabla 5, se presentan las posibilidades de disolución de productos de poliestireno de propósito general en productos de alto impacto.

Tabla 5. Determinación de Propiedades Finales del Poliestireno			
PRODUCTOS	Índice de fluidez [gr/10min]	APLICACIONES	DISOLUCION
Poliestireno Cristal			
Producto 1	0.9-2	Extrusión y termoformado	
Producto 2	9-13	Moldabilidad	
Poliestireno Alto Impacto			
Producto A	5-7	Inyección	Producto 2
Producto B	2.1-3.5	Extrusión y termoformado	Producto 1
Producto C	0.9-1.3	Refrigeración	-
Producto D	2.5-4	Inyección	-
Producto E	1.4-2.4	Extrusión y termoformado	Producto 1
Producto F	3-4	Extrusión y termoformado	Producto 1

⁴ S. Middleman: "Introduction to Polymer Processing", Mac Graw Hill Book Co. 1978.

El análisis de las propiedades de cada tipo de poliestireno permitió identificar los criterios para la selección del poliestireno a disolver:

La aplicación final de cada poliestireno esta determinada por el índice de fluidez del producto, el cual depende fundamentalmente del peso molecular. Por tanto, el poliestireno cristal de bajo índice de fluidez deberá disolverse en productos de poliestireno de alto impacto con un índice de fluidez entre 1.4 – 4 gr/10min.

Productos de poliestireno de alto impacto con índices de fluidez inferiores a 1.3 gr/10min no podrán disolver poliestireno fuera de especificación dado el elevado porcentaje de caucho que contienen.

Anexo G. Viabilidad económica del proyecto

Determinación de los costos de producción

Los costos de producción de poliestireno se estimaron bajo la base de producción de 1 tonelada de producto. Estos costos incluyen como costos directos, las materias primas, utilidades, mano de obra, mantenimiento gastos de laboratorio y gastos por almacenamiento; los costos fijos corresponden al valor estimado para la depreciación e impuestos y los gastos generales corresponden a gastos administrativos. En la tabla 14 se presenta un resumen de los costos de producción por tonelada de producto. (5)

Tabla 14. Costos de Producción Poliestireno		
	% Costo total de producción	US\$/ton
COSTOS VARIABLES	96,2	\$ 689,0
<i>1. Materias primas</i>	87,2	\$ 612,0
Estireno	71,5	\$ 510,0
Otras materias Primas	15,7	102,0
<i>2. Mano de obra</i>	1,0	\$ 30,0
<i>3. Utilidades</i>	2,5	\$ 18,0
<i>4. Mantenimiento</i>	1,7	\$ 8,0
<i>5. Gastos de laboratorio</i>	0,1	\$ 1,0
<i>6. almacenamiento y empaque</i>	3,5	\$ 20,0
Almacenamiento producto terminado	2,8	\$ 15,0
Recibo materia prima	0,7	\$ 5,0
COSTOS FIJOS	3,8	\$ 22,0
Depreciación	2,1	\$ 12,0
Otros	1,7	\$ 10,0
GASTOS GENERALES	0,1	\$ 5,0
Administración	0,1	\$ 5,0
TOTAL COSTO DE PRODUCCION	100	\$ 716,0

A partir del costo de producción de poliestireno puede concluirse que la venta de producto fuera de especificación en el mercado genera una pérdida de aproximadamente US \$300/ton producto, mientras que su alimentación al proceso permite su venta como producto prime generándose una ganancia de aproximadamente US \$86/ton.

⁵ G.D. Ulrich. A Guide to Chemical Engineering Process Design and Economics. J. Wiley. New York. 1984.

Determinación de la Inversión total inicial

La estimación del capital de inversión para el montaje de un sistema de transporte neumático que permita alimentar poliestireno fuera de especificación al proceso de producción de poliestireno de alto impacto, se desarrolló a partir del método de estimación por porcentaje del costo de los equipos. (6)

El método considera la estimación de todos los costos directos de la planta como un porcentaje del costo de los equipos.

$$C_n = \sum (E + f_1 E + f_2 E + f_3 E + \dots + f_n E) = E \sum (f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n)$$

El costo de los equipos se realizó a partir de las capacidades y dimensiones calculadas para cada uno de los equipos y de la información suministrada por proveedores locales y a través de consultas en páginas de internet como la página www.matche.com

⁶ PETERS, M. TIMMERHAUS, K. Plant Design and Economics for Chemical engineers. Fifth Edition. p 249-258.

Tabla 15. Capital de Inversión para el Sistema de Transporte neumático		
	Fracción vlr equipos	Valor Calculado
Costos Directos		
Compra de Equipos	1	\$ 22.500
Entrega de equipos	0,1	\$ 2.250
Subtotal equipos entregados		\$ 24.750
Instalación de los equipos	0,45	\$ 11.138
Instrumentación y control (instalados)	0,18	\$ 4.455
Tubería (instalada)	0,16	\$ 3.960
Sistemas eléctricos (instalados)	0,1	\$ 2.475
Utilidades (instaladas)	0,4	\$ 9.900
Total Costos directos		\$ 31.928
Costos Indirectos		
Ingeniería y supervisión	0,3	\$ 7.425
Gastos de construcción	0,39	\$ 9.653
Gastos legales	0,04	\$ 990
Contingencia	0,35	\$ 8.663
Total Costos indirectos		\$ 26.730
Inversión de capital fijo		\$ 83.408
Capital de trabajo	0,7	\$ 17.325
Inversión total de capital		\$ 100.000

El capital de trabajo considera el valor de materias primas para un mes de suministro, los productos terminados y semi-terminados almacenados durante un mes de producción, y los salarios y costo de materias primas para el primer mes de producción.

La inversión de capital requerida para el montaje del sistema de transporte neumático asciende a US \$100.000.

Evaluación económica

Gastos de operación para el sistema de transporte neumático

Los costos de operación comprenden los costos de los operadores o mano de obra, mantenimiento, servicios industriales (utilities), cargo al proceso por administración de la empresa (overheads) y la depreciación de los equipos componentes del sistema. La estimación de los costos de operación (exceptuando mano de obra y depreciación) se hizo usando el método de los porcentajes.

El método asume para cada uno de los elementos enunciados un porcentaje de la inversión total, distribuidos como sigue:

Tabla 16. Gastos de operación del sistema de transporte neumático en la planta de producción de poliestireno	
Método de los Porcentajes	
COSTO ANUAL	FRACCION DE LA INVERSION TOTAL
Mano de Obra	--
Mantenimiento	0.03
Servicios Industriales	0.4
Administración	0.01
Depreciación	--

Mano de Obra

La operación del sistema de transporte neumático requiere un técnico. El sistema debe trabajar de manera continua 24 horas al día. Como se requieren tres turnos, el número total de operadores es tres. El salario de un técnico en el año 2004 es aproximadamente US\$1,000 incluidos los gastos por seguridad social. La suma total por salario es, entonces, US\$3,000.

Costo Total de mano de obra por año = US\$36,000

Mantenimiento, Servicios Industriales y Administración

A partir de la inversión total estimada para el sistema neumático, los gastos de operación se calculan de la siguiente manera:

Mantenimiento	= US \$100,000*0.03	= US \$3,000/año
Servicios Industriales	= US \$100,000*0.4	= US \$40,000/año
Administración	= US \$100,000*0.01	= US \$1,000/año

Depreciación

El valor de depreciación de los equipos se estimó asumiendo una vida de operación de 10 años y un valor de salvamento nulo. El cálculo fue corregido por el valor del dinero en el tiempo usando el

concepto de Valor Presente Neto, asumiendo una tasa de oportunidad (TIR) de 20% efectivo anual.

$$Inversión = Depreciación\ anual * \frac{A}{P}_{20\%,10}$$

Donde

$\frac{A}{P}_{20\%,10}$ es el Factor de Valor Presente Neto para Anualidades y se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{A}{P}_{20\%,10} = \frac{1 - (1 + TIR)^{-n}}{TIR}$$

donde n es el tiempo de salvamento.

Depreciación Anual = US\$23,852.3

El Costo Total de Operación del sistema de transporte neumático es de US\$103,852.3 por año.

Tabla 16. Gastos de operación para el sistema de transporte neumático en la planta de producción de poliestireno.	
	US\$/año
Mano de Obra	36,000
Mantenimiento	3,000
Servicios Industriales (utilities)	44,000
Administración (overheads)	1,000
Depreciación	23,852.3
TOTAL	103,852.3

EVALUACION FINANCIERA

A fin de evaluar financieramente la propuesta se han utilizado dos criterios económicos, el tiempo de pago de la inversión y la tasa de retorno de la inversión.

Tiempo de Pago de la Inversión

El Tiempo de Pago de la Inversión es el tiempo necesario para recuperar la inversión. Es el tiempo cuando los flujos de caja son iguales a cero.

$$CF = \text{Créditos} - \text{inversión de capital} - \text{gastos de operación} = 0$$

Entre más corto sea el tiempo de Pago de la Inversión, más atractivo es el proyecto. El Tiempo de Pago de la Inversión de un proyecto atractivo varía entre 2 y 5 años.

Es evidente para el proyecto propuesto, el Tiempo de Pago de la Inversión es inferior a un año, pues el beneficio en el primer año (US\$602,437.50) supera ampliamente el capital invertido y los gastos de operación. El Tiempo de Pago de la Inversión es de 2.4 meses.

Anexo H. Modelo matemático que define el sistema de atmósfera inerte

Se presenta a continuación la nomenclatura que se utilizó para escribir el modelo matemático que describe el sistema de atmósfera inerte en tanques de almacenamiento de líquidos orgánicos volátiles.

BALANCE DE MASA PARA EL TANQUE

F_{N_2} = Flujo másico de nitrógeno que entra al tanque por la válvula solenoide

F_{AIR} = Flujo másico de aire que ingresa al tanque por el aspirador

F_V = Flujo másico de gas que sale por el venteo

F_{STYR} = Flujo másico de vapor de estireno que cambia de fase líquida a gaseosa

dm_T/dt = Variación de la masa de gas al interior del tanque con el tiempo

V = Volumen ocupado por el gas en el tanque

R = constante de los gases ideales

T = Temperatura del gas contenido en el tanque

M_G = Peso molecular promedio del gas contenido en el tanque

P = Presión del gas al interior del tanque

Q_L = Flujo de calor proveniente de los alrededores que recibe la sección del tanque ocupada por el líquido

m_{LSTYR} = Masa de estireno que se encuentra en fase líquida dentro del tanque

T_{oo} = Temperatura externa del tanque

T = Temperatura del gas contenido en el tanque que es igual a la del líquido

C_{pLSTYR} = Capacidad calorífica del estireno en fase líquida

ΔH_{VSTYR} = Calor Latente de vaporización del estireno a presión atmosférica

D = diámetro del tanque

h = nivel del estireno en fase líquida

ρ_{LSTYR} = densidad del estireno en fase líquida

V_L = Volumen de ocupado por el estireno en fase líquida

A = Área de la base del tanque

k = conductividad térmica del material que está hecho el tanque

BALANCE DE ENERGÍA PARA EL GAS

Además de la anteriores...

Q_G = Flujo de calor de los alrededores hacia el tanque para la zona ocupada por el gas

C_{pG} = Capacidad calorífica del gas contenido en el tanque

H_{N_2} = Entalpía asociada al nitrógeno

C_{pN_2} = Capacidad calorífica del nitrógeno

H_{AIR} = Entalpía asociada al aire

C_{pAIR} = Capacidad calorífica del aire

H_v = Entalpía asociada al gas que sale por el venteo

C_{pv} = Capacidad calorífica del gas que sale por el venteo

BALANCE DE MASA PARA EL O₂

Además de las anteriores...

C_{O_2AIR} = Concentración de oxígeno que entra en al aire del aspirador

C_{O_2V} = Concentración de oxígeno que sale con el gas del venteo

SUBÍNDICES

Todas las variables que tienen como subíndice un cero "0" son valores de estado estacionario.

SUPERÍNDICES

Todas las variables que tienen como superíndice una "P" son variables de perturbación.

NOTA: Las "x" son agrupaciones de constantes que permiten simplificar el tratamiento de las ecuaciones y las "G" son las funciones de transferencia.

Balance de masa para el tanque

$$F_{N_2} + F_{AIR} - F_v + F_{STYR} = \frac{dm_T}{dt}; \quad PV = nRT = \frac{M}{T_1} RT \Rightarrow \frac{PVT_1}{RT} = m$$

Si se asume que no hay cambios en la temperatura del líquido durante el almacenamiento:

$$F_{N_2} + F_{AIR} - F_v = \frac{VT_1 G}{RT} \frac{dP}{dt}$$

Si se tiene en cuenta la Temperatura: PT^{-1}

$$F_{N_2} + F_{AIR} - F_v + F_{STYR} = \frac{VT_1 G}{R} \frac{d}{dt} \left(\frac{P}{T} \right) = \frac{VT_1}{RT_0} \left(\frac{dP}{dt} - \frac{P_0}{T_0} \frac{dT}{dt} \right)$$

$$P_{V_{STYR}} = a + \frac{b}{(C+T)}; \quad n_{STYR} = \frac{P_{V_{STYR}}V}{RT}, \quad m_{STYR} = n_{STYR}T_{1_{STYR}}$$

$$\frac{Q'_L - m_{LSTYR}(T_2 - T_1)}{\Delta H_{VSTYR}} = F_{STYR}$$

Balace de energía para el gas

$$Q'_G + \Delta H_{VSTYR}F_{STYR} + F_{N_2}H_{N_2} + F_{AIR}H_{AIR} - F_VH_V = C_P \frac{d(m_T)}{dt} = C_P \frac{d}{dt} \left(\frac{PVT_1}{RT} T \right) = C_P VT_1 \frac{dP}{dt}$$

Balace de la concentración de oxígeno

$$F_{AIR}C_{O_2AIR} - F_V C_{O_2V} = \frac{d(m_T C_{O_2})}{dt}$$

$$\frac{VT_1}{R} \left(\frac{P}{T} \right) = \frac{VT_1 P_0}{RT_0} + \frac{VT_1}{RT_0} (P - P_0) - \frac{VT_1 P_0}{RT_0^2} (T - T_0)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{P}{T} \right) = \frac{VT_1}{RT_0} \frac{dP^P}{dt} - \frac{VT_1 P_0}{RT_0^2} \frac{dT^P}{dt}$$

$$\frac{VT_1}{R} \left(\frac{PC_{O_2}}{T} \right) = \frac{VT_1 P_0 C_{O_20}}{RT_0} + \frac{VT_1 C_{O_20}}{RT_0} (P - P_0) - \frac{VT_1 P_0 C_{O_20}}{RT_0^2} (T - T_0) + \frac{VT_1 P_0}{RT_0} (C_{O_2} - C_{O_20})$$

$$= \frac{VT_1 C_{O_20}}{RT_0} \frac{dP^P}{dt} - \frac{VT_1 P_0 C_{O_20}}{RT_0^2} \frac{dT^P}{dt} + \frac{VT_1 P_0}{RT_0} \frac{dC_{O_2}^P}{dt}$$

La diferencial = $S^*(Var) - Var_0$ $Var_0 = 0$ por que es dependiente

$$L_{VAR} = Var(S)$$

Balace de masa para el tanque

$$F_{N_2} + F_{AIR} - F_V + F_{STYR} = \frac{VT_1}{RT_0} \left(\frac{dP^P}{dt} - \frac{P_0}{T_0} \frac{dT^P}{dt} \right); \quad F_{STYR} = \frac{Q'_L - M_{LSTYR} C_{PLSTYR} T}{\Delta H_{VSTYR}}$$

$$Q'_L = KA(T_\infty - T) = K \left(\frac{pD^2}{4} + pDh \right) (T_\infty - T) = \left(K \frac{pD^2}{4} + \frac{KpDh}{4} \right) (T_\infty - T)$$

$$= K \frac{pD^2}{4} T_\infty + K \frac{pDhT_\infty}{4} - K \frac{pD^2}{4} T - K \frac{pDhT}{4}$$

$$hT = h_0T_0 + h_0(T - T_0) + T_0(h - h_0)$$

$$\dot{Q}_{Li} = K \frac{pD^2T_\infty}{4} + K \frac{pDhT_\infty}{4} - K \frac{pD^2T_\infty}{4} - K \frac{pDh_0T_0}{4} + K \frac{pDh_0T^P}{4} + K \frac{pDT_0h^P}{4}$$

$$\begin{aligned} M_{LSTYR} C_{PLSTYR} T &= \mathbf{r}_{LSTYR} V_L C_{PLSTYR} T = \mathbf{r}_{LSTYR} A h C_{PLSTYR} T \\ &= \mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} h_0 T_0 + \mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} h_0 T^P + \mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} T_0 h^P \end{aligned}$$

$$F_{N2}^P = F_{N2} - F_{N2O} \Rightarrow F_{N2} = F_{N2}^P + F_{N2O}$$

$$F_{N2} + F_{AIR} - F_V + \frac{Q_L}{\Delta H_{VSTYR}} - \frac{M_{LSTYR} C_{PLSTYR} T}{\Delta H_{VSTYR}} = \frac{VT1}{RT_0} \left(\frac{dP^P}{dt} - \frac{P_0}{T_0} \frac{dT^P}{dt} \right)$$

$$\begin{aligned} F_{N2} + F_{AIR} - F_V + \frac{KpD^2T_\infty}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpDhT_\infty}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{KpD^2T}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{KpDh_0T_0}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpDh_0T^P}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpDT_0h^P}{4\Delta H_{VSTYR}} \\ - \frac{\mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} h_0 T_0}{\Delta H_{VSTYR}} - \frac{\mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} h_0 T^P}{\Delta H_{VSTYR}} - \frac{\mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} T_0 h^P}{\Delta H_{VSTYR}} = \frac{VT1}{RT_0} \left(\frac{dP^P}{dt} - \frac{P_0}{T_0} \frac{dT^P}{dt} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{N2}^P + F_{N2O} + F_{AIR}^P + F_{AIRO} - F_V^P - F_{V0} + \frac{KpD^2T_\infty}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpDT_\infty h^P}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpDT_\infty h_0}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{KpD^2T^P}{4\Delta H_{VSTYR}} \\ - \frac{KpD^2T_0}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{KpDh_0T_0}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpDh_0T^P}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpDT_0h^P}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{\mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} h_0 T_0}{\Delta H_{VSTYR}} - \frac{\mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} h_0 T^P}{\Delta H_{VSTYR}} \\ - \frac{\mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} T_0 h^P}{\Delta H_{VSTYR}} = \frac{VT1}{RT_0} \left(\frac{dP^P}{dt} - \frac{P_0}{T_0} \frac{dT^P}{dt} \right) \end{aligned}$$

Haciendo los términos del estado estacionario iguales a cero, tenemos:

$$\begin{aligned} F_{N2}^P + F_{AIR}^P - F_V^P + \frac{KpDT_\infty h^P}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{KpD^2T^P}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpDh_0T^P}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpDT_0h^P}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{\mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} h_0 T^P}{\Delta H_{VSTYR}} \\ - \frac{\mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} T_0 h^P}{\Delta H_{VSTYR}} = \frac{VT1}{RT_0} \left(\frac{dP^P}{dt} - \frac{P_0}{T_0} \frac{dT^P}{dt} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{N2}^P + F_{AIR}^P - F_V^P + \left(\frac{KpDT_\infty}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpDT_0}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{\mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} T_0}{\Delta H_{VSTYR}} \right) h^P + \left(\frac{KpDh_0}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{KpD^2}{4\Delta H_{VSTYR}} \right. \\ \left. - \frac{\mathbf{r}_{LSTYR} A C_{PLSTYR} h_0}{\Delta H_{VSTYR}} \right) T^P = \frac{VT1}{RT_0} \left(\frac{dP^P}{dt} - \frac{p_0}{T_0} \frac{dT^P}{dt} \right) \end{aligned}$$

Balace de energía para el gas

$$\dot{Q}_G + \Delta H_{VSTYR} F_{STYR} + F_{N_2} H_{N_2} + F_{AIR} H_{AIR} - F_V H_V = C_{PG} VT_0 \frac{de}{dt}$$

$$\dot{Q}_G = KA(T_\infty - T)$$

$$\dot{Q}_G = k \left(\frac{pD^2}{4} + pD(H-h) \right) (T_\infty - T) \quad h_T = h_0 T_0 + h_0 (T - T_0) + T_0 (h - h_0)$$

$$= \left(\frac{KpD^2}{4} + \frac{KpDH}{4} - \frac{KpDh}{4} \right) (T_\infty - T)$$

$$= \frac{KpD^2 T_\infty}{4} + \frac{KpDHT_\infty}{4} - \frac{KpDhT_\infty}{4} - \frac{KpD^2 T}{4} - \frac{KpDHT}{4} + \frac{KpDhT}{4}$$

$$= \frac{KpD^2 T_\infty}{4} + \frac{KpDHT_\infty}{4} - \frac{KpDhT_\infty}{4} - \frac{KpD^2 T}{4} - \frac{KpDHT}{4} + \frac{KpDh_0 T_0}{4} + \frac{KpDh_0 T^P}{4} + \frac{KpDT_0 h^P}{4}$$

$$\Delta H_{VSTYR} F_{STYR} = \Delta H_{STYR} \left(\frac{Q_L}{\Delta H_{VSTYR}} - \frac{M_{LSTYR} C_{PLSTYR} T}{\Delta H_{VSTYR}} \right)$$

$$= \frac{KpD^2 T_\infty}{4} + \frac{KpDhT_\infty}{4} - \frac{KpD^2 T}{4} - \frac{KpDh_0 T_0}{4} + \frac{KpDh_0 T^P}{4} + \frac{KpDT_0 h^P}{4}$$

$$m_{LSTYR} C_{PLSTYR} T = \mathbf{r}_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_0 T_0 + \mathbf{r}_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_0 T^P + \mathbf{r}_{LSTYR} C_{PLSTYR} T_0 h^P$$

$$F_{N_2} H_{N_2} = F_{N_2} F_{N_2} C_{PN_2} T$$

$$= F_{N_2}^2 C_{PN_2} T$$

$$= C_{PN_2} (F_{N_{20}}^2 T_0 + 2T_0 F_{N_{20}} (F_{N_2} - F_{N_{20}}) + F_{N_{20}} (T - T_0))$$

$$T^P = T - T_0 \quad T^P + T_0 = T$$

$$F_{AIR} H_{AIR} = C_{PAIR} (F_{AIRO}^2 T_0 + 2T_0 F_{AIRO} (F_{AIR} - F_{AIRO}) + F_{AIRO}^2 (T - T_0))$$

$$F_V H_V = C_{PG} (F_{VO}^2 T_0 + 2T_0 F_{VO} (F_V - F_{VO}) + F_{VO}^2 (T - T_0))$$

$$\begin{aligned}
& \frac{KpD^2T_\infty}{4} + \frac{KpDHT_\infty}{4} - \frac{KpDT_\infty h^P}{4} - \frac{KpDT_\infty h_0}{4} - \frac{KpD^2T^P}{4} - \frac{KpD^2T_0}{4} - \frac{KpDHT^P}{4} \\
& - \frac{KpDHT_0}{4} + \frac{KpDh_0T_0}{4} + \frac{KpDh_0T^P}{4} + \frac{KpDT_0h^P}{4} + \frac{KpD^2T_\infty}{4} + \frac{KpDT_\infty h^P}{4} + \frac{KpDT_\infty h_0}{4} \\
& - \frac{KpD^2T^P}{4} - \frac{KpD^2T_0}{4} \\
& - \frac{KpDT_0h_0}{4} + \frac{KpDh_0T^P}{4} + \frac{KpDT_0h^P}{4} + \mathbf{r}_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_0 T_0 - \mathbf{r}_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_0 T^P \\
& - \mathbf{r}_{LSTYR} AC_{PLSTYR} T_0 h^P + C_{PN2} F_{N20}^2 T_0 + 2C_{PN2} T_0 F_{N20} F_{N^P2} + C_{PN2} F_{N20}^2 T^P + C_{PAIR} F_{AIRO}^2 T_0 \\
& + 2C_{PAIR} T_0 F_{AIRO} F_{FAIR}^P + C_{PAIR} F_{AIRO}^2 T^P - C_{PG} F_{VO}^2 T_0 - 2C_{PG} T_0 F_{V0} F_{VP} - C_{PG} F_{VO}^2 T^P \\
& = C_{PG} VT1_G \frac{dP^P}{dt}
\end{aligned}$$

Eliminando los términos del estado estacionario

$$\begin{aligned}
& - \frac{KpD^2T^P}{2} - \frac{KpDHT^P}{4} + \frac{KpDh_0T^P}{2} + \frac{KpDT_0h^P}{2} - \frac{KpD^2T^P}{2} + \frac{KpDh_0T^P}{2} + \frac{KpDT_0h^P}{2} \\
& - \mathbf{r}_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_0 T^P - \mathbf{r}_{LSTYR} AC_{PLSTYR} T_0 h^P + 2C_{PN2} T_0 F_{N20} F_{N2}^P + C_{PN2} F_{N20}^2 T^P \\
& + 2C_{PAIR} T_0 F_{AIRO} F_{AIR}^P + C_{PAIR} F_{AIRO}^2 T^P - 2C_{PG} T_0 F_{V0} F_V^P - C_{PG} F_{V0}^2 T^P = C_{PG} VT1_G \frac{dP^P}{dt}
\end{aligned}$$

Ecuación de presión

Balace de la concentración de oxígeno

$$\begin{aligned}
F_{AIR} C_{O2AIR} - F_V C_{O2V} &= \frac{VT1}{RT_0} \left(C_{O20} \frac{dP^P}{dt} - \frac{P_0 C_{O20}}{T_0} \frac{dT^P}{dT} + P_0 \frac{dC_{O2}^P}{dt} \right) \\
F_{AIR} C_{O2AIR} &= F_{AIRO} C_{O2AIRO} + C_{O2AIRO} (F_{AIR} - F_{AIRO}) + F_{AIRO} (C_{O2AIR} - C_{O2AIRO}) \\
F_V C_{O2V} &= F_{VO} C_{O2V0} + C_{O2V0} (F_V - F_{VO}) + F_{VO} (C_{O2V} - C_{O2V0}) \\
F_{AIRO} C_{O2AIRO} + C_{O2AIRO} F_{AIR}^P + F_{AIRO} C_{O2AIR}^P - F_{VO} C_{O2V0} - C_{O2V0} F_V^P - F_{VO} C_{O2V}^P \\
&= \frac{VT1}{RT_0} \left(C_{O20} \frac{dP^P}{dt} - \frac{P_0 C_{O20}}{T_0} \frac{dT^P}{dT} + P_0 \frac{dC_{O2}^P}{dT} \right)
\end{aligned}$$

Se eliminan nuevamente los términos en estado estacionario:

$$C_{O_2AIR_0} F_{AIR}^P + F_{AIR_0} C_{O_2AIR}^P - C_{O_2VO} F_V^P - F_{VO} C_{O_2V}^P = \frac{VT_1}{RT_0} \left(C_{O_2} \frac{dP^P}{dt} - \frac{P_0 C_{O_20}}{T_0} \frac{dT^P}{dt} + P_0 \frac{dC_{O_2}^P}{dt} \right)$$

Ecuación de Temperatura

Reemplazando el balance de energía en el balance de masa para el gas:

$$\begin{aligned} & F_{N_2}^P + F_{AIR}^P - F_V^P + \left(\frac{KpDT^\infty}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpDT_0}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} T_0}{\Delta H_{VSTYR}} \right) h^P \\ & + \left(\frac{KpDh_0}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{KpD^2}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_0}{\Delta H_{VSTYR}} \right) T^P = \frac{VT_1 G}{RT_0} \left(-\frac{KpD^2 T^P}{2C_{PG} VT_1 G} - \frac{KpDH T^P}{4C_{PG} VT_1 G} + \frac{KpDh_0 T^P}{2C_{PG} VT_1 G} \right. \\ & + \frac{KpDT_0 h^P}{2C_{PG} VT_1 G} - \frac{KpD^2 T^P}{2C_{PG} VT_1 G} + \frac{KpDh_0 T^P}{2C_{PG} VT_1 G} + \frac{KpDT_0 h^P}{2C_{PG} VT_1 G} - \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_0 T^P}{C_{PG} VT_1 G} \\ & - \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} T_0 h^P}{C_{PG} VT_1 G} + \frac{2C_{PN2} T_0 F_{N20} F_{N2}^P}{C_{PG} VT_1 G} + \frac{C_{PN2} F_{N20}^2 T^P}{C_{PG} VT_1 G} + \frac{2C_{PAIR} T_0 F_{AIRO} F_{AIR}^P}{C_{PG} VT_1 G} \\ & \left. + \frac{C_{PAIR} F_{AIRO}^2 T^P}{C_{PG} VT_1 G} - \frac{2C_{PG} T_0 F_{VO} F_V^P}{C_{PG} VT_1 G} - \frac{C_{PG} F_{VO}^2 T^P}{C_{PG} VT_1 G} - \frac{P_0}{T_0} \frac{dT^P}{dt} \right) \\ & \frac{VT_1 G P_0}{RT_0^2} \frac{dT^P}{dt} = \left(\frac{2C_{PN2} T_0 F_{N20}}{C_{PG} VT_1 G} - 1 \right) F_{N_2}^P + \left(\frac{2C_{PAIR} T_0 F_{AIRO}}{C_{PG} VT_1 G} - 1 \right) F_{AIR}^P + \left(1 - \frac{2T_0 F_{VO}}{VT_1 G} \right) F_V^P \\ & + \left(\frac{VT_1 G KpDT_0}{RT_0 C_{PG} VT_1 G} - \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} T_0 VT_1 G}{C_{PG} VT_1 G RT_0} - \frac{KpDT^\infty}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{KpDT_0}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} T_0}{\Delta H_{VSTYR}} \right) h^P \\ & - \frac{KpD^2}{C_{PG} VT_1 G} \frac{VT_1 G}{RT_0} - \frac{KpDH}{4C_{PG} VT_1 G} \frac{VT_1 G}{RT_0} + \frac{KpDh_0}{2C_{PG} VT_1 G} \frac{VT_1 G}{RT_0} + \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_0}{C_{PG} VT_1 G} \frac{VT_1 G}{RT_0} \\ & + \frac{C_{PN2} F_{N20}^2}{C_{PG} VT_1 G} \frac{VT_1 G}{RT_0} + \frac{C_{PAIR} F_{AIRO}^2}{C_{PG} VT_1 G} \frac{VT_1 G}{RT_0} - \frac{F_{VO}^2}{VT_1 G} \frac{VT_1 G}{RT_0} - \frac{F_{VO}^2}{VT_1 G} \frac{VT_1 G}{RT_0} - \frac{KpDh_0}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpD^2}{4\Delta H_{VSTYR}} \\ & + \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_0}{\Delta H_{VSTYR}} T^P \\ & \frac{VT_1 G P_0}{RT_0} \frac{dT^r}{dt} = \left(\frac{2C_{PN2} T_0 F_{N20}}{C_{PG} VP_1 G} - 1 \right) F_{N_2}^r + \left(\frac{2C_{PAIR} T_0 F_{AIRO}}{C_{PG} VT_1 G} - 1 \right) + \left(1 - \frac{2T_0 F_{VO}}{VT_1 G} \right) F_V^P \end{aligned}$$

$$+ \left(\frac{KpD}{C_{PG}} - \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR}}{C_{PG} R} - \frac{KpDT_{\infty}}{4\Delta H_{VSTYR}} - \frac{KpDT_O}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} T_O}{\Delta H_{VSTYR}} \right) h^r$$

$$+ \left[\begin{array}{l} -\frac{KpD^2}{C_{PG} RT_O} - \frac{KpDH}{4C_{PG} RT_O} + \frac{KpDh_o}{2C_{PG} RT_O} - \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_o}{C_{PG} R} + \frac{C_{PN2} F_{N20}^2}{C_{PG} RT_O} + \frac{C_{PAIR} F_{AIRO}^2}{C_{PG} RT_O} \\ -\frac{F_{Vo}^2}{RT_O} - \frac{KpDh_o}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{KpO^2}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_o}{\Delta H_{VSTYR}} \end{array} \right] T^r$$

Ecuación de Presión

$$C_{PG} VM_G \frac{dr^r}{dt} = C_{PN2} T_O F_{N20} F_{N2}^r + 2C_{PAIR} T_O F_{AIRO} F_{AIR}^r - 2C_{PG} T_O F_{VO} F_V^r +$$

$$(KpDT_O - r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} T_O) h^r + \left(-KpD^2 - \frac{KpDH}{4} + KpDh_o - r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_o + C_{PN2} F_{N20}^2 \right.$$

$$\left. + C_{PAIR} F_{AIRO}^2 - C_{PG} F_{Vo}^2 \right) T^p$$

Ecuación de la Concentración de O2

$$C_{O2AIR0} F_{AIR}^p + F_{AIRO} C_{O2AIR}^p + C_{O2Vo} F_V^p - F_{Vo} C_{O2V}^p =$$

$$\frac{VT1}{RT_O} \left[\frac{C_{O20} RT_O^2}{VT1_G r_0} \left[\frac{2C_{PN2} T_O F_{N20}}{C_{PG} VT1_G} F_{N2}^p + \frac{2C_{PAIR} T_O F_{AIRO}}{C_{PG} VT1_G} F_{AIR}^r - \frac{2C_{PG} T_O F_{Vo}}{C_{PG} VT1_G} F_V^r \right. \right.$$

$$\left. + \left(\frac{KpDT_O - r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} T_O}{C_{PG} VT1_G} \right) h^p + \left(-\frac{KpD^2}{C_{PG} VT1_G} - \frac{KpDH}{4C_{PG} VT1_G} + \frac{KpDh_o}{C_{PG} VT1_G} - \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_o}{C_{PG} VT1_G} \right. \right.$$

$$\left. + \frac{C_{PN2} T_O F_{N20}}{C_{PG} VT1_G} F_{N2}^p + \frac{2C_{PAIR} T_O F_{AIRO}}{C_{PG} VT1_G} F_{AIR}^r - \frac{2C_{PG} T_O F_{Vo}}{C_{PG} VT1_G} F_V^r \right] - \frac{P_O C_{O20}}{C_{PG} VT1_G} \left[\left(\frac{2C_{PN2} T_O F_{N20}}{C_{PG} VT1_G} - 1 \right) \frac{RT_O^2}{C_{PG} VT1_G} F_{N2}^p \right.$$

$$\left. + \frac{RT_O^2}{VT1_G r_0} \left(\frac{2C_{PAIR} T_O F_{AIRO}}{C_{PG} VT1_G} - 1 \right) F_{AIR}^p + \frac{RT_O^2}{VT1_G r_0} \left(1 - \frac{2T_O F_{Vo}}{VT1_G} \right) F_V^p + \frac{RT_O^2}{VT1_G r_0} \left(\frac{KpD}{C_{PG}} - \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR}}{C_{PG} R} \right. \right.$$

$$\left. - \frac{KpDT_{\infty}}{4\Delta H_{VSTYR}} \right]$$

$$\frac{KpDT_O}{4\Delta H_{VSTYR}} + \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} T_O}{4\Delta H_{VSTYR}} \left. \right) h^p + \left(-\frac{KpD^2}{C_{PG} RT_O} - \frac{KpDH}{4C_{PG} RT_O} + \frac{KpDh_o}{2C_{PG} RT_O} - \frac{r_{LSTYR} AC_{PLSTYR} h_o}{2C_{PG} RT_O} + \frac{C_{PN2} F_{N20}^2}{C_{PG} RT_O} \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{C_{PAIR} F_{AIRO}^2}{C_{PG} R T_O} - \frac{F_{VO}^2}{R T_O} - \frac{Kp D h_O}{4 \Delta H_{VSTYR}} + \frac{Kp D^2}{4 \Delta H_{VSTYR}} + \frac{r_{LSTYR} A C_{PLSTYR} h_O}{\Delta H_{VSTYR}} + \mathbf{r}] + \mathbf{r}_O \frac{dC_{O_2}^P}{dt} \} \\
& \left[- \frac{2C_{O_{20}} C_{PN_2} T_o^2 F_{N_{20}}}{VT1_{GR} C_{PG} P_O} + \frac{C_{O_{20}}}{C_{PG} VT1_G} \left(\frac{2C_{PN_2} T_o F_{N_{20}}}{P_O C_{PG} VT1_G} - 1 \right) \right] F_{N_2}^P + \left[C_{O_2 AIRO} - \frac{2C_{O_{20}} C_{PAIR} F_{AIRO} T_o^2}{P_O C_{PG} VT1_G} \right. \\
& \left. - \frac{C_{O_{20}}}{C_{PG} VT1_G} \left(\frac{2C_{PAIR} T_o F_{AIRO}}{C_{PG} VT1_G} - 1 \right) \right] F_{FAIR}^P + \left[-C_{O_2 V_o} + \frac{2C_{O_{20}} F_{VO} T_o^2}{P_O VT1_G} - \frac{C_{O_{20}}}{C_{PG} VT1_G} \left(1 - \frac{2T_o F_{VO}}{VT1_G} \right) \right] F_V^P \\
& + \left[- \frac{C_{O_{20}} T_o}{P_O} \left(\frac{Kp D T_o - D_{LS} A C_{PS} T_o}{C_{PG} VT1_G} \right) - \frac{C_{O_{20}}}{C_{PG} VT1_G} \left(\frac{Kp D}{C_{PG}} - \frac{r_{LS} A C_{PLS}}{C_{PGR}} - \frac{Kp D T_o}{4 \Delta H_{VS}} - \frac{Kp D T_o}{4 \Delta H_{VS}} + \frac{r_{LS} A C_{PLS} T_o}{\Delta H_{VS}} \right) \right] h^P \\
& \left[+ \frac{C_{O_{20}} Kp D^2 T_o}{P_O C_{PG} VT1_G} + \frac{C_{O_{20}} Kp D H T_o}{4 P_O C_{PG} VT1_G} - \frac{C_{O_{20}} Kp D h_o T_o}{P_O C_{PG} VT1_G} + \frac{C_{O_{20}} r_{LS} A C_{PLS} h_o T_o}{P_O C_{PG} VT1_G} - \frac{C_{O_{20}} C_{PN_2} F_{N_2}^2 T_o}{P_O C_{PG} VT1_G} - \frac{C_{O_{20}} C_{PAIR} F_{AIRO}^2 T_o}{P_O C_{PG} VT1_G} \right. \\
& + \frac{C_{O_{20}} F_{VO}^2 T_o}{P_O VT1_G} + \frac{P_O C_{O_{20}} Kp P^2}{R^2 T^3 C_{PG}^2} + \frac{P_O C_{O_{20}} Kp D H}{4 R^2 T^3 C_{PG}^2} - \frac{P_O C_{O_{20}} Kp D h_o}{2 R^2 T^3 C_{PG}^2} + \frac{P_O C_{O_{20}} r_{LS} A C_{PLS} h_o}{R^2 T^3 C_{PG}^2} - \frac{P_O C_{O_{20}} C_{PN_2} F_{N_2}^2}{R^2 T^3 C_{PG}^2} \\
& \left. - \frac{P_O C_{O_{20}} C_{PAIR} F_{AIRO}^2}{R^2 T^3 C_{PG}^2} + \frac{P_O C_{O_{20}} F_{VO}^2}{R^2 T^3 C_{PG}^2} \right]
\end{aligned}$$

Ecuación de Temperatura

$$\frac{dT^P}{dt} = \mathbf{a}_1 F_{N_2}^P + \mathbf{a}_2 F_{AIR}^P + \mathbf{a}_3 F_V^P + \mathbf{a}_4 h^P + \mathbf{a}_5 T^P$$

Ecuación De Presión

$$\frac{dp^P}{dt} = \mathbf{a}_6 F_{N_2}^P + \mathbf{a}_7 F_{AIR}^P + \mathbf{a}_8 F_V^P + \mathbf{a}_9 h^P + \mathbf{a}_{10} T^P$$

Ecuación de (O2)

$$\frac{dC_{O_2}^P}{dt} = \mathbf{a}_{11} F_{N_2}^P + \mathbf{a}_{12} F_{AIR}^P + \mathbf{a}_{13} F_V^P + \mathbf{a}_{14} h^P + \mathbf{a}_{15} T^P + \mathbf{a}_{16} C_{O_2 AIR}^P + \mathbf{a}_{17} C_{O_2 V}^P$$

Aplicando transformada de Laplace:

Ecuación de Temperatura

$$ST(s) = \mathbf{a}_1 F_{N_2}(s) + \mathbf{a}_2 F_{AIR}(s) + \mathbf{a}_3 F_V(s) + \mathbf{a}_4 h(s) + \mathbf{a}_5 T(s)$$

$$ST(s) - \mathbf{a}_5 T(s) = \mathbf{a}_3 F_V(s)$$

$$T(s)(S - \mathbf{a}_5) = \mathbf{a}_3 F_V(s)$$

$$\frac{T(s)}{F_V(s)} = \frac{\mathbf{a}_3}{S - \mathbf{a}_5}$$

Ecuación de Presión

$$SP(S) = \mathbf{a}_6 F_{N_2}(s) + \mathbf{a}_7 F_{AIR}(s) + \mathbf{a}_8 F_V(s) + \mathbf{a}_9 h(s) + \mathbf{a}_{10} T(s)$$

$$SP(S) = \mathbf{a}_8 F_V(s) \quad SP(S) = \mathbf{a}_6 F_{N_2}(s)$$

$$\frac{P(s)}{F_V(s)} = \frac{\mathbf{a}_8}{S} \quad \frac{P(s)}{F_{N_2}(s)} = \frac{\mathbf{a}_6}{S}$$

Ecuación De (O2)

$$S_{CO_2}(S) = \mathbf{a}_{11} F_{N_2}(s) + \mathbf{a}_{12} F_{AIR}(s) + \mathbf{a}_{13} F_V(s) + \mathbf{a}_{14} h(s) + \mathbf{a}_{15} T(s) + \mathbf{a}_{16} C_{O_2AIR}(s) + \mathbf{a}_{17} C_{O_2V}(s)$$

$$S_{CO_2}(S) = \mathbf{a}_{12} F_{AIR}(s) \quad S_{CO_2}(S) = \mathbf{a}_{13} F_V(s)$$

$$\frac{C_{O_2}(s)}{F_{AIR}(s)} = \frac{\mathbf{a}_{12}}{S} \quad \frac{C_{O_2}(s)}{F_V(S)} = \frac{\mathbf{a}_{13}}{S}$$

En el plano de Laplace

$$ST(s) = \mathbf{a}_1 F_{N_2}(s) + \mathbf{a}_2 F_{AIR}(s) + \mathbf{a}_3 F_V(s) + \mathbf{a}_4 h(s) + \mathbf{a}_5 T(s)$$

$$SP(s) = \mathbf{a}_6 F_{N_2}(s) + \mathbf{a}_7 F_{AIR}(s) + \mathbf{a}_8 F_V(s) + \mathbf{a}_9 h(s) + \mathbf{a}_{10} T(s)$$

$$SC_{O_2}(s) = \mathbf{a}_{11} F_{N_2}(s) + \mathbf{a}_{12} F_{AIR}(s) + \mathbf{a}_{13} F_V(s) + \mathbf{a}_{14} h(s) + \mathbf{a}_{15} T(s) + \mathbf{a}_{16} C_{O_2AIR}(s) + \mathbf{a}_{17} C_{O_2V}(s)$$

Sustituyendo Y simplificando

$$(S - \mathbf{a}_5)T(s) = \mathbf{a}_1 F_{N_2}(s) + \mathbf{a}_2 F_{AIR}(s) + \mathbf{a}_3 F_V(s) + \mathbf{a}_4 h(s)$$

$$SP(s) = \mathbf{a}_6 F_{N_2}(s) + \mathbf{a}_7 F_{AIR}(s) + \mathbf{a}_8 F_V(s) + \mathbf{a}_9 h(s) + \mathbf{a}_{10} \left(\frac{\mathbf{a}_1 F_{N_2}(s) + \mathbf{a}_2 F_{AIR}(s) + \mathbf{a}_3 F_V(s) + \mathbf{a}_4 h(s)}{S - \mathbf{a}_5} \right)$$

$$SP(s) = \frac{\mathbf{a}_6 + \mathbf{a}_{10}\mathbf{a}_1}{S - \mathbf{a}_5} F_{N_2}(s) + \frac{\mathbf{a}_7 + \mathbf{a}_{10}\mathbf{a}_2}{S - \mathbf{a}_5} F_{AIR}(s) + \frac{\mathbf{a}_8 + \mathbf{a}_{10}\mathbf{a}_3}{S - \mathbf{a}_5} F_V(s) + \frac{\mathbf{a}_9 + \mathbf{a}_{10}\mathbf{a}_4}{S - \mathbf{a}_5} h(s)$$

$$SC_{O_2}(s) = \mathbf{a}_{11}F_{N_2}(s) + \mathbf{a}_{11}F_{AIR}(s) + \mathbf{a}_{13}F_V(s) + \mathbf{a}_{14}h(s) + \mathbf{a}_{15}\left(\frac{\mathbf{a}_1F_{N_2}(s) + \mathbf{a}_2F_{AIR}(s) + \mathbf{a}_3F_V(s) + \mathbf{a}_4h(s)}{S - \mathbf{a}_5}\right)$$

$$+ \mathbf{a}_{16}C_{O_2AIR}(s) + \mathbf{a}_{17}C_{O_2V}(s)$$

$$SC_{O_2}(s) = \frac{\mathbf{a}_{11} + \mathbf{a}_{15}\mathbf{a}_1}{S - \mathbf{a}_5} F_{N_2}(s) + \frac{\mathbf{a}_{11} + \mathbf{a}_{15}\mathbf{a}_2}{S - \mathbf{a}_5} F_{AIR}(s) + \frac{\mathbf{a}_{13} + \mathbf{a}_{15}\mathbf{a}_3}{S - \mathbf{a}_5} F_V(s) + \frac{\mathbf{a}_{14} + \mathbf{a}_{15}\mathbf{a}_4}{S - \mathbf{a}_5} h(s)$$

$$+ \mathbf{a}_{16}C_{O_2AIR}(s) + \mathbf{a}_{17}C_{O_2V}(s)$$

Finalmente

$$T(s) = \frac{\mathbf{a}_1}{S - \mathbf{a}_s} F_{N_2(s)} + \frac{\mathbf{a}_2}{S - \mathbf{a}_s} F_{AIR(s)} + \frac{\mathbf{a}_3}{S - \mathbf{a}_s} F_{V(s)} + \frac{\mathbf{a}_4}{S - \mathbf{a}_s} h(s)$$

$$P(s) = \frac{\mathbf{a}_6 + \mathbf{a}_{10}\mathbf{a}_1}{S(S - \mathbf{a}_s)} F_{N_2(s)} + \frac{\mathbf{a}_7 + \mathbf{a}_{10}\mathbf{a}_2}{S(S - \mathbf{a}_s)} F_{AIR(s)} + \frac{\mathbf{a}_8 + \mathbf{a}_{10}\mathbf{a}_3}{S(S - \mathbf{a}_s)} F_{V(s)} + \frac{\mathbf{a}_9 + \mathbf{a}_{10}\mathbf{a}_4}{S(S - \mathbf{a}_s)} h(s)$$

$$C_{O_2(s)} = \frac{\mathbf{a}_{11} + \mathbf{a}_{15}\mathbf{a}_1}{S(S - \mathbf{a}_s)} F_{N_2(s)} + \frac{\mathbf{a}_{11} + \mathbf{a}_{15}\mathbf{a}_2}{S(S - \mathbf{a}_s)} F_{AIR(s)} + \frac{\mathbf{a}_{13} + \mathbf{a}_{15}\mathbf{a}_3}{S(S - \mathbf{a}_s)} F_{V(s)} + \frac{\mathbf{a}_{14} + \mathbf{a}_{15}\mathbf{a}_4}{S(S - \mathbf{a}_s)} h(s) + \frac{\mathbf{a}_{16}}{S} C_{O_2AIR(s)} + \frac{\mathbf{a}_{17}}{S} C_{O_2V(s)}$$

Para el diagrama de bloques

$$T(s) = G_1 F_{N_2(s)} + G_2 F_{AIR(s)} + G_3 F_{V(s)} + G_4 h(s)$$

$$P(s) = G_5 F_{N_2(s)} + G_6 F_{AIR(s)} + G_7 F_{V(s)} + G_8 h(s)$$

$$(b_2(s)) = G_9 F_{N_2(s)} + G_{10} F_{AIR(s)} + G_{11} F_{V(s)} + G_{12} h(s) + G_{13} C_{O_2AIR(s)} + G_{14} C_{O_2V(s)}$$

Diagrama de bloques para el control de presión y concentración de oxígeno en un tanque de estireno

SP = set point;

B_{P(S)} = Función de transferencia del controlador de presión;

B_{C(S)} = función de transferencia para el controlador de concentración de oxígeno;

G_{VV} = función de transferencia para la válvula que abre el venteo;

G_{VN2} = función de transferencia para la válvula que abre el flujo de nitrógeno;

G_{VAIR} = función de transferencia para la válvula que abre el aspirador;

G_{TCO2} = función de transferencia del transmisor de concentración de oxígeno;

G_{TP} = función de transferencia del transmisor de presión.

