

# Trabajo Fin de Grado

## Ingeniería Química

### Ingeniería básica de una planta de producción de Polietileno Tereftalato

Autora: María de la Oliva García Sánchez

Tutor: Manuel Campoy Naranjo

**Dep. Ingeniería Química y Ambiental**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería Química

# **Ingeniería básica de una planta de producción de Polietileno Tereftalato**

Autora:

María de la Oliva García Sánchez

Tutor:

Manuel Campoy Naranjo

Profesor Contratado Doctor

Dep. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Carrera: Ingeniería básica de una planta de producción de Polietileno Tereftalato

Autora: María de la Oliva García Sánchez

Tutor: Manuel Campoy Naranjo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

*Gracias a mi tutor, a todos los profesores y a mi familia y amigos.*

# Resumen

---

El objetivo de este trabajo es realizar una ingeniería básica de una planta de producción de polietileno tereftalato (PET).

En primer lugar, se realiza un estudio general de mercado con el cual se fija la capacidad de la planta en 175.000 toneladas de PET al año y se elige el tipo de polímero a fabricar, que sería PET grado botella de índice de viscosidad 0,8.

A su vez, se lleva a cabo un estudio del proceso comparando las distintas materias primas y auxiliares y las diferentes tecnologías de producción posibles.

Seguidamente, se determinan los servicios auxiliares y generales necesarios para el proceso de fabricación. Se realiza el diagrama de proceso teniendo en cuenta el conjunto de operaciones unitarias, así como el balance de materia y energía global del sistema.

Y, finalmente, se realiza la especificación de los equipos necesarios y se realiza un básico estudio económico.



# Abstract

---

The project's aim is to perform a basic engineering of a Polyethylene Terephthalate (PET) production plant.

Firstly, a general market study is carried out, which establishes the capacity of the plant at 175.000 tonnes of PET per year and chooses the type of polymer to be manufactured, which would be PET bottle grade viscosity index 0,8.

In turn, a study of the process is carried out comparing the different raw and auxiliary materials and the different possible production technologies.

Next, the auxiliary and general services necessary for the manufacturing process are determined. The process diagram is made taking into account the set of unit operations, as well as mass and energy balances of the system.

And finally, the specification of the necessary equipment and a basic economic study are realized.

# ÍNDICE

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Agradecimientos</b> .....  | <b>9</b>  |
| <b>Resumen</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>ÍNDICE</b> .....   | <b>13</b> |
| <b>Índice de Tablas</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>Índice de Figuras</b> .....  | <b>21</b> |
| <b>1 Introducción</b> .....   | <b>24</b> |
| 1.1 <i>OBJETIVO E INTRODUCCIÓN HISTÓRICA</i> .....                              | 24        |
| 1.1.1 Alcance y objetivo .....  | 24        |
| 1.1.2 Introducción histórica .....  | 24        |
| 1.2 <i>EL PET</i> .....   | 25        |
| 1.2.1 Propiedades del PET .....   | 25        |
| 1.2.2 Clasificación de PET Chips .....  | 30        |
| 1.3 <i>MERCADO DEL PET</i> .....  | 32        |
| 1.3.1 Mercado mundial .....   | 32        |
| 1.3.2 Mercado en Europa .....   | 35        |
| 1.3.3 Análisis de compra-venta/Oferta-demanda .....                             | 39        |
| 1.3.4 Comparación entre la resina virgen y la resina reciclada .....            | 42        |
| 1.4 <i>EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL PET</i> .....                               | 45        |
| 1.4.1 Reacciones principales .....  | 45        |
| 1.4.2 Reacciones secundarias indeseadas .....                                   | 48        |
| 1.4.3 Diagrama de proceso .....   | 49        |
| 1.4.3.1 Etapas de la fase fundida .....   | 51        |
| 1.4.3.2 Etapas de la fase sólida .....  | 54        |
| 1.4.3.3 Tecnologías de polimerización de PTA a PET .....                        | 55        |
| 1.4.4 Catalizadores y estabilizantes .....                                      | 62        |
| <b>2 Memoria Descriptiva y Justificativa</b> .....                              | <b>67</b> |
| 2.1 <i>FASE FUNDIDA</i> .....   | 67        |
| 2.1.1 <i>PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS, ADITIVOS Y CATALIZADORES</i> ..... | 67        |
| 2.1.1.1 Diagrama de flujo de la etapa .....                                     | 67        |
| 2.1.1.2 Especificaciones de la etapa .....                                      | 68        |
| 2.1.1.3 Lista de equipos .....  | 69        |
| 2.1.2 <i>PREPARACIÓN DE LA PASTA</i> .....                                      | 70        |
| 2.1.2.1 Diagrama de flujo .....   | 70        |
| 2.1.2.2 Especificaciones de la etapa .....                                      | 71        |
| 2.1.2.3 Lista de equipos .....  | 71        |
| 2.1.3 <i>ESTERIFICACIÓN</i> .....   | 72        |
| 2.1.3.1 Diagrama de flujo .....   | 72        |
| 2.1.3.2 Especificaciones de la etapa .....                                      | 73        |
| 2.1.3.3 Lista de equipos .....  | 74        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.1.4    | PREPOLIMERIZACIÓN .....   | 74        |
| 2.1.4.1  | Diagrama de flujo .....   | 74        |
| 2.1.4.2  | Especificaciones de la etapa .....                                  | 75        |
| 2.1.4.3  | Lista de equipos .....  | 76        |
| 2.1.5    | POLIMERIZACIÓN .....  | 76        |
| 2.1.5.1  | Diagrama de flujo .....   | 76        |
| 2.1.5.2  | Especificaciones de la etapa .....                                  | 77        |
| 2.1.5.3  | Lista de equipos .....  | 77        |
| 2.1.6    | PELETIZACIÓN .....  | 78        |
| 2.1.6.1  | Diagrama de flujo .....   | 78        |
| 2.1.6.2  | Especificaciones de la etapa .....                                  | 79        |
| 2.1.6.3  | Lista de equipos .....  | 79        |
| 2.1.7    | REGENERACIÓN DE EG .....  | 80        |
| 2.1.7.1  | Diagrama de flujo .....   | 80        |
| 2.1.7.2  | Especificaciones de la etapa .....                                  | 81        |
| 2.1.7.3  | Lista de equipos .....  | 81        |
| 2.2      | FASE SÓLIDA .....   | 82        |
| 2.2.1    | CRISTALIZACIÓN .....  | 82        |
| 2.2.1.1  | Diagrama de flujo .....   | 82        |
| 2.2.1.2  | Especificaciones de la etapa .....                                  | 83        |
| 2.2.1.3  | Lista de equipos .....  | 84        |
| 2.2.2    | REACCIÓN DE POLICONDENSACIÓN Y REGENERACIÓN DE N <sub>2</sub> ..... | 85        |
| 2.2.2.1  | Diagrama de flujo .....   | 85        |
| 2.2.2.2  | Especificaciones de la etapa .....                                  | 86        |
| 2.2.2.3  | Lista de equipos .....  | 87        |
| 2.2.3    | ALMACENAMIENTO DE PRODUCTO FINAL.....                               | 87        |
| 2.2.3.1  | Diagrama de flujo .....   | 87        |
| 2.2.3.2  | Especificaciones de la etapa .....                                  | 88        |
| 2.2.3.3  | Lista de equipos .....  | 88        |
| 2.3      | VARIABLES A CONTROLAR.....  | 88        |
| 2.4      | SERVICIOS AUXILIARES.....   | 89        |
| 2.5      | RESIDUOS.....   | 90        |
| <b>3</b> | <b>Memoria de Cálculo .....</b>                                     | <b>91</b> |
| 3.1      | FASE FUNDIDA.....   | 91        |
| 3.1.1    | PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS, ADITIVOS Y CATALIZADORES .....  | 91        |
| 3.1.1.1  | Balances .....  | 91        |
| 3.1.1.2  | Cálculo de equipos .....  | 92        |
| 3.1.2    | PREPARACIÓN DE LA PASTA.....  | 96        |
| 3.1.2.1  | Balances .....  | 96        |
| 3.1.2.2  | Cálculo de equipos .....  | 96        |
| 3.1.3    | ESTERIFICACIÓN .....  | 98        |
| 3.1.3.1  | Balances .....  | 98        |
| 3.1.3.2  | Cálculo de equipos .....  | 99        |
| 3.1.4    | PREPOLIMERIZACIÓN .....   | 100       |
| 3.1.4.1  | Balances .....  | 100       |
| 3.1.4.2  | Cálculo de equipos .....  | 100       |
| 3.1.5    | POLIMERIZACIÓN .....  | 101       |
| 3.1.5.1  | Balances .....  | 101       |
| 3.1.5.2  | Cálculo de equipos .....  | 101       |
| 3.1.6    | PELETIZACIÓN .....  | 102       |
| 3.1.6.1  | Balances .....  | 102       |
| 3.1.6.2  | Cálculo de equipos .....  | 103       |

|                |   |            |
|----------------|---|------------|
| 3.1.7          | REGENERACIÓN DE ETILENGLICOL.....                                   | 105        |
| 3.1.7.1        | Balances .....  | 105        |
| 3.1.7.2        | Cálculo de equipos.....   | 106        |
| 3.2            | <i>FASE SÓLIDA</i> .....  | 107        |
| 3.2.1          | CRISTALIZACIÓN.....   | 107        |
| 3.2.1.1        | Balances .....  | 107        |
| 3.2.1.2        | Cálculo de equipos.....   | 111        |
| 3.2.2          | REACCIÓN DE POLICONDENSACIÓN Y REGENERACIÓN DE N <sub>2</sub> ..... | 115        |
| 3.2.2.1        | Balances .....  | 115        |
| 3.2.2.2        | Cálculo de equipos.....   | 116        |
| 3.2.3          | ALMACENAMIENTO DE PRODUCTO FINAL.....                               | 120        |
| 3.2.3.1        | Balances .....  | 120        |
| 3.2.3.2        | Cálculo de equipos.....   | 120        |
| <b>4</b>       | <b>Mediciones y Presupuesto.....</b>                                | <b>121</b> |
| 4.1            | <i>CRITERIO DE CÁLCULO DE COSTES</i> .....                          | 121        |
| 4.1.1          | Costes .....  | 123        |
| 4.1.1.1        | Materias primas.....  | 123        |
| 4.1.1.2        | Servicios .....   | 123        |
| 4.1.1.3        | Equipos.....  | 124        |
| 4.1.1.4        | Presupuesto .....   | 128        |
| <b>5</b>       | <b>Conclusiones.....</b>  | <b>129</b> |
| <b>ANEXO I</b> | <b>.....</b>  | <b>130</b> |
| A1.            | <i>CÁLCULO DEL PESO MOLECULAR</i> .....                             | 130        |
| A2.            | <i>CÁLCULO DE CALORES ESPECÍFICOS DE LAS MATERIAS PRIMAS</i> .....  | 130        |
| A3.            | <i>DIAGRAMA TERMODINÁMICO DEL NITRÓGENO</i> .....                   | 131        |
| A4.            | <i>HOJAS DE ESPECIFICACIÓN</i> .....                                | 132        |
| A4.1           | RECIPIENTES .....   | 132        |
| A4.1.1         | Tanques.....  | 132        |
| A4.1.1.1       | Tanque de etilenglicol.....   | 132        |
| A4.1.1.2       | Tanque de dietilenglicol .....                                      | 133        |
| A4.1.1.3       | Tanque de preparación de la pasta .....                             | 134        |
| A4.1.2         | Silos.....  | 135        |
| A4.1.2.1       | Silo de PTA .....   | 135        |
| A4.1.2.2       | Silo de IPA .....   | 136        |
| A4.1.2.3       | Silos de aditivos .....   | 137        |
| A4.1.3         | Mezcladores.....  | 140        |
| A4.1.3.1       | Mezclador de catalizador y EG.....                                  | 140        |
| A4.1.3.2       | Mezclador de ácido fosfórico y EG .....                             | 141        |
| A4.1.3.3       | Mezclador de colorante y EG.....                                    | 142        |
| A4.2           | REACTORES.....  | 143        |
| A4.2.1         | Reactores de esterificación .....                                   | 143        |
| A4.2.2         | Reactor de prepolimerización.....                                   | 145        |
| A4.2.3         | Reactor de polimerización .....                                     | 146        |
| A4.2.4         | Reactor de policondensación.....                                    | 147        |
| A4.3           | BOMBAS .....  | 148        |
| A4.3.2         | Bomba de preparación de la pasta.....                               | 148        |
| A4.3.3         | Bomba de prepolimerización .....                                    | 149        |
| A4.3.4         | Bomba de polímero.....  | 150        |
| A4.3.5         | Bomba de regeneración de EG.....                                    | 151        |
| A4.4.          | INTERCAMBIADORES DE CALOR.....                                      | 152        |
| A4.4.1         | Intercambiador de calor 1: aceite térmico-aire .....                | 152        |
| A4.4.2         | Intercambiador de calor 2: vapor-aire.....                          | 153        |

|   |            |
|---|------------|
| A4.4.3 Intercambiador de calor 3: vapor-aire.....                   | 154        |
| A4.4.4 Intercambiador de calor 4: nitrógeno-polímero .....          | 155        |
| A4.4.5 Intercambiador de calor 5: nitrógeno-polímero .....          | 156        |
| A4.4.6 Intercambiador de calor 6: nitrógeno-nitrógeno .....         | 157        |
| A4.4.7 Intercambiador de calor 7: nitrógeno-nitrógeno .....         | 158        |
| A4.4.8 Intercambiador de calor 8: nitrógeno-aceite térmico.....     | 159        |
| <b>ANEXO II.....</b>  | <b>160</b> |
| A1. Comparación de precios entre termoplásticos .....               | 160        |
| A2. Clasificación de plásticos/Identificación y nomenclatura .....  | 162        |
| A3. Proceso con DMT .....   | 163        |
| A4. Diagrama de flujo global del proceso de producción de PET ..... | 164        |
| <b>Referencias.....</b>   | <b>165</b> |
| <b>Glosario.....</b>  | <b>171</b> |

# ÍNDICE DE TABLAS

---

## 1. INTRODUCCIÓN

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1- 1. Características del PET. Fuente: Industria del Plástico. Plástico Industrial. Richardson & Lokensgar   A.K. van der Vegt & L.E. Govaert, Polymeren, van keten tot kunstof | 26 |
| Tabla 1- 2. Usos de los PET chips grado botella. [4]  | 30 |
| Tabla 1- 3. Usos de los PET chips grado textil. [5]   | 31 |
| Tabla 1- 4. Coexistencia con el PET o sustituto según su uso. [13]  | 36 |
| Tabla 1- 5. Capacidad de producción de empresas europeas.   | 38 |
| Tabla 1- 6. Tabla de precios del PET en Europa. [16]  | 38 |
| Tabla 1- 7. Exportaciones e importaciones de PET en Europa. [16]  | 41 |
| Tabla 1- 8. Precios del ICIS de algunos compuestos. [20]  | 43 |
| Tabla 1- 9. Precio de la resina del PET en US cents por libra de resina. (sin rellenar, color natural, FOB supplier (free on board supplier), a no ser que se indique lo contrario)   | 44 |

## 2. MEMORIA DESCRIPTIVA Y JUSTIFICATIVA

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2- 1. Densidades y pesos moleculares de las materias primas del proceso.                               | 69 |
| Tabla 2- 2. Lista de equipos de la etapa de preparación de materia prima.                                    | 70 |
| Tabla 2- 3. Lista de equipos de la fase de preparación de la pasta.  | 71 |
| Tabla 2- 4. Especificaciones de la etapa de esterificación.  | 73 |
| Tabla 2- 5. Lista de equipos de la fase de esterificación.   | 74 |
| Tabla 2- 6. Especificaciones de la etapa de prepolimerización.   | 75 |
| Tabla 2- 7. Lista de equipos de la etapa de prepolimerización.   | 76 |
| Tabla 2- 8. Especificaciones de la etapa de polimerización.  | 77 |
| Tabla 2- 9. Lista de equipos de la etapa de polimerización.  | 78 |
| Tabla 2- 10. Lista de equipos de la etapa de peletización.   | 79 |
| Tabla 2- 11. Lista de equipos de la etapa de regeneración de EG.   | 81 |
| Tabla 2- 12. Parámetros caldera de vapor de la etapa de cristalización.                                      | 84 |
| Tabla 2- 13. Lista de equipos de la etapa de cristalización.   | 84 |
| Tabla 2- 14. Correlación calor específico del nitrógeno en intervalo 0-1500°C. [51]                          | 86 |
| Tabla 2- 15. Lista de equipos de la etapa de reacción de policondensación y regeneración de N <sub>2</sub> . | 87 |
| Tabla 2- 16. Especificaciones PET producto de la etapa de almacenamiento de producto final.                  | 88 |
| Tabla 2- 17. Lista de equipos de la etapa de almacenamiento de product final.                                | 88 |

### 3. MEMORIA DE CÁLCULO

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 3- 1. Balance de materia de la etapa de preparación de la pasta I.                              | 91  |
| Tabla 3- 2. Balance de materia de la etapa de preparación de la pasta II.                             | 92  |
| Tabla 3- 3. Balance de materia de la etapa de preparación de la pasta III.                            | 92  |
| Tabla 3- 4. Especificaciones de los tanques de EG y DEG.  | 93  |
| Tabla 3- 5. Especificaciones de los silos de PTA e IPA.   | 94  |
| Tabla 3- 6. Especificaciones de los alimentadores de tornillo.  | 95  |
| Tabla 3- 7. Balance de materia de la etapa de preparación de la pasta.                                | 96  |
| Tabla 3- 8. Reacción de esterificación con caudales en kmol/h.  | 98  |
| Tabla 3- 9. Reacción de esterificación con caudales en t/h.   | 98  |
| Tabla 3- 10. Balance de materia de la etapa de esterificación I.                                      | 98  |
| Tabla 3- 11. Balance de materia de la etapa de esterificación II.                                     | 99  |
| Tabla 3- 12. Balance de materia en la etapa de prepolimerización.                                     | 100 |
| Tabla 3- 13. Balance de materia de la etapa de polimerización.  | 101 |
| Tabla 3- 14. Balance de materia de la etapa de peletización I.  | 102 |
| Tabla 3- 15. Balance de materia de la etapa de peletización II.                                       | 102 |
| Tabla 3- 16. Modelos de filtros de discos neumáticos Sharplex.  | 103 |
| Tabla 3- 17. Balance de energía en el lavador de agua pulverizada.                                    | 104 |
| Tabla 3- 18. Balance de energía en la secadora.   | 104 |
| Tabla 3- 19. Especificaciones de los silos de precursor y precursor fuera de especificación.          | 105 |
| Tabla 3- 20. Balance de materia en la etapa de regeneración de EG I.                                  | 105 |
| Tabla 3- 21. Balance de materia en la etapa de regeneración de EG II.                                 | 106 |
| Tabla 3- 22. Balance de materia en la etapa de regeneración de EG III.                                | 106 |
| Tabla 3- 23. Balance de materia en la etapa de cristalización I.                                      | 107 |
| Tabla 3- 24. Balance de materia en la etapa de cristalización II.                                     | 108 |
| Tabla 3- 25. Balance de materia en la etapa de cristalización III.                                    | 108 |
| Tabla 3- 26. Composición del combustible introducido en la caldera. [50]                              | 109 |
| Tabla 3- 27. Balance de materia en la caldera de vapor sobrecalentado.                                | 109 |
| Tabla 3- 28. Caudales de gases de la caldera.   | 110 |
| Tabla 3- 29. Balance de energía de la caldera de vapor.   | 110 |
| Tabla 3- 30. Factores a tener en cuenta para la disposición de los fluidos en el intercambiador.      | 114 |
| Tabla 3- 31. Balance de energía del Intercambiador 2 de la etapa de cristalización.                   | 114 |
| Tabla 3- 32. Balance de energía del Intercambiador 3 de la etapa de cristalización.                   | 114 |
| Tabla 3- 33. Balance de materia de la etapa de policondesnación y regeneración de N <sub>2</sub> I.   | 115 |
| Tabla 3- 34. Balance de materia de la etapa de policondesnación y regeneración de N <sub>2</sub> II.  | 115 |
| Tabla 3- 35. Balance de materia de la etapa de policondesnación y regeneración de N <sub>2</sub> III. | 116 |
| Tabla 3- 36. Balance de materia de la etapa de policondesnación y regeneración de N <sub>2</sub> IV.  | 116 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 3- 37. Balance de energía del Intercambiador de la etapa de reacción.                    | 117 |
| Tabla 3- 38. Balance de energía del Intercambiador 5 de la etapa de reacción.                  | 118 |
| Tabla 3- 39. Balance de energía del Intercambiador 6 de la etapa de regeneración de nitrógeno. | 118 |
| Tabla 3- 40. Balance de energía del Intercambiador 7 de la etapa de regeneración de nitrógeno. | 119 |
| Tabla 3- 41. Balance de energía de la refrigeradora de la etapa de reacción.                   | 119 |
| Tabla 3- 42. Balance de energía del condensador de la etapa de reacción.                       | 119 |
| Tabla 3- 43. Balance de materia de la etapa de almacenamiento de producto final.               | 120 |
| Tabla 3- 44. Especificaciones del silo de producto final y de la tolva de análisis.            | 120 |

#### 4. MEDICIONES Y PRESUPUESTO

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 4- 1. Precio de las materias primas y auxiliares del Sistema [62] | 123 |
| Tabla 4- 2. Precio de los servicios auxiliares del proceso              | 124 |
| Tabla 4- 3. Costes de la maquinaria de impulsión del proceso.           | 124 |
| Tabla 4- 4. Coste de la maquinaria de reacción.                         | 125 |
| Tabla 4- 5. Coste de la maquinaria de almacenamiento I.                 | 125 |
| Tabla 4- 6. Coste de la maquinaria de almacenamiento II.                | 126 |
| Tabla 4- 7. Coste de la maquinaria de intercambio de calor.             | 126 |
| Tabla 4- 8. Coste de la maquinaria.                                     | 127 |
| Tabla 4- 9. Presupuesto general de los equipos del proceso.             | 127 |
| Tabla 4- 10. Presupuesto general de la planta de producción de PET.     | 128 |

#### 5. ANEXOS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla A- 1. Grado de polimerización. Siendo Mn el peso molecular promedio e IV el índice de viscosidad. | 130 |
| Tabla A- 2. Hoja de especificación del tanque de etilenglicol   | 132 |
| Tabla A- 3. Hoja de especificación del tanque de dietilenglicol.  | 133 |
| Tabla A- 4. Hojas de especificaciones del tanque de preparación de la pasta.                            | 134 |
| Tabla A- 5. Hoja de especificación del silo de PTA. [72] [73]   | 135 |
| Tabla A- 6. Hoja de especificación del silo de IPA.[74]   | 136 |
| Tabla A- 7. Hoja de especificaciones de silo de catalizador $Sb_2O_3$                                   | 137 |
| Tabla A- 8. Hoja de especificaciones de silo de aditivo de fósforo ( $H_3PO_4$ )                        | 138 |
| Tabla A- 9. Hoja de especificaciones de silo de colorante ( $TiO_2$ )                                   | 139 |
| Tabla A- 10. Hoja de especificaciones de mezclador de $Sb_2O_3$ + EG                                    | 140 |
| Tabla A- 11. Hoja de especificaciones de mezclador de $H_3PO_4$ + EG                                    | 141 |
| Tabla A- 12. Hoja de especificaciones de mezclador de $TiO_2$ + EG                                      | 142 |
| Tabla A- 13. Hoja de especificaciones del primer reactor de esterificación                              | 143 |
| Tabla A- 14. Hoja de especificaciones del segundo reactor de esterificación                             | 144 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla A- 15. Hoja de especificaciones del reactor de prepolimerización.     | 145 |
| Tabla A- 16. Hoja de especificaciones del reactor de polimerización.        | 146 |
| Tabla A- 17. Hoja de especificaciones del reactor de policondensación.      | 147 |
| Tabla A- 18. Hoja de especificación de la bomba de preparación de la pasta. | 148 |
| Tabla A- 19. Hoja de especificación de la bomba de prepolimerización.       | 149 |
| Tabla A- 20. Hoja de especificación de la bomba de polímero.                | 150 |
| Tabla A- 21. Hoja de especificación de la bomba de regeneración de EG.      | 151 |
| Tabla A- 22. Hoja de especificaciones del intercambiador de calor 1.        | 152 |
| Tabla A- 23. Hoja de especificación del intercambiador 2.                   | 153 |
| Tabla A- 24. Hoja de especificaciones del intercambiador 3.                 | 154 |
| Tabla A- 25. Hoja de especificaciones del intercambiador 4.                 | 155 |
| Tabla A- 26. Hoja de especificaciones del intercambiador 5.                 | 156 |
| Tabla A- 27. Hoja de especificaciones del intercambiador 6.                 | 157 |
| Tabla A- 28. Hoja de especificaciones del intercambiador 7.                 | 158 |
| Tabla A- 29. Hoja de especificaciones del intercambiador 8.                 | 159 |
| Tabla A- 30. Comparación de precios de resinas.                             | 161 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

## 1. INTRODUCCIÓN

|  |    |
|--|----|
| Figura 1- 1. Fórmula química del PET. [1]  | 25 |
| Figura 1- 2. Medición en una lámina de PET con un equipo MDSC 10. [2]  | 28 |
| Figura 1- 3. Ecuación del cálculo de la cristalinidad mediante medidas de densidad.  | 29 |
| Figura 1- 4. Ecuación del cálculo de la cristalinidad mediante DSC.  | 29 |
| Figura 1- 5. Curvas de cristalización y fusión para muestras de PET amorfo y cristalino. [3]   | 29 |
| Figura 1- 6. Ilustración de resina de APET.  | 32 |
| Figura 1- 7. Consumo de resina sólida mundial de PET. [9]  | 33 |
| Figura 1- 8. Capacidad por región del PET. [10]  | 34 |
| Figura 1- 9. Fluctuación del precio mundial de la resina de PET. [12]  | 35 |
| Figura 1- 10. Diagrama de ventas de productos químicos en la EU. Fuente: Cefic Chemdata Internacional  | 35 |
| Figura 1- 11. La caída del precio del PET en Europa en 2013. [14]  | 37 |
| Figura 1- 12. Fluctuación de precios de MEG, p-Xileno y PET bottle grade. [16]   | 39 |
| Figura 1- 13. Ingresos totales por aplicación de PET (2010-2016). [17]   | 40 |
| Figura 1- 14. Importaciones europeas de PET, comparación año 2015-2016. [  | 41 |
| Figura 1- 15. Exportaciones europeas de PET, comparación año 2015-2016. [16]   | 42 |
| Figura 1- 16. PET flakes reciclado.  | 42 |
| Figura 1- 17. Gráfica representativa de la fluctuación del precio del pellet post-consumo desde el año 1992 a 2016. El precio se encuentra en céntimos por libra. [22] | 44 |
| Figura 1- 18. Esquema del proceso Amoco. [24]  | 46 |
| Figura 1- 19. Esterificación de PTA a DMT. [25]  | 46 |
| Figura 1- 20. Reacción de producción de etilenglicol. [26]   | 47 |
| Figura 1- 21. Reacciones de producción de polietilentereftalato. [27]  | 47 |
| Figura 1- 22. Formación de DEG en la producción de PET. [28]   | 49 |
| Figura 1- 23. Formación de acetaldehído en la producción de PET. [28]  | 49 |
| Figura 1- 24. Diagrama de bloques simplificado de producción de PET.   | 50 |
| Figura 1- 25. Diagrama de bloques detallado de producción de PET.  | 50 |
| Figura 1- 26. Diagrama de bloques de la fase fundida.  | 51 |
| Figura 1- 27. Reacción de esterificación. [30]   | 52 |
| Figura 1- 28. Diagrama de bloques de la fase sólida.   | 54 |
| Figura 1- 29. Proceso Invista Performance Technologies. [32]   | 56 |
| Figura 1- 30. Sección SSP de M & G Easy up process. [32]   | 57 |
| Figura 1- 31. Uhde-Inventa- Fisher 2R Process. [32]  | 58 |
| Figura 1- 32. Comparación de la resina de PET producida con SSP y con MTR. [33]  | 58 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 1- 33. Proceso de Lurgi Zimmer policondensación DHI                                 | 59 |
| Figura 1- 34. Proceso Eastman IntegRex [32]  | 60 |
| Figura 1- 35. Producción de BHET del método ethoxilation de PTA. [32]                      | 60 |
| Figura 1- 36. Polimerización del método. [32]  | 61 |
| Figura 1- 37. Proceso Buhler de reciclaje. [32]  | 62 |
| Figura 1- 38. Ilustraciones de envases y empaques de PET. [37-38]                          | 65 |
| Figura 1- 39. Película de PET, material electrónico [39], material dieléctrico de PET [40] | 65 |
| Figura 1- 40. Tela de PET [41]    Cerdas sintéticas de PET [42]                            | 66 |
| Figura 1- 41. Piezas mecánicas de PET [43]   | 66 |

## 2. MEMORIA DESCRIPTIVA Y JUSTIFICATIVA

|  |    |
|--|----|
| Figura 2- 1. Diagrama de bloques completo de la producción de PET.   | 67 |
| Figura 2- 2. Diagrama de flujo de la etapa de preparación de las materias primas.                            | 68 |
| Figura 2- 3. Diagrama de flujo de la etapa de preparación de la pasta.                                       | 71 |
| Figura 2- 4. Reacción de esterificación simplificada   | 72 |
| Figura 2- 5. Diagrama de flujo de la etapa de esterificación.  | 72 |
| Figura 2- 6. Reacción de prepolimerización simplificada.   | 74 |
| Figura 2- 7. Diagrama de flujo de la etapa de prepolimerización.   | 75 |
| Figura 2- 8. Reacción de polimerización simplificada.  | 76 |
| Figura 2- 9. Diagrama de flujo de la etapa de polimerización.  | 77 |
| Figura 2- 10. Diagrama de flujo de la etapa de peletización.   | 78 |
| Figura 2- 11. Diagrama de flujo de la etapa de regeneración de EG.   | 80 |
| Figura 2- 12. Diagrama de flujo de la etapa de cristalización.   | 83 |
| Figura 2- 13. Diagrama de flujo de la etapa de reacción de polimerización + regeneración de N <sub>2</sub> . | 86 |
| Figura 2- 14. Diagrama de flujo de la etapa de almacenamiento del producto final.                            | 87 |

## 3. MEMORIA DE CÁLCULO

|  |    |
|--|----|
| Figura 3- 1. Cálculo de parámetros de diseño de recipientes para materiales líquidos.          | 93 |
| Figura 3- 2. Cálculo de parámetros de diseño de recipientes para materiales sólidos.           | 93 |
| Figura 3- 3. Curvas de velocidad-capacidad para transportes de tornillo para material clase d. | 94 |
| Figura 3- 4. Ecuación del cálculo de la potencia de un tornillo sin fin.                       | 95 |
| Figura 3- 5. Cálculo de la potencia que absorbe una bomba.                                     | 96 |
| Figura 3- 6. Cálculo de la velocidad de giro en función del caudal en una bomba.               | 96 |
| Figura 3- 7. Cálculo del NSPH requerido y disponible de una bomba.                             | 97 |
| Figura 3- 8. Curva característica de una bomba rotativa.                                       | 97 |
| Figura 3- 9. Cálculo de un ciclo.  | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 3- 10. Cálculo del volumen del reactor, donde V se encuentra en m <sup>3</sup> y Q en m <sup>3</sup> /h.                                 | 99  |
| Figura 3- 11. Balance térmico de la etapa de peletización.  | 102 |
| Figura 3- 12. Imagen de filtro de discos neumáticos. [54]   | 103 |
| Figura 3- 13. Diagrama de intercambiador de aceite/aire.  | 104 |
| Figura 3- 14. Gráficas de comportamiento de Eyectores.  | 107 |
| Figura 3- 15. Cálculo de parámetros del balance de materia en la caldera.   | 108 |
| Figura 3- 16. Cálculo de caudal de gases de combustión (kg gas seco/kg combustible) y caudal de vapor de agua (kg vapor de agua/kg combustible) | 109 |
| Figura 3- 17. Balance térmico de la etapa de cristalización.  | 110 |
| Figura 3- 18. Datos técnicos VAPOPRESX 3GN Ferroli.   | 111 |
| Figura 3- 19. Ecuación de balance de energía y de transferencia de calor en un intercambiador.  | 112 |
| Figura 3- 20. Diseño de un intercambiador mediante el método F-DTLM.  | 112 |
| Figura 3- 21. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.   | 113 |
| Figura 3- 22. Factor F <sub>c</sub> para el cálculo de la temperatura calórica.   | 113 |
| Figura 3- 23. Balance térmico de la etapa de reacción de polimerización y regeneración de N <sub>2</sub> .                                      | 116 |

#### 4. MEDICIONES Y PRESUPUESTO

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4- 1. Correlación de precios según el método de Guthrie.                                    | 121 |
| Figura 4- 2. Correlación de precios para recipientes cilíndricos a presión.                        | 121 |
| Figura 4- 3. Parámetros característicos para recipientes cilíndricos a presión, método de Guthrie. | 122 |
| Figura 4- 4. Coste base de diferentes equipos de proceso, método de Guthrie.                       | 122 |
| Figura 4- 5. Coste base de diferentes tanques de almacenamiento, método de Guthrie.                | 122 |
| Figura 4- 6. Actualización de los precios.   | 123 |

#### 5. ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| Figura A- 1. Ecuación del cálculo del peso molecular en función del índice de viscosidad mediante el método de Mark-Houwink. [66]. | 130 |
| Figura A- 2. Cálculo del calor específico del EG donde para etilenglicol puro.   | 131 |
| Figura A- 3. Cálculo del calor específico del DEG donde para dietilenglicol puro.  | 131 |
| Figura A- 4. Diagrama termodinámico del nitrógeno.   | 131 |
| Figura A- 5. Clasificación de los plásticos. [76]  | 162 |
| Figura A- 6. Reacción de transesterificación de la producción con DMT.   | 163 |
| Figura A- 7. Reacción de policondensación de la producción con DMT.  | 163 |
| Figura A- 8. Diagrama de flujo completo del proceso.   | 164 |

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 OBJETIVO E INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

### 1.1.1 Alcance y objetivo

En el presente documento se realizará la ingeniería básica de una planta de producción de polietileno tereftalato (PET) a partir de etilenglicol y ácido tereftálico purificado con una capacidad de producción de 175.000 toneladas al año.

El objetivo es conseguir el pellet de PET como producto final. Ésta sería la materia prima con la que tras un tratamiento posterior se forman planchas, film, envases, etc.

Se establecerán los sistemas de reacción para conseguir el producto, así como se proporcionarán las condiciones de operación y se llevará a cabo el diseño de la planta mediante el dimensionamiento de equipos a partir de los balances de materia y energía del sistema.

### 1.1.2 Introducción histórica

El descubrimiento de polietilentereftalato, también conocido como PET, fue patentado por J. R. Whinfield y J. T. Dickson como un polímero para fibra. Estos científicos británicos, junto con los inventores W. K. Birtwhistle y C. G. Ritchie they crearon la primera fibra de poliéster llamada Terileno en 1941. Este polímero después llegó a ser poliestireno sintetizado por Wallace Carothers.

La producción comercial de fibra de poliéster comenzó en 1955. Aunque la primera botella de PET fue patentada en 1973 por el químico Nathaniel Wyeth. A partir de 1976 se comenzó a usar el PET para la fabricación de envases transparentes, ligeros y resistentes principalmente para bebidas.

A lo largo de los años que lleva en el mercado, el PET se ha diversificado en múltiples sectores sustituyendo a materiales tradicionalmente implantados o planteando nuevas alternativas de envasado impensables hasta el momento. Esta diversificación tan importante ha originado que el PET haya experimentado un gran crecimiento en su consumo y que siga siendo el material de embalaje que actualmente presenta las mayores expectativas de crecimiento a nivel mundial basado en el crecimiento de la demanda del producto a escala mundial y a la diversificación de sus posibilidades de uso.

## 1.2 EL PET

El polietilentereftalato (PET) es una resina sintética termoplástica o poliéster termoplástico producido a partir de dos compuestos principales: ácido terftálico (PTA) y etilenglicol (EG), aunque también puede obtenerse utilizando dimetiltereftalato (DMT) en lugar de PTA. Este material tiene una baja velocidad de cristalización y puede encontrarse en estado amorfo-transparente o cristalino.

El polietileno tereftalato, es un polímero extremadamente duro, dimensionalmente estable, lineal, con alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, por lo cual es apto para ser transformado mediante procesos de extrusión, inyección, inyección-soplado y termoformado.

Su fórmula es:

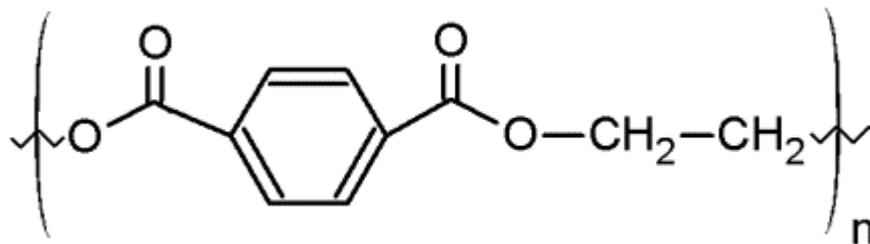


Figura 1- 1. Fórmula química del PET. [1]

### 1.2.1 Propiedades del PET

El PET en general se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad. De acuerdo a su orientación presenta propiedades de transparencia y resistencia química. Este polímero no se estira y no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos, es resistente al calor y absorbe poca cantidad de agua, forma fibras fuertes y flexibles, también películas. Su punto de fusión es alto, lo que facilita su planchado y, es resistente al ataque de polillas, bacterias y hongos.

A continuación, se presenta la Tabla 1-1, en la que se detalla las diferentes propiedades del polietileno tereftalato:

**Tabla 1- 1.** Características del PET. Fuente: Industria del Plástico. Plástico Industrial. Richardson & Lokensgar|| A.K. van der Vegt & L.E. Govaert, Polymeren, van keten tot kunstof

| <b>FÓRMULA MOLECULAR</b>                | $(C_{10}H_8O_4)_n$    |  |
|---|-----------------------|--|
| <b>PROPIEDAD</b>                        | <b>Unidad</b>         | <b>Valor</b>                                 |
| <b>Densidad</b>                         | g/cm <sup>3</sup>     | 1,370 amorfo<br>1,455 cristalino             |
| <b>Presión</b>                          | MPa                   | 55 – 75                                      |
| <b>Resistencia a la compresión</b>      | MPa                   | 76 – 128                                     |
| <b>Prueba de impacto</b>                | kJ/m <sup>2</sup>     | 3,6  |
| <b>Carga de rotura</b>                  | kg/cm <sup>2</sup>    | 560 – 2500                                   |
| <b>Módulo de elasticidad</b>            | MPa                   | 2100 – 2400 amorfo<br>2800 – 3100 cristalino |
| <b>Dilatación térmica</b>               | 10 <sup>-4</sup> / °C | 15,2 – 24                                    |
| <b>Resistencia dieléctrica</b>          | V/mm                  | 13780 – 15750                                |
| <b>Constante dieléctrica (60 Hz)</b>    | --                    | 3,65   |
| <b>Absorción de agua</b>                | ASTM                  | 0,16   |
| <b>Velocidad de combustión</b>          | mm/min                | Consumo lento                                |
| <b>Índice de refracción</b>             | --                    | 1,5750                                       |
| <b>Temperatura de fusión</b>            | °C                    | 256- 271                                     |
| <b>Temperatura de transición vítrea</b> | °C                    | 70   |

Entre otras de las características más importantes que presenta el PET, se encuentran:

- Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes.
- Cristalinidad.

- Alta resistencia a la fricción, a la fatiga y al desgaste.
- Muy buen coeficiente de deslizamiento.
- Buena resistencia química (alta resistencia a los ataques químicos como ácidos y álcalis suaves y solventes orgánicos. No se daña por grasas o aceites) y térmica (es un buen conductor de la temperatura).
- Muy buena barrera a CO<sub>2</sub>, aceptable barrera a O<sub>2</sub> y humedad.
- Totalmente reciclable, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios.
- Alto grado de transparencia y brillo con efecto lupa, conserva el sabor y el aroma de los alimentos.
- Procesable por soplado, inyección y extrusión. Apto para producir botellas, películas, láminas, planchas y piezas.
- Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- Excelentes propiedades mecánicas (material duro con magníficas conductas a la flexión y al impacto elástico, además de ser ligero y translúcido) y eléctricas.
- Esterilizable por rayos gamma y óxido de etileno.
- Buena relación costo / rendimiento.
- Excelente estabilidad dimensional y propiedades barrera para la retención de gases.

En general, estas propiedades características del PET lo convierten en el material idóneo para la realización de aplicaciones de uso común y principalmente, para la producción de distintos tipos de envases. Tanto la industria comercial alimentaria como la industria manufacturera son las que más provecho le sacan a este polímero termoplástico.

A continuación, se muestran con más detalle algunas de las características más importantes:

- PESO MOLECULAR –VISCOSIDAD INTRÍNSECA

El peso molecular es el parámetro de caracterización del PET más importante, ya que depende de él características como la impermeabilidad de los gases o la resistencia mecánica. Este parámetro es directamente proporcional a la longitud de la cadena polimérica. Se puede calcular el peso molecular de una muestra de dos formas:

- El peso molecular promedio, en número se calcula mediante la división del peso total de todas las moléculas poliméricas de una muestra por el número total de moléculas poliméricas.
- El peso molecular promedio, en peso se calcula mediante la suma de los productos de cada fracción molar de moléculas de peso M, por dicho peso.

La viscosidad intrínseca (IV), es una medida indirecta del peso molecular promedio del polímero y, por tanto, es dependiente de la longitud de su cadena polimérica. Por ello, cuanto más larga sea la cadena polimérica, más rígido es el material y más alta su IV. Otra relación sería: a mayor viscosidad mayor longitud promedio de las cadenas, mayor grado de polimerización y mayor peso molecular promedio.

La IV de uso general es de  $0.8 \pm 0.02$  dl/g que corresponde aproximadamente a 125 unidades repetidas por molécula y un peso aproximado de 24,000 g/mol.

- TEMPERATURA DE TRANSICION VÍTREA ( $T_g$ )- TEMPERATURA DE FUSIÓN ( $T_m$ )

La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) es la temperatura a la cual un polímero amorfo se ablanda. Bajo esta temperatura, el polímero disminuye drásticamente su densidad y porcentaje de elongación, además se vuelve rígido y quebradizo. El polietileno tereftalato tiene una temperatura de transición vítrea baja lo que da lugar a que los productos realizados con PET no se puedan calentar por encima de esta temperatura.

Por otro lado, la temperatura de fusión ( $T_m$ ) es la temperatura a la cual la cadena polimérica abandona su estructura cristalina y se transforma en un líquido desordenado.

La porción amorfa del polímero sólo experimentará la fase vítrea y la porción cristalina sólo la fase de fusión.

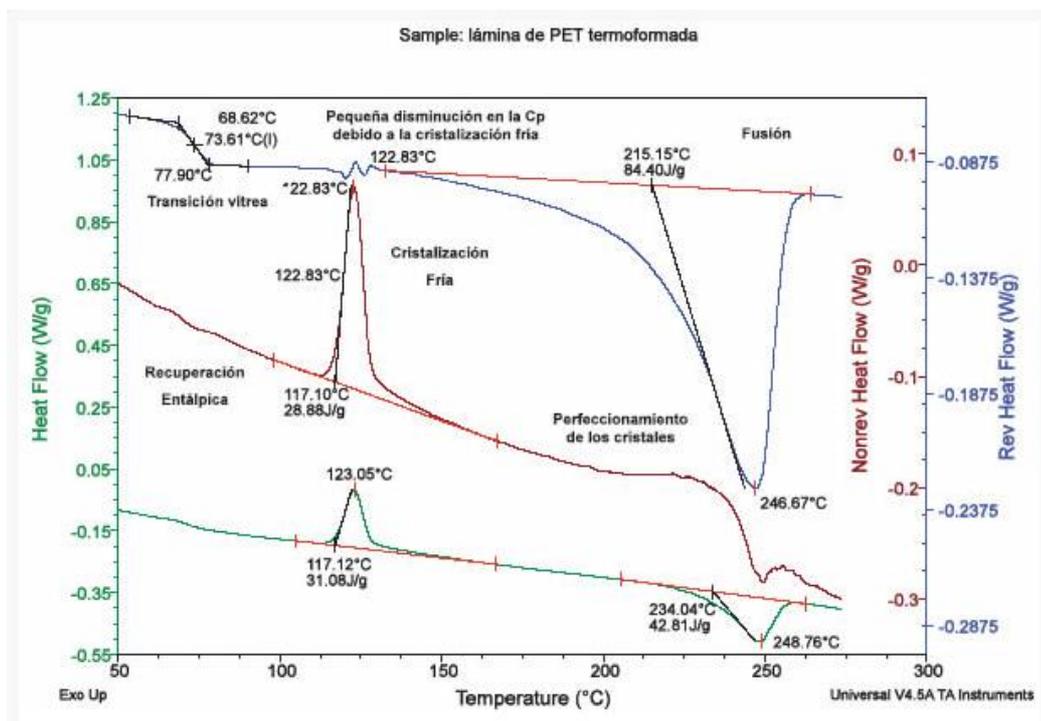


Figura 1- 2. Medición en una lámina de PET con un equipo MDSC 10. [2]

En la Figura 1-2, se ilustra una medición de una lámina de PET en un equipo de MDSC /10/. En dicha figura se observan en orden de arriba hacia abajo, la curva de flujo de calor reversible, la curva de flujo no reversible y la curva de flujo total de calor. La curva de flujo reversible permite visualizar la transición vítrea y la fusión, en tanto que la curva de flujo no reversible permite visualizar la cristalización fría que es un evento cinético (dependiente del tiempo). También se registran otros pequeños eventos, tales como una pequeña disminución de la capacidad calorífica por la cristalización fría (en la curva de flujo reversible), y una

recuperación entálpica en la misma región de la transición vítrea y un reordenamiento cristalino en la misma región de la fusión (en la curva de flujo reversible).

#### ▪ CRISTALINIDAD

La cristalinidad es el fenómeno físico con el cual las macromoléculas pasan de una estructura en la cual su disposición espacial es desordenada (estructura amorfa, transparente a la luz) a una estructura uniforme y ordenada (estructura cristalina, opaca a la luz) que le confiere a la resina una coloración blanca lechosa. En otras palabras, es el porcentaje de segmentos cristalinos dentro de un termoplástico cristalino.

El PET es un polímero semicristalino, por lo que tiene regiones amorfas y cristalinas. Este polímero cristaliza lentamente, tiene un grado de cristalinidad bajo, siendo su porcentaje de segmentos cristalinos de 25 – 40%.

El cálculo del grado de cristalinidad se puede hacer de dos formas entre muchas otras: mediante medidas de densidad o mediante DSC (Calorimetría Diferencial de barrido).

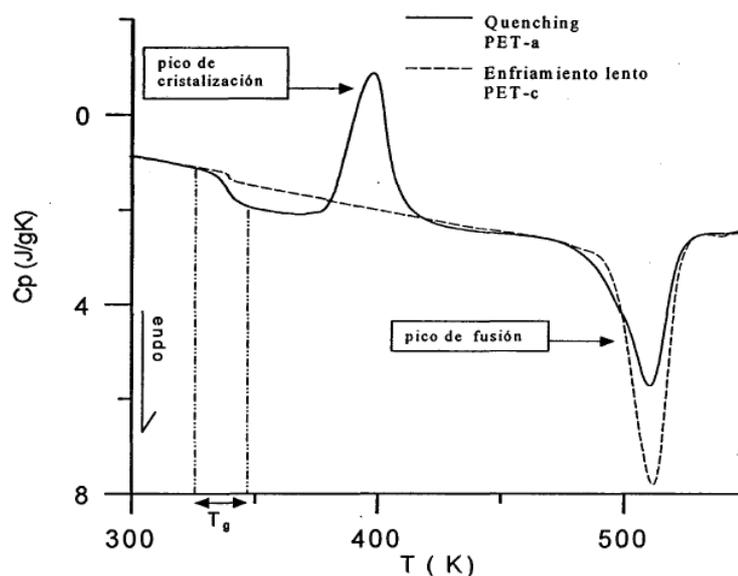
$$\%Cristalinidad = \frac{\rho_c \cdot (\rho - \rho_a)}{\rho \cdot (\rho_c - \rho_a)}$$

**Figura 1- 3.** Ecuación del cálculo de la cristalinidad mediante medidas de densidad.

Siendo  $\rho$ = densidad del polímero;  $\rho_a$ = densidad 100% amorfo;  $\rho_c$  = densidad 100% cristalino

$$\%Cristalinidad = \frac{\Delta H}{\Delta H_{crist}}$$

**Figura 1- 4.** Ecuación del cálculo de la cristalinidad mediante DSC.



**Figura 1- 5.** Curvas de cristalización y fusión para muestras de PET amorfo y cristalino. [3]

El PET cristaliza muy lentamente, la velocidad de cristalización es función de la temperatura y del peso molecular. Finalmente, decir que la densidad de un polímero es una función de la cristalinidad. Cuanto más cristalino sea el PET mayor será su densidad.

### 1.2.2 Clasificación de PET Chips

El PET se clasifica en función de la viscosidad intrínseca, la cual es directamente proporcional a su peso molecular y de la modificación polimérica que reduce la velocidad de cristalización y el punto de fusión. Podemos clasificarlo según el tipo o el grado de PET.

El polietileno tereftalato se clasifica según el grado en:

- PET chips grado botella:

**Tabla 1- 2.** Usos de los PET chips grado botella. [4]

| Viscosidad intrínseca (IV) | USOS   |
|----------------------------|--|
| 0,80                       | Botellas de agua potable y botellas de agua mineral          |
| 0,82 – 0,83                | Botellas carbonatadas, botellas de aceite, botellas de licor |
| 0,85 – 0,86                | Botellas grandes de envasado de bebidas carbonatadas         |

Normalmente, los PET chips de IV 0,80 se usan para botellas de agua y agua mineral. Mientras que los de IV 0,82 se usan para hacer botellas de bebidas carbonatadas, pequeñas botellas de aceite, licores, medicinas y PET sheets ya que necesitan mayor fuerza y un alto acabado de producto. Y, finalmente, los de IV 0,85 se usan para el packing de botellas carbonatadas grandes y para botellas de 3-5 galones de agua, (*Un galón equivale a aproximadamente 3,79 litros, por lo tanto, serían botellas de 11,36- 18,93 litros*) ya que necesitan tener una buena resistencia contra la presión.

Este PET ofrece características favorables en cuanto a resistencia contra agentes químicos, gran transparencia, ligereza, menores costos de fabricación y comodidad en su manejo. La más reciente y exitosa aplicación del PET, es el envasado de aguas minerales, también se ha comenzado a utilizar en el envasado de productos farmacéuticos, de droguería o alimenticios como salsas, mermeladas, miel.

- PET chips grado textil:

**Tabla 1- 3.** Usos de los PET chips grado textil. [5]

| Viscosidad intrínseca (IV) | USOS                                    |
|----------------------------|---|
| Semi mate                  | Textil, de hilado                       |
| Brillante                  | Textil, de hilado, código de neumáticos |
| Brillo al máximo           | Textil, de hilado                       |

El grado textil del PET chip se usa para hacer filamentos de hilo de poliéster como POY (Hilo Parcialmente Orientado), FDY (Poliéster Completamente Estirado) y Staple fibre (Fibra corta de poliéster). El grado textil está disponible en Super Bright (BR Chips) (Grado brillante), Semi Dull (SD Chips) (Grado semi opaca), Cationic Semi Dull and Cationic Super Bright PET Chips (CD Chips) (Grado catiónico semi opaco y catiónico brillante). El proceso de este tipo de PET consiste en mezclar un material de resina poliéster termoplástico con una alumina trihidratada (ATH) filler y con un pigmento.

Al poliéster (nombre común del PET grado textil), se le reconocieron excelentes cualidades desde un inicio para el proceso textil, entre las que se encuentran su alta resistencia a la deformación y su estabilidad dimensional, además del fácil cuidado de la prenda tejida (lavado y secado rápidos sin necesidad de planchado). Entre algunas limitaciones que presenta este material son: difícil tintura, la formación de pilling (bolitas) y la acumulación de electricidad estática, problemas para los que se han desarrollado soluciones eficaces.

- PET grado film, se utiliza en gran cantidad para la fabricación de películas fotográficas, de rayos X y de audio.

También podemos clasificar el PET según el tipo:

- APET: El PET está en forma cristalina y opaca cuando se encuentra en forma de pellets, pero cuando lo extruimos se vuelve amorfo y transparente. Este cambio es consecuencia del calentamiento del material hasta su punto de fusión y su posterior e inmediato enfriamiento por debajo de su temperatura de transición cristalina. Este material debe ser recristalizado para poder emplearlo en aplicaciones en las que sean necesarias el mantenimiento de las propiedades mecánicas a altas temperaturas, debido a que este material se reblandece a los 80°C no es apto para envases de calidad normal.
- RPET: este es PET en estado reciclado. Existen tres tipos básicos usados en la industria:
  - PET post-industrial, desecho producido en operaciones de proceso en los que no se usa de nuevo el material.
  - PET post-consumo, material usado por consumidores que lo llevaron a la basura.

- PET perdido
- CPET: es el polietileno tereftalato cristalino. Se usa para envases para microondas y comidas preparadas.



**Figura 1- 6.** Ilustración de resina de APET.

### **1.3 MERCADO DEL PET**

#### **1.3.1 Mercado mundial**

El mercado mundial [6] de envases de PET, según Smithers Pira, tuvo un valor de 29.358,5 millones de dólares en 2013, 48,1 millones de dólares en 2014, y se proyecta que alcance el valor de 60 mil millones de dólares para el 2019 [7], aumentando la demanda un promedio de 4,6% anual.

El mercado mundial de PET se segmenta principalmente en América del Norte, Europa, Asia y el Pacífico. De estas regiones, Asia y el Pacífico lideran el mercado de PET en términos de volumen exigido. La demanda de PET en Asia y el Pacífico puede superar los 7 millones de toneladas en 2016. Mientras que en América del Norte y Europa crecerá a una tasa compuesta anual del 3,7% y el 3,6% CAGR (Tasa de crecimiento anual compuesta), respectivamente. A su vez, China está emergiendo rápidamente como productora de petroquímicos mundialmente, debido a que sus costes de producción son relativamente bajos por lo que se puede considerar una de las regiones principales de producción.

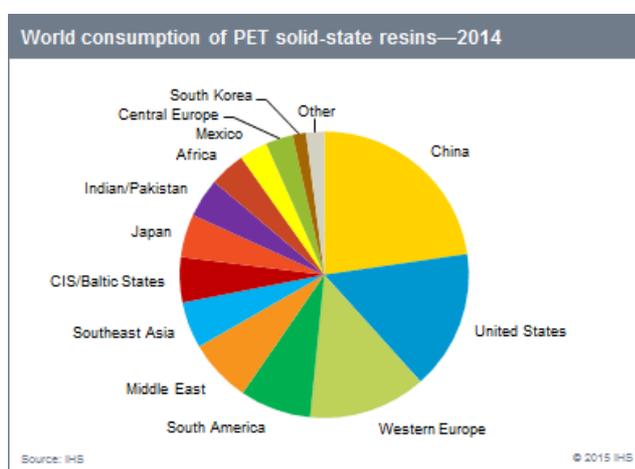
En cuanto al anuncio de los derechos antidumping sobre las importaciones de otras regiones, se espera que los mercados de PET tanto de Brasil y de Rusia se amplíen para el horizonte de 2020. Además, la gran población de la India está causando un aumento de consumo de productos envasados, creando una mayor demanda.

Según un análisis de GBI Research [8], se espera que los envases de PET aumenten su cuota en el sector de embalaje durante el horizonte de 2020, ya que el sector de embalaje busca obtener una mejor barrera

contra gases además de protección ultravioleta (UV), así como extender la vida útil de los productos envasados en PET.

Por otro lado, el envase flexible seguirá creciendo en importancia, los refrescos carbonatados (CSD) representaron una impresionante cuota del 31,5% en la demanda de PET durante el 2010, mientras que los sectores de la alimentación y cerveza representaron respectivamente el 22,4% y 11,4%.

En cuanto al mercado de las resinas de estado sólido de polietileno tereftalato, según un informe del IHS (Information Handling Services), la oferta y la demanda de estas resinas se centra principalmente en aplicaciones de botellas y envases. Se puede observar en la Figura 1-7, el consumo mundial de resina sólida de polietileno tereftalato:



**Figura 1- 7.** Consumo de resina sólida mundial de PET. [9]

En la Figura 1-7 se observa que alrededor del 23% del consumo mundial se atribuye al mercado chino que ha conseguido un crecimiento promedio anual del 15% desde el año 2009. Al mismo tiempo, la demanda de esta resina en el subcontinente indio fue de un 16,6% por año y en África un 12,6% anual. Mientras que tanto en América del Norte como en Europa continental se observa un estancamiento e incluso una disminución del consumo de resinas de PET, debido principalmente a la tendencia de reducción de peso de la resina.

A nivel mundial, la producción de envases de bebidas es el mayor uso final de las resinas de PET, que representó alrededor del 78% del consumo total en 2014, sólo un poco menos que en el año de la recesión de 2009. Otras aplicaciones del PET, tales como películas y láminas son más dominantes en los mercados de Taiwán, América del Norte, Japón y China, donde se consumen alrededor del 18-21% del requerimiento total de esta resina PET. Otros de los usos finales más empleados es el envasado de alimentos cuya proporción más alta de consumo están registrados en Taiwán (14%), México (11%) y Europa Occidental (10%).

El crecimiento futuro del consumo de resinas PET de estado sólido seguirá siendo impulsado por el envasado de bebidas y otras aplicaciones de PET, que se proyectan a expandirse a tasas medias anuales de

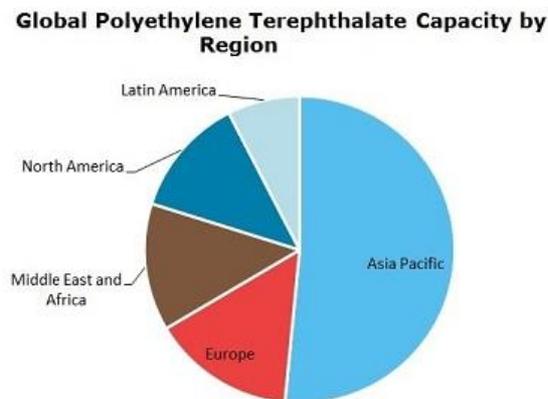
alrededor del 4% y 4,6%, respectivamente.

Por otro lado, las tendencias del mercado del polietileno tereftalato son:

- Aumento de la demanda de PET debido a las industrias de poliéster y de alimentos y bebidas.
- Disminución de la influencia de PET para el envase debido a que la industria del envasado está dirigiéndose hacia un cambio en busca de botellas más ligeras, especialmente en América del Norte. Se ha ido reduciendo constantemente la cantidad de material empleado en la fabricación de envases de bebidas. Una botella de agua de medio litro ahora usa como 12 gramos de PET, casi un 40% menos que las cantidades promedio de hace unos años.
- Crecimiento de la aplicación de material reciclado.

Además, se están desarrollando nuevas tecnologías para disminuir el impacto ambiental de los envases de PET, aumentar los servicios de reciclaje y mejorar los hábitos de consumo de reciclado del PET.

Si se observa la Figura 1-8 que representa la capacidad del PET por región, se aprecia que el crecimiento estará a cargo de la región de Asia, de China y el Pacífico ya que lideran la producción y consumo de polietileno tereftalato. Así mismo, se observa que Asia y el Pacífico albergan más de la mitad de la capacidad global del PET, siendo la capacidad de Europa alrededor 1/6 de la capacidad global.



**Figura 1- 8.** Capacidad por región del PET. [10]

A continuación, contemplando la Figura 1-9 [11] se puede observar la fluctuación del precio mundial de la resina de PET, desde diciembre de 2012 a diciembre de 2015. En el eje de ordenadas se encuentra el precio por tonelada de resina en US\$/tonelada y el de abscisas la fecha.



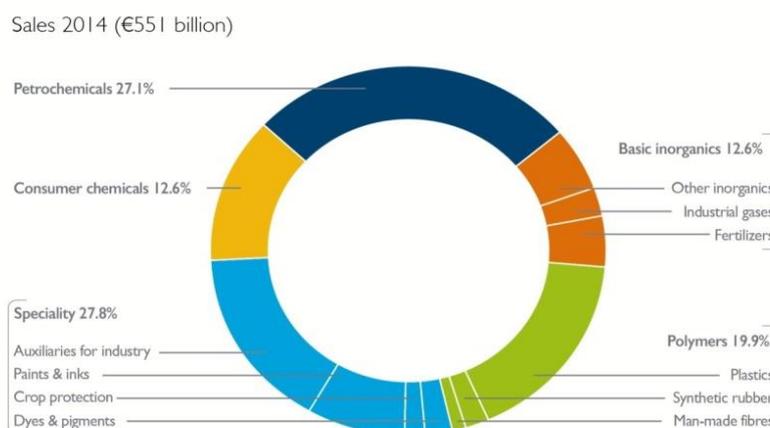
**Figura 1- 9.** Fluctuación del precio mundial de la resina de PET. [12]

El rango de precios de la resina entre diciembre de 2012 hasta diciembre de 2015, tiene un máximo de 2358,94 US\$ y un mínimo de 1895,95 US\$, siendo el precio promedio de 2197,59 US\$.

En general, el mercado global del polietileno tereftalato mostrará una tasa de crecimiento anual positivo en 2016. Sin embargo, las estrictas regulaciones ambientales impuestas por los gobiernos, así como las políticas de importaciones, podrían obstaculizar el crecimiento del mercado en cierta medida, aunque se espera que el desglose del consumo de resina de PET no cambie mucho durante el período de pronóstico a 2019 según un estudio de Smithers Pira [7].

### 1.3.2 Mercado en Europa

El mercado del PET en Europa generalmente depende de dos factores: las fluctuaciones en la fortaleza del euro y el impacto del cambio de los derechos de importación. Aunque la Comisión Europea espera que el desempleo en la zona euro se mantenga en el 12,2%, la OCDE prevé que la región apuntase un crecimiento del PIB del 1%, frente a una contracción del 0,4% en 2013 y la creación de la nueva demanda potencial para la resina. Además, se realiza un Reglamento por el cual se impone un derecho antidumping y un derecho compensatorio definitivo sobre las importaciones de resina de PET originaria en Irán, Pakistán, Emiratos Árabes Unidos, India e Israel.



**Figura 1- 10.** Diagrama de ventas de productos químicos en la EU. Fuente: Cefic Chemdata Internacional

La Figura 1-10 expresa en un diagrama de sectores las ventas en Europa de productos petroquímicos y productos químicos especializados. En el año 2014, se obtuvo un ingreso de  $5,51 \cdot 10^8$  millones de euros en este campo de la industria, de los cuales  $1,099 \cdot 10^8$  millones de euros fueron producidos por polímeros (19,9% de las ventas globales). Siendo  $9,18 \cdot 10^7$  millones de euros plásticos;  $1,18 \cdot 10^7$  millones de euros goma sintética; y  $6,3 \cdot 10^6$  millones de euros fibra artificial.

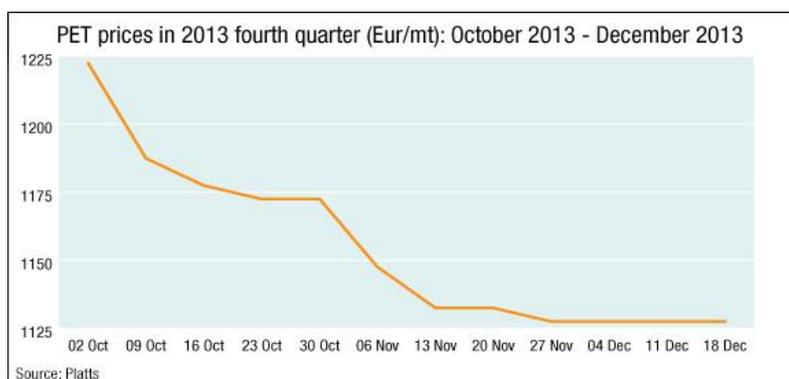
En la Tabla 1-4 se relacionan los sectores, el tamaño más estándar, y el material alternativo que coexiste con el PET o que ha sido sustituido por éste:

**Tabla 1- 4.** Coexistencia con el PET o sustituto según su uso. [13]

| Sector             | Tamaño  | Unidad | Aplicación                         | Material Sustituido |
|--------------------|---------|--------|------------------------------------|---------------------|
| Bebidas, Refrescos | 0.2-2.0 | 1      | Alimentos                          | Vidrio, lata        |
| Aguas Minerales    | 0.2-2.0 | 1      | Alimentos                          | PVC, HDPE, Vidrio   |
| Aceite comestible  | 0.5-5.0 | 1      | Alimentos                          | PVC, HDPE, Vidrio   |
| Vinagres           | 1       | 1      | Alimentos                          | PVC, HDPE, Vidrio   |
| Salsas             | 0.3-0.5 | 1      | Alimentos, Mayonesa, Salsa tomate  | Vidrio, HDPE        |
| Cosmética          | 0.3-1.0 | 1      | Cremas, Perfumes                   | PVC, HDPE           |
| Farmacia           | 0.3-0.5 | 1      | Bucales, Jarabes, Envases farmacia | Vidrio              |
| Licores            | 0.1-0.5 | 1      | Envases licores Muestras           | Vidrio              |
| Detergentes        | 1.0-1.5 | 1      | Friegasuelos, Lavavajillas         | PVC, HDPE           |
| Químicos           | 1.0-5.0 | 1      | Químicos                           | Vidrio              |

En cuanto a los países proveedores de PET, Omán, que en los primeros 10 meses de 2013 vendió 139.049 toneladas de resina en la UE y representó alrededor del 25% de las importaciones totales, tuvo que pagar el impuesto adicional. El tercer mayor proveedor de PET, la India, se enfrentó a un aumento de los impuestos, antes de que la UE a principios de 2013 decidiera imponer derechos antidumping sobre determinadas importaciones de PET.

El precio del PET presentó un mínimo histórico en el cuarto trimestre de 2013 [14], bajo un precio de 1.127,50 \$/mt FD NWE en noviembre, en Europa, debido a la fuerte competencia de Asia, la débil demanda de Europa y las fluctuaciones monetarias adversas.



**Figura 1- 11.** La caída del precio del PET en Europa en 2013. [14]

En Europa, en 2013, se empezaron a cerrar plantas debido a los bajos beneficios por el envejecimiento de la tecnología, por lo que se comenzaron a crear una serie de instalaciones para remediar la caída del precio del PET, de las que se espera un aumento de mercado.

Entre las nuevas instalaciones, se encuentran, una planta de 390.000 tm/año de PET en Geel, Bélgica, en el complejo petroquímico de BP de la India JBF Industries. Así como la nueva planta de Lotte Reino Unido de 200.000 tm/año de PET en Wilton, al noreste de Inglaterra.

La compañía EIPET Venture, de 420.000 tm/año, en Sokhna, Egipto, prevé servir a los clientes en el norte de África, América del Norte y Europa. La unidad cuenta con dos líneas de 210.000 tm / año cada una. Aunque ha sido objeto de varios retrasos, especialmente teniendo en cuenta la agitación política en Egipto en la actualidad. Además, Cepsa expande su planta de San Roque, España a 175.000 toneladas métricas [15].

A continuación, se muestra la Tabla 1-5 en la que se recogen una serie de empresas productoras de PET, así como su localización, capacidad de producción y tecnología:

**Tabla 1- 5.** Capacidad de producción de empresas europeas.

| EMPRESA   | LOCALIZACIÓN                    | CAPACIDAD     | TECNOLOGÍA   |
|---|---------------------------------|---------------|--|
| Indorama Ventures Europe B. V                     | The Netherland                  | 400.000 t/año | CP- Inventa Fischer & invista<br>SSP- Eastman/Buhler |
| Ottana Polimeri S.R.L.                            | Italia                          | 161.000 t/año | Dow  |
| UAB Orion Global Pet                              | Lituania                        | 274.000 t/año | CP- Inventa Fischer- SSP-<br>Buhler                  |
| Indorama Polymers Workington Limited              | North-West England              | 168.000 t/año | CP-Eastman/Zimmer SSP-<br>Eastman/Bepex              |
| Indorama Ventures Poland Sp. z.o.o.               | Poland                          | 229.950 t/año | C.P. – Uhde Inventa<br>Fischer/SSP – Buhler          |
| Indorama Ventures Adana Pet Sanayi Anonim Sirketi | Turkey                          | 129.600 t/año | Dupont CP technology and<br>Sinco SSP technology     |
| Indorama Ventures Corlu PET Sanayi A.S.           | Turkey                          | 252.000 t/año | -  |
| Indorama Ventures Public Company Limited (IVL)    | Guadarranque- San Roque (Cádiz) | 175.000 t/año | -  |
| Lotte Chemicals UK Ltd                            | UK                              | 420.000 t/año | -  |

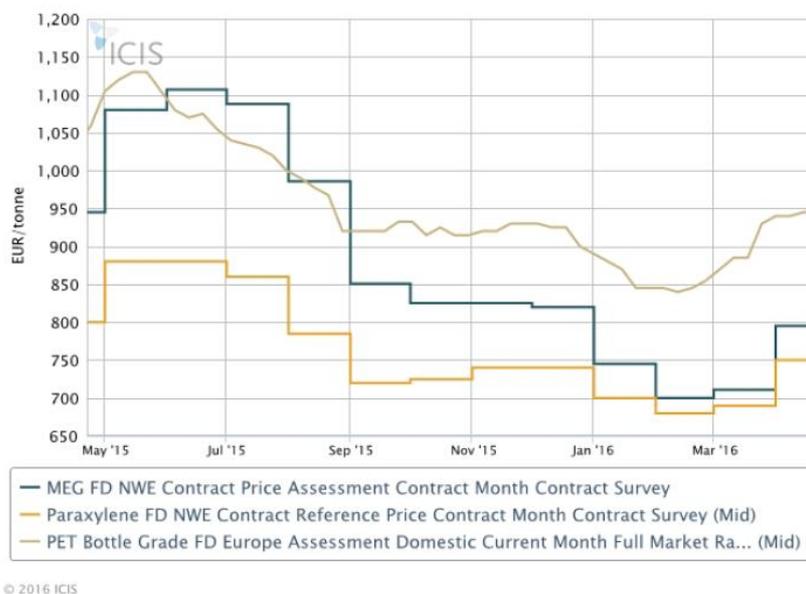
Según un informe del ICIS [16], y como se puede observar en la siguiente tabla 1-6, el precio de contrato del PET en Europa en grado de botella fue en marzo de 2016 de 840-900 EUR/tonelada siendo comparados con los precios internos de este grado de resina, encontrándose el precio interno alrededor de 920-970 EUR/tonelada.

| CONTRACT PRICES         |           |     |             |     |                |                 |
|-------------------------|-----------|-----|-------------|-----|----------------|-----------------|
|                         |           |     | Price Range |     | One Year Ago   | USD/tonne       |
| <b>PET Bottle Grade</b> |           |     |             |     |                |                 |
| FD W Europe MAR         | EUR/tonne | +20 | 840-900     | +30 | 900-990        | 944.29-1011.74  |
| FD E Europe MAR         | EUR/tonne | +20 | 840-900     | +60 | 900-990        | 944.29-1011.74  |
| <b>PET Film Grade</b>   |           |     |             |     |                |                 |
| FD W Europe MAR         | EUR/tonne | +20 | 840-900     | +30 | 900-990        | 944.29-1011.74  |
| DOMESTIC PRICES         |           |     |             |     |                |                 |
|                         |           |     | Price Range |     | Four Weeks Ago | USD/tonne       |
| <b>PET Bottle Grade</b> |           |     |             |     |                |                 |
| FD Europe               | EUR/tonne | n/c | 920-970     | n/c | 910-950        | 1034.23-1090.43 |
| SPOT PRICES             |           |     |             |     |                |                 |
|                         |           |     | Price Range |     | Four Weeks Ago | USD/tonne       |
| <b>PET Bottle Grade</b> |           |     |             |     |                |                 |
| Ex-Works Russia         | RUB/tonne | n/c | 85000-88000 | n/c | 84000-88000    | 1279.94-1325.11 |

**Tabla 1- 6.** Tabla de precios del PET en Europa. [16]

La tabla 1-6 representa la tabla de precio del contrato y se refiere a la mínima frecuencia y un máximo de acuerdos nacionales negociados libremente registran para entregas concluyó en el mes de marzo de 2016.

Seguidamente, en la Figura 1-12, se observa la fluctuación de los precios de paraxileno y MEG -las materias primas para la producción de PET- en comparación con el precio del PET grado botella, se destaca que en marzo de 2016 hubo un mínimo en los precios de aproximadamente 680 EUR/ tonelada de paraxileno, 700 EUR/tonelada de MEG y alrededor de 900 EUR/tonelada del PET grado botella. Se contempla a su vez que los precios siguen la misma tendencia, cuando baja uno bajan todos y viceversa.



**Figura 1- 12.** Fluctuación de precios de MEG, p-Xileno y PET bottle grade. [16]

Finalmente, decir que el mercado nacional de PET vive momentos de incertidumbre. La drástica reducción de la oferta dificulta conocer la demanda real actual de los termoplásticos más consumidos.

### 1.3.3 Análisis de compra-venta/Ofer-ta-demanda

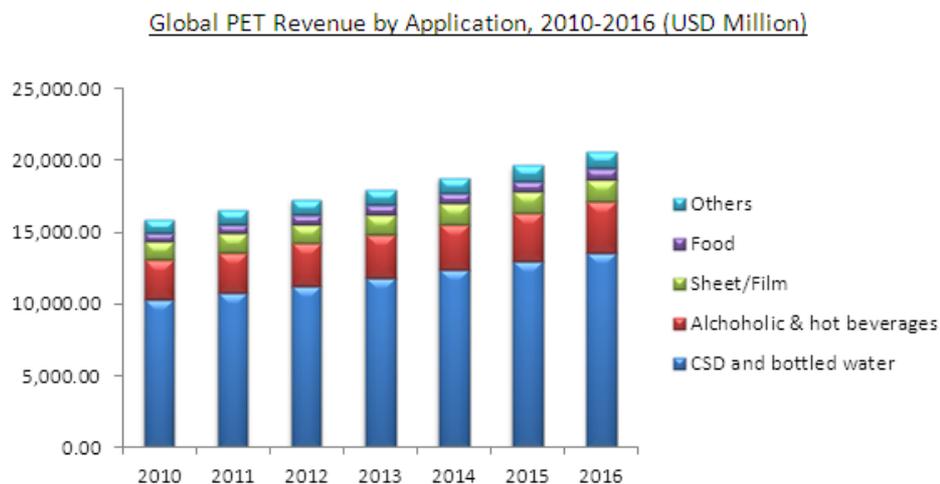
La demanda de PET ha aumentado significativamente debido al creciente requerimiento de este polímero en la industria de alimentos y bebidas, así como para el desarrollo de productos de gran consumo. Las botellas de PET son cada vez más usadas por su fácil manejo, su difícil ruptura y debido a que se pueden volver a cerrar. La demanda de envases de PET [8] ha experimentado un crecimiento de alrededor del 7% CAGR en la última década.

Según el análisis de GBI Research, las industrias de fuerte producción y las economías de rápido crecimiento conducirán a los siguientes países: Brasil, Rusia, India y China (BRIC) a convertirse en las fuerzas dominantes en el mercado mundial de PET.

Por otro lado, según el análisis de Transparency Market Research, la mayor producción de PET se realiza en Asia Pacific, mientras que los demás países seguirán un porcentaje de producción parecido, ya sea América del norte, Europa o el resto del mundo (RoW). En 2014, Asia Pacífico tiene una participación

de 31% del mercado mundial de envases de PET, seguida de América del Norte (23%) y Europa Occidental (19%).

La demanda mundial de PET se situó en 6,472,350 toneladas en el año 2000, aumentando a una CAGR del 6,9% hasta alcanzar los 12,621,553 de toneladas en 2010. Se espera que esta tendencia alcista se mantenga en un futuro próximo, con punta para llegar a 23.452.281 toneladas en 2020, a raíz de una tasa compuesta anual prevista de 6,4%.



**Figura 1- 13.** Ingresos totales por aplicación de PET (2010-2016). [17]

Como se observa en la Figura 1-13, que representa los ingresos totales por aplicación de PET representando en el eje de ordenadas los ingresos en (USD Million) y en el de abscisas distintos años, la demanda del mercado mundial de PET es impulsada principalmente por el aumento de uso de PET en envases CSD, así como por el aumento del consumo de productos congelados, envasados y alimentos procesados. El PET es ampliamente utilizado en el envasado de agua mineral y CSD, bebidas calientes o alcohólicas, lámina / película, y los alimentos.

Dentro del consumo global de envases de PET, en 2013 se consumieron 15,4 millones de toneladas. Las botellas de PET para bebidas representaron más del 80% de las ventas totales en 12,5 millones de toneladas (un 3,7% superior a 2012). El agua embotellada se convirtió en la mayor categoría de envases de PET, las ventas de botellas de agua crecieron un 7,3% hasta alcanzar los 5,45 millones de toneladas. Las ventas de botellas de PET para bebidas carbonatadas por comparación aumentaron un 1,8% a 5,17 millones de toneladas.

De acuerdo con Smithers Pira [7], en los sectores clave de embalaje restante, ventas de envases de PET no alimentarios alcanzaron 804,328 toneladas (un aumento del 4,4% respecto a 2012), con un consumo de envases termoformado un aumento de 4,7% a 1,04 millones de toneladas. El informe, concluyó diciendo que durante el período 2014-19, el sector de mayor uso final será embotellado de botellas de agua con un

crecimiento del 6% en términos de volumen, seguido de botellas de PET para otras bebidas, productos farmacéuticos y envases médicos y, tanto un aumento de 5%.

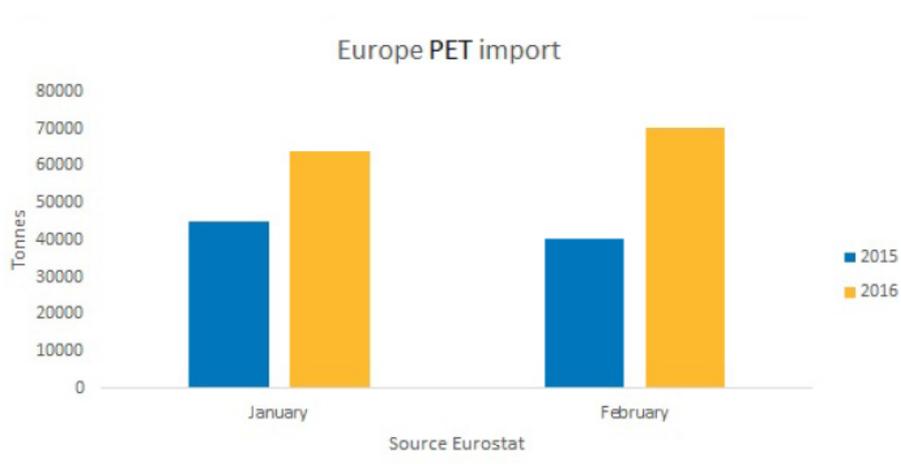
El mercado mundial de PET es de alrededor 32 millones de toneladas al año. Más del 60 por ciento, o sea, la mayor parte llega al comercio en forma de fibras de poliéster restando, por lo tanto, cerca de 13 millones de toneladas de PET como materia prima para envases.

Las importaciones de PET en Europa del resto del mundo se dispararon un 74% en el año, mientras que las exportaciones cayeron un 35%.

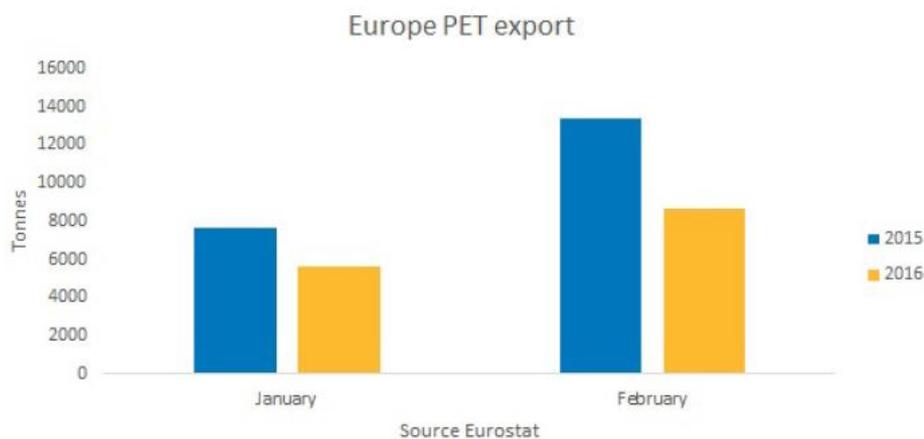
**Tabla 1- 7.** Exportaciones e importaciones de PET en Europa. [16]

| <b>EU PET</b>    |                      |                      |
|------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Fecha</b>     | <b>Importaciones</b> | <b>Exportaciones</b> |
| Febrero 2015     | 40,431               | 13,403               |
| Febrero 2016     | 70,251               | 8,691                |
| <b>Variación</b> | 74%                  | -35%                 |

En las Figuras 1-14 y 1-15 se observa de forma más clara el cambio que han tenido las exportaciones e importaciones en este último año comparado con el anterior.



**Figura 1- 14.** Importaciones europeas de PET, comparación año 2015-2016. [16]



**Figura 1- 15.** Exportaciones europeas de PET, comparación año 2015-2016. [16]

En conclusión, las importaciones de PET han aumentado durante este año haciendo que las exportaciones sean más bajas, por ello ha habido una gran atención por los reglamentos y tratados antidumping y de derecho compensatorio entre naciones.

#### 1.3.4 Comparación entre la resina virgen y la resina reciclada

En cuanto al precio de la resina virgen y la resina reciclada existe cierta controversia ya que distintas empresas y asociaciones mantienen afirmaciones muy diferentes ante este tema.

No existe ningún parámetro que dicte que el precio de la resina reciclada deba de ser menor que el de la resina virgen. El beneficio que se tiene que buscar es ser competitivo con la resina virgen e intentar estar a la par. Por lo tanto, la toma de decisiones han de estar influenciadas por el compromiso ambiental y la motivación ecológica, y no únicamente el aspecto económico.

Por otra parte, la Asociación Nacional de Recursos para Envases de PET de Estados Unidos (Napcor) publicó resultados de un estudio de análisis de ciclo de vida (ACV) para PET y HDPE reciclados donde se indicaba que incorporar PET reciclado en la fabricación de un empaque reducía significativamente la huella de carbono del empaque en términos de energía requerida y emisiones de gases con efecto invernadero.



**Figura 1- 16.** PET flakes reciclado.

Finalmente, decir que se espera que los precios del PET virgen continúen bajando, ejerciendo presión sobre los precios del PET reciclado ya que los mercados mundiales de PET se encuentran en exceso de oferta, con fabricantes bombeando PET más allá de la demanda actual.

Japón, uno de los países más avanzado en el reciclaje del PET, registró una tasa de reciclaje de botellas de PET (volumen total de recolección/volumen de botellas vendidas) de 77,9 % en 2009, según datos del Consejo de Reciclaje de Botellas de PET de ese país. Por su parte, Europa obtuvo una cifra de 48,3%, de acuerdo con la Asociación Europea de Reciclaje de Contenedores de PET (Petcore) mientras que Estados Unidos consiguió una cifra de 28%, según la Asociación de Resinas de PET (Petra). A su vez, Brasil es el líder en América con una tasa de 55,6%, seguido por Argentina con 34%, según reportes de la Asociación Brasileña de la Industria del PET (Abipet).

Los compradores y vendedores [19] de polietileno tereftalato virgen (PET) esperan que los precios se mantengan firmes, debido a la escasez de la oferta y las posibles subidas del coste de las materias primas. El precio spot europeo de PET se evaluó a 995 euros / tonelada (\$ 1,127 / mt) FD ENO en abril de 2016, el precio spot ha aumentado un 20% desde el precio más bajo obtenido hace seis años de 835 euros / mt FD ENO.

También se contempla que un aumento de los precios de la carga de alimentación de paraxileno y monoetilenglicol podría empujar los precios del PET, pero a expensas de las importaciones que están entrando en la UE y que podrían cambiar la política de precios de los productores de PET de la UE. A continuación, se expone la Tabla 1-7, en la que se encuentra el precio actual de las materias primas de producción de PET en US\$:

**Tabla 1- 8.** Precios del ICIS de algunos compuestos. [20]

Significando lo siguiente f.b.o.=free on board; t.t.=tank truck; t.c.= tank car; divid= delivered; E.= East

| <b>Producto</b>   | <b>Descripción</b>                 | <b>Unidades</b> | <b>Precio (US\$)</b> |
|-------------------|------------------------------------|-----------------|----------------------|
| p-Xileno          | US Gulf, spot f.b.o. export        | lb              | 0.47-0.69            |
| p-Xileno          | US Gulf, contract del.             | lb              | 0.55-0.80            |
| Etilenglicol      | Polyester, tanks, f.o.b.           | lb              | 0.62-0.80            |
| Etilenglicol      | Anti-freeze tanks, f.b.o.          | lb              | 0.65-0.80            |
| Etilenglicol      | Industrial-grade, f.o.b.           | lb              | 0.65                 |
| Etilenglicol      | Monobutyl ether tanks, divid. E.   | lb              | 0.65                 |
| Ácido tereftálico | Purified, t.t. t.c., f.o.b., Works | lb              | 0.41-0.43            |

A su vez, se pueden observar los precios actuales de la resina de PET virgen según su clasificación en volumen de producción y los precios de la resina reciclada en las siguientes ilustraciones:

**Tabla 1- 9.** Precio de la resina del PET en US cents por libra de resina. (sin rellenar, color natural, FOB supplier (free on board supplier), a no ser que se indique lo contrario)

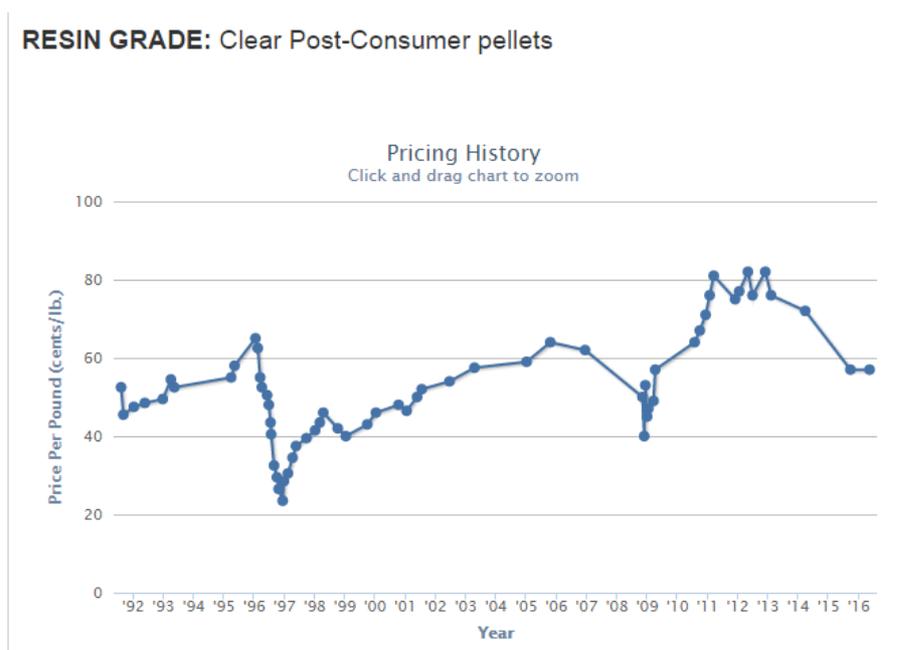
I= Volúmenes anuales mayores que 20 millones de libras.

II= Volúmenes anuales entre los 2 y los 5 millones de libras.

Precios 9 de mayo de 2016, [21]

| PET            |                      |       |
|----------------|----------------------|-------|
| Resina/Grado   | Categoría de volumen |       |
|                | I                    | II    |
| APET           | 89-91                | 92-94 |
| Resina botella | 83-85                | 86-88 |
| CPET           | 87-89                | -     |

Se realiza la comparación de los precios actuales de pellet reciclado y virgen en vista de los datos expuestos, se observa que el precio del pellet de PET virgen varía muy poco según su uso, encontrándose aproximadamente entre 83-91 US cents por libra. Al igual que, al observar la gráfica de la fluctuación del precio de la resina reciclada de PET, la resina post-consumo. Se observa que tuvo un máximo histórico en 2012 de 86 US cents por libra encontrándose en la actualidad el precio a 57 US cents/libra, siendo su máximo 61 y su mínimo 53.



**Figura 1- 17.** Gráfica representativa de la fluctuación del precio del pellet post-consumo desde el año 1992 a 2016. El precio se encuentra en céntimos por libra. [22]

Un ensayo del Grupo de Trabajo Petcore [23] sostiene que el APET contiene en la actualidad más del 50% de rPET, debido a que la demanda de envases de PET termoformados sigue aumentando se está creando la necesidad de una buena solución de reciclaje. El objetivo del Grupo de Trabajo Petcore, que comprende más de 30 empresas y organizaciones de la industria y la gestión de residuos, es mantener y aumentar la proporción de termoformados de PET en el mercado europeo mediante la mejora de su imagen como el mejor material de embalaje, mediante el suministro de soluciones sostenibles y fiables al final de su vida.

En la actualidad, la demanda anual de termoformados de PET se estima en 800.000 toneladas, de las cuales más de 400.000 toneladas viene de PET reciclado post-consumo (r-PET).

Por tanto, en conclusión, la respuesta del mercado será mediante una gran presión por parte de nuevas legislaciones a escala global ya que la demanda privilegiará a los productos con un perfil sostenible. Otro asunto importante para el sector se encuentra en torno a los precios de PET postconsumo, que se ven distorsionados por la dinámica de exportación de materiales y por los cambios cíclicos en los precios de la resina virgen.

## 1.4 EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL PET

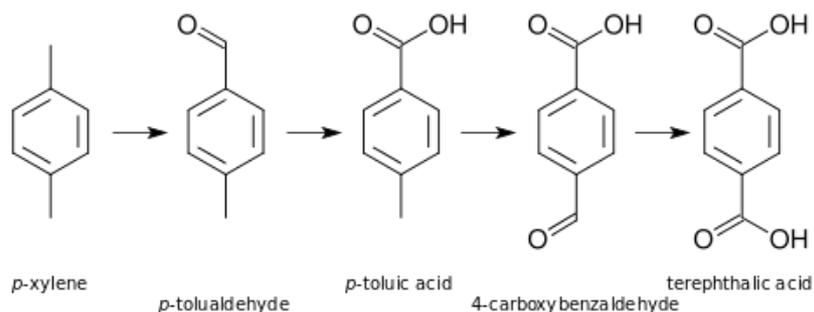
### 1.4.1 Reacciones principales

La producción del polietileno tereftalato se realiza industrialmente a partir de dos productos, ácido tereftálico (PTA) y etilenglicol (EG). También puede obtenerse usando dimetiltereftalato (DMT) en lugar de ácido tereftálico.

En primer lugar, se debe producir PTA. La producción de PTA se realiza mediante distintos procesos, a continuación, se presentan las diferentes tecnologías de producción de PTA:

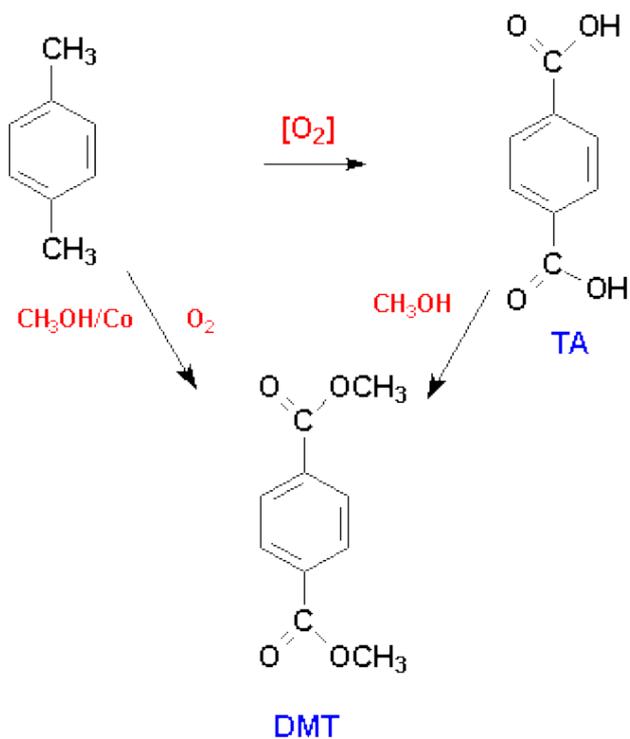
1. **Oxidación directa de paraxileno:** Proceso Amoco, proceso Toray, proceso Mitsubishi Kasei y proceso Eastman.
2. **Hidrólisis de DMT:** Proceso Dynamite Nobel, proceso Witten, proceso Sulzer Chemtech/H&G Hegmanns.
3. **Oxidación del tolueno:** Proceso Henkel II y proceso PRP.
4. **Otros:** Proceso Du Pont, proceso Lummus, proceso Henkel I y proceso Mitsubishi.

El proceso más utilizado para su producción es el proceso Amoco. Este proceso parte del compuesto p-xileno que, tras una serie oxidaciones catalizadas se convierte en ácido tereftálico.



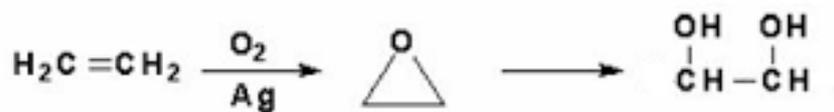
**Figura 1- 18.** Esquema del proceso Amoco. [24]

Si se quisiera usar dimetiltereftalato en lugar de PTA, únicamente se necesitaría realizarle al PTA una esterificación posterior.



**Figura 1- 19.** Esterificación de PTA a DMT. [25]

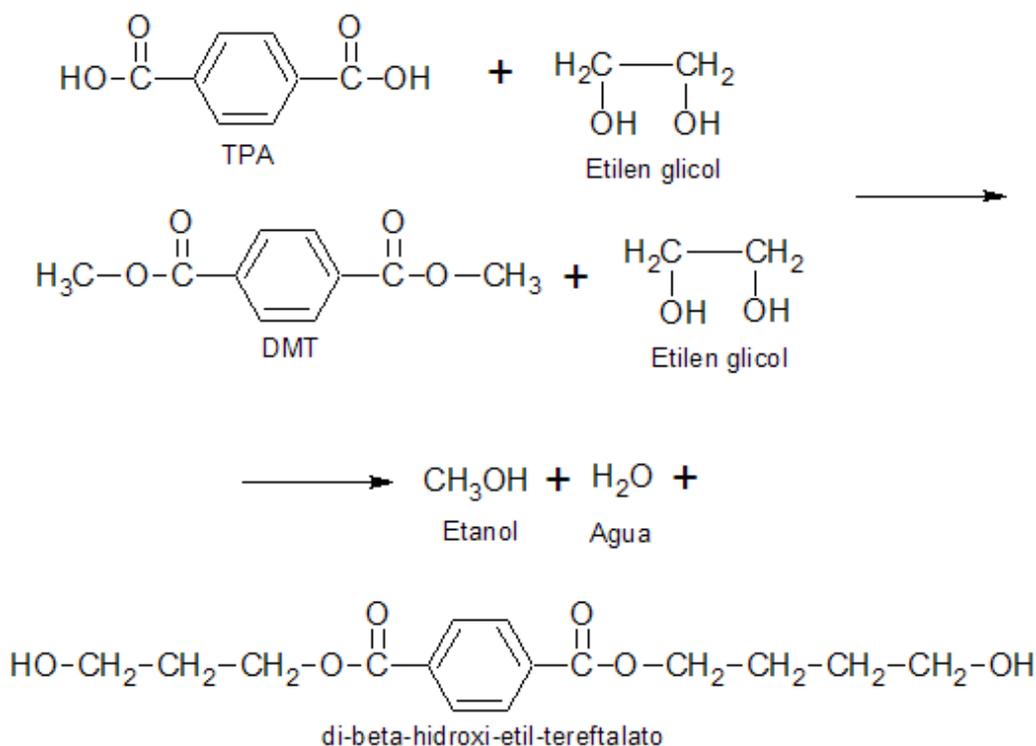
Seguidamente, se necesita etilenglicol el cual se produce a partir de etileno. El etileno es tratado con oxígeno en presencia de un catalizador dando lugar a óxido de etileno, el cual al reaccionar con agua en presencia de un ácido se transforma en etilenglicol.



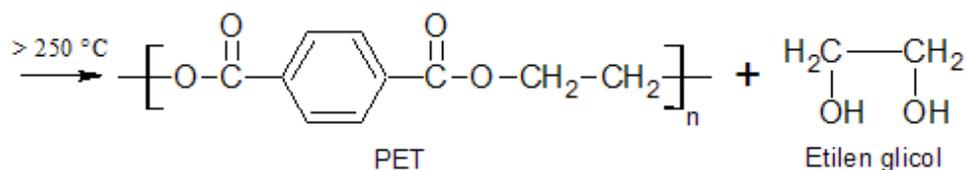
**Figura 1- 20.** Reacción de producción de etilenglicol. [26]

Finalmente, se realiza una reacción de esterificación del PTA con etilenglicol obteniendo el compuesto bis-beta-hidroxi-etil-tereftalato, que tras una sucesiva policondensación se polimeriza en polietilentereftalato.

#### Esterificación



#### Policondensación



**Figura 1- 21.** Reacciones de producción de polietilentereftalato. [27]

A continuación, se presentan algunas de las ventajas de la utilización de PTA sobre la de DMT [Paranjbe y Mathur, 1987]:

- Se requiere alrededor de un 15% menos de poliéster producido usando PTA.
- La densidad aparente del PTA es de 1,0 ton / m<sup>3</sup> siendo la del DMT 0,5 ton / m<sup>3</sup>, por lo que los costes de transporte y los requisitos de almacenamiento de PTA son más bajos.

- El proceso de PTA requiere una relación molar de alimentación menor de glicol. Para PTA 1,2 siendo de 1,6 para DMT.
- El DMT se alimenta al proceso de esterificación en forma fundida mientras que el PTA no puede fundirse.
- La reacción de esterificación de PTA no requiere ningún catalizador mientras que la transesterificación de DMT tiene que ser catalizada.
- Con PTA es más simple de mantener un grado constante de esterificación. En el caso de DMT, la etapa de transesterificación es muy sensible a la calidad de la materia prima.
- Usando PTA el subproducto es agua mientras que con DMT es metanol.
- Mediante el proceso de PTA es más fácil de recuperar el polímero.
- El producto de PTA tiene mejor estabilidad térmica e hidrolítica.
- El coste del producto en el caso de PTA es menor, debido a la disminución de las necesidades de materia prima, transporte y de tramitación.

#### 1.4.2 Reacciones secundarias indeseadas

Se encuentran dos reacciones secundarias indeseadas durante la producción del polietileno tereftalato:

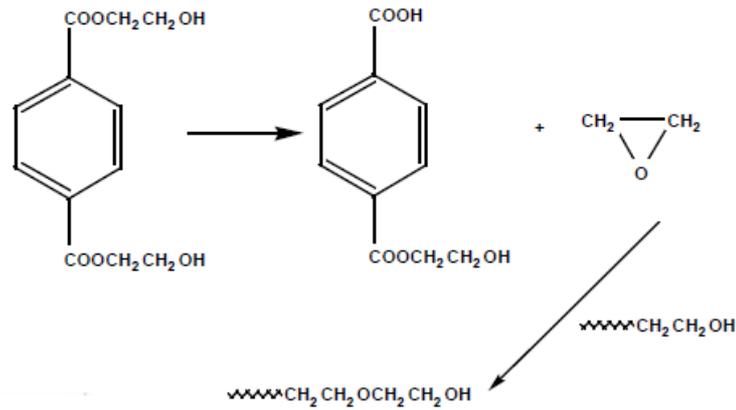
- La formación de DEG o dietilenglicol.

El DEG es un producto indeseable en la reacción de formación del monómero. Este compuesto disminuye la estabilidad térmica al introducir grupos éter en la cadena polimérica. Para minimizar su formación, se desplaza la reacción secundaria que la origina hacia el lado del monómero. Esto se logra añadiendo DEG en el primer reactor de esterificación, a fin de mantener su presencia a un nivel estable y constante a lo largo de todo el proceso. Se recibe en contenedores especiales y es bombeado a un tanque.

El efecto del aumento de DEG contenido sobre las propiedades del PET:

- Reducción de la resistencia al calor y a la luz.
- Disminución de la temperatura de transición vítrea y de fusión.
- Disminución de la resistencia térmica y de la resistencia a la degradación oxidativa.
- Aumento de la capacidad de tinción en un 1,5% – 2,5%.
- Ralentización de la cinética de cristalización.
- Disminución de la dureza y de la rotura de las pastillas.

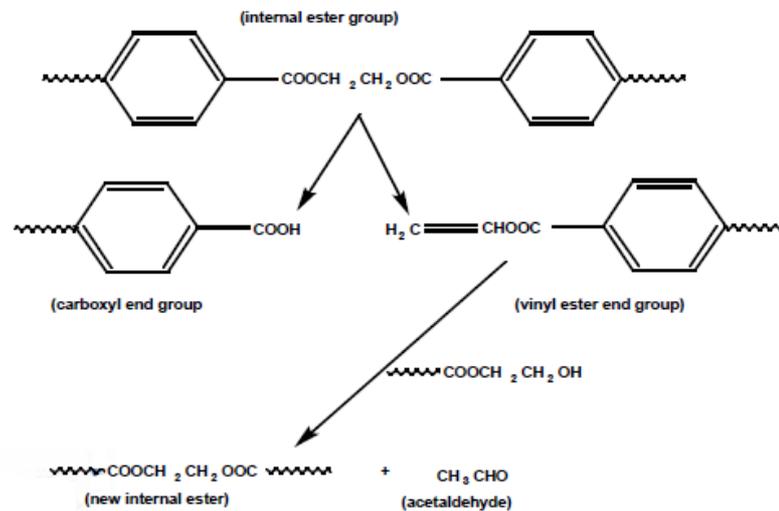
$$T_m (^{\circ}C) = 261 - (wt\% \text{ of } DEG \cdot 4,2)$$



**Figura 1- 22.** Formación de DEG en la producción de PET. [28]

- La formación de acetaldehído (AA).

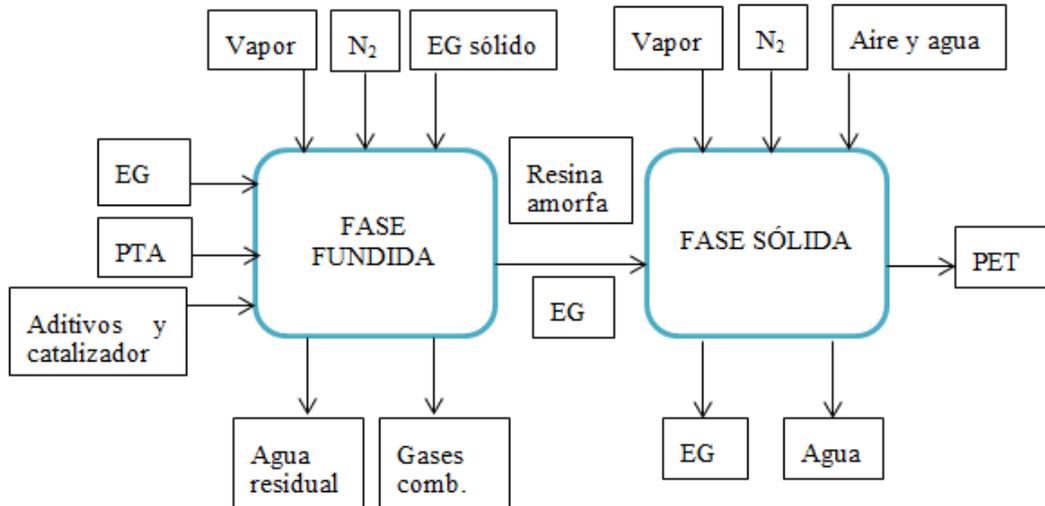
El acetaldehído (AA) [29] es un compuesto que existe de forma natural en muchas frutas cítricas y otros alimentos. Tiene un sabor ácido característico. El AA se genera en pequeñas cantidades durante el proceso de polimerización del PET en la fase fundida y se elimina en la etapa de polimerización del estado sólido. Se ha de decir que la cantidad de agua presente no influye en la generación de AA y que existe una relación que postula que, a mayor temperatura de fusión, mayor generación de AA.



**Figura 1- 23.** Formación de acetaldehído en la producción de PET. [28]

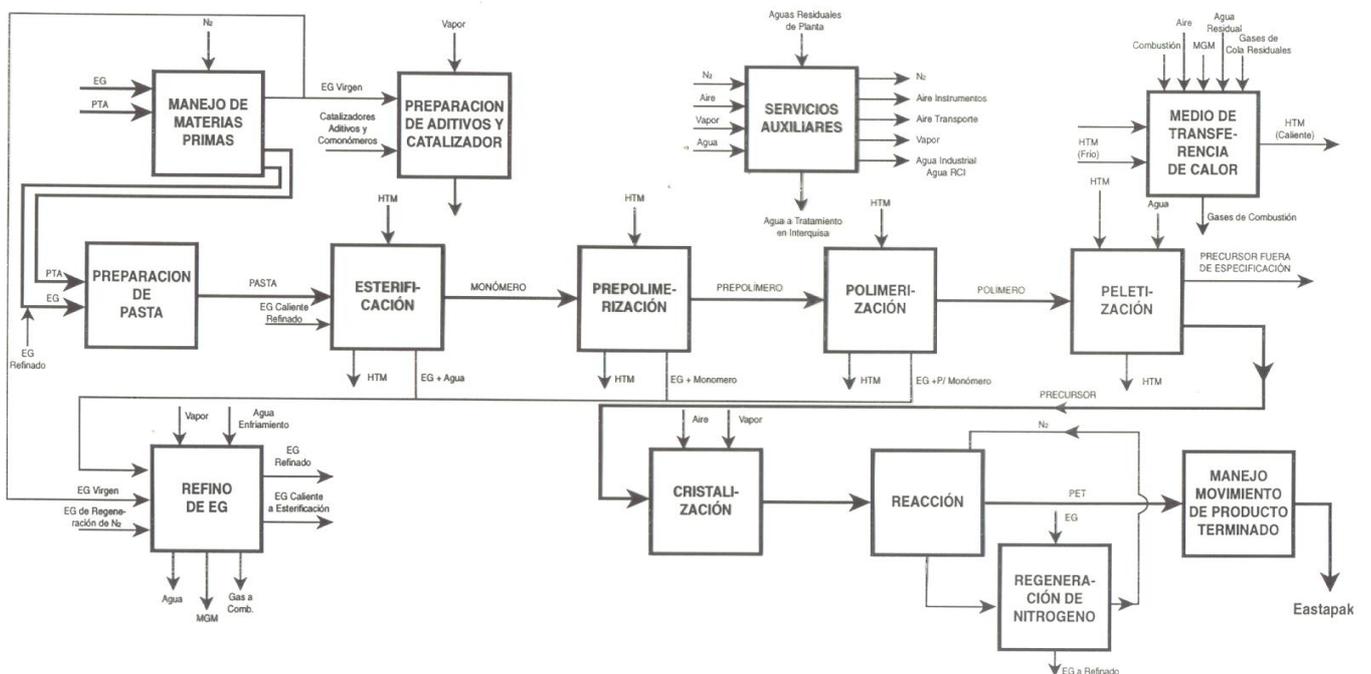
### 1.4.3 Diagrama de proceso

El proceso de producción de PET se compone en dos fases, una fase fundida y una fase sólida. A continuación, en la Figura 1-24 se expone el diagrama de bloques simplificado del proceso. El proceso comienza introduciendo una serie de materias primas en la fase fundida siendo el producto de esta fase la resina amorfa de PET que tras el paso por la fase sólida se convierte en el producto final: la resina de PET.



**Figura 1- 24.** Diagrama de bloques simplificado de producción de PET.

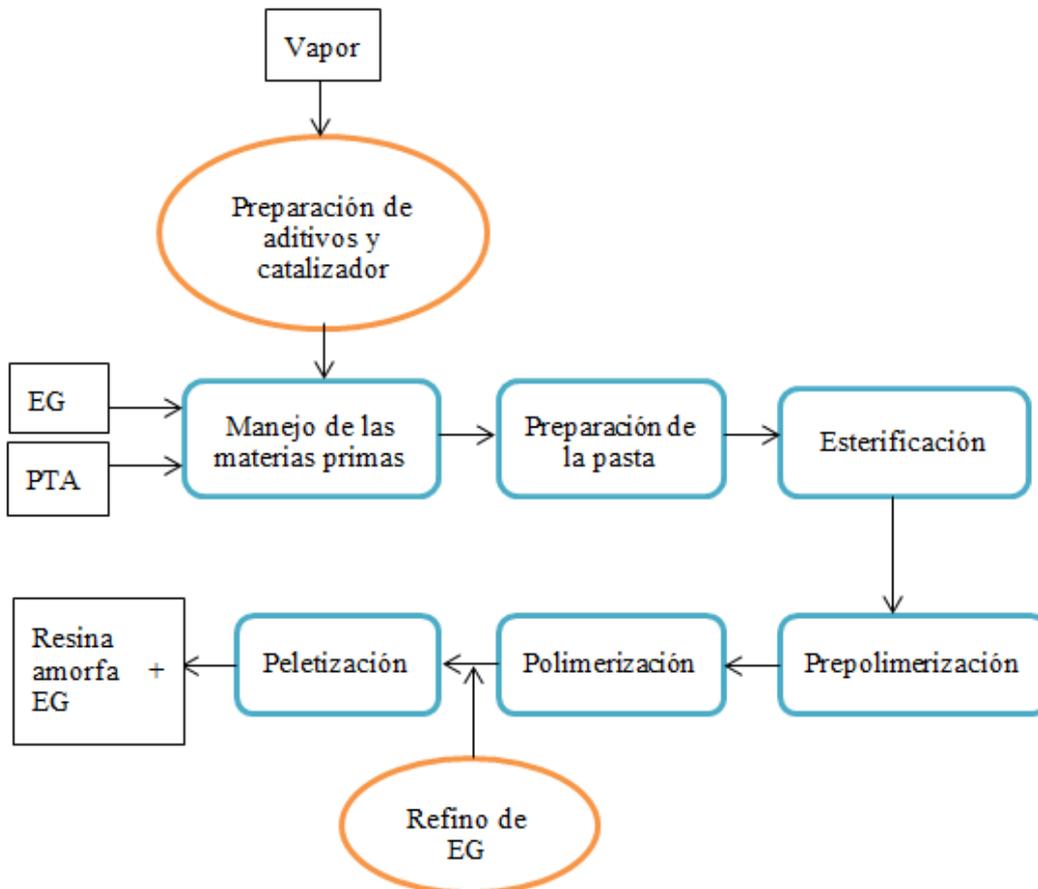
Seguidamente, en la Figura 1-25 se expone el diagrama de bloques detallado de la producción de PET. El diagrama lo componen una serie de bloques en los que se especifica la entrada y salida de materia. Se comienza por el manejo de materias primas y la preparación de los aditivos y catalizador, finalizando con el manejo del producto final terminado.



**Figura 1- 25.** Diagrama de bloques detallado de producción de PET.

### 1.4.3.1 Etapas de la fase fundida

La primera fase se subdivide en 7 etapas y se le denomina fase fundida debido a que el material que se maneja se encuentra en estado líquido con aspecto viscoso. Durante la fase fundida se mezclan las dos materias primas dando lugar a un prepolímero, mediante la reacción de esterificación, al que se le llama precursor (polímero de PET en forma amorfa).



**Figura 1- 26.** Diagrama de bloques de la fase fundida.

#### 1. Materias primas

Se reciben y almacenan las materias primas: etilenglicol virgen (EG), ácido tereftálico purificado (PTA), ácido isoftálico (IPA), dietilenglicol (DEG) y el resto de aditivos necesarios.

- El PTA se almacena en silos en forma de polvos al igual que el IPA. El IPA se usa para favorecer la formación de copolímeros.
- Tanto el EG, DEG como los aditivos y el catalizador se almacenan en tanques.

#### 2. Preparación de aditivos y catalizadores

Se preparan el catalizador de trióxido de antimonio ( $Sb_2O_3$ ), el aditivo de fósforo (ácido fosfórico) y los toners (colorantes) de la misma forma: El material en cuestión, en polvo, se disuelve en un tanque de preparación

con etilenglicol (EG) caliente hasta la concentración deseada y posteriormente se agita y se vierte en el tanque de alimentación.

### 3. Preparación de pasta

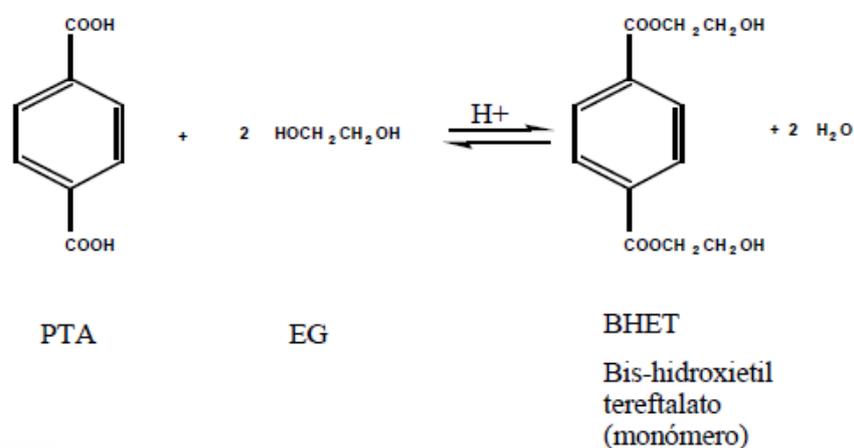
Se alimenta en continuo PTA e IPA a través de sus respectivos alimentadores de tornillo al tanque de preparación de pasta, que tiene una agitación permanente y está a temperatura ambiente. A este tanque también se alimenta EG refinado para que la relación molar de EG-ácidos sea constante (en exceso de EG). Finalmente, la pasta es bombeada hacia el primer reactor de esterificación.

Debido a la alta viscosidad y alto contenido en sólidos se utilizan bombas de tornillo helicoidales para el movimiento de la materia.

### 4. Esterificación

En esta fase se emplean dos reactores de esterificación dispuestos en serie.

Al primer reactor llega la pasta procedente del tanque de pasta siendo también introducida una corriente de EG para aumentar el exceso de este reactivo y desplazar la reacción de esterificación hacia la derecha:



**Figura 1- 27.** Reacción de esterificación. [30]

Para desplazar la reacción hacia la derecha se extrae el agua formada que se lleva hasta la columna de agua. La temperatura en esta fase es de alrededor de 260°C y la presión ligeramente superior a 1 kg/cm<sup>2</sup>. El reactor está calentado por serpentines internos y una camisa externa por los que fluye HTM. El tiempo de residencia en este primer reactor está en torno a 3.5 h y la conversión alcanzada es > 90%.

Los monómeros y oligómeros del primer reactor pasan al segundo reactor de esterificación ayudados por la menor presión de trabajo en este equipo (ap. 0.4 kg/cm<sup>2</sup>), mientras que la temperatura se mantiene alrededor de 265°C. En este reactor, el tiempo de residencia es ligeramente superior a 1 h y se continúa extrayendo el agua

producida durante la reacción, que mezclada con vapores de EG se envían a una columna de agua para su separación. En este segundo reactor continúa la reacción de esterificación con la que se llega a alcanzar conversiones por encima del 95%, respecto al PTA.

En la reacción de esterificación, se elimina agua en el proceso con PTA y metanol en el proceso con DMT.

## **5. Prepolimeración**

Los monómeros y oligómeros del segundo reactor de esterificación pasan al reactor de prepolimerización ayudados por el vacío al que se trabaja en este reactor.

En este reactor tienen lugar la reacción de policondensación, aumentando la longitud de la cadena molecular hasta unos 20 eslabones (prepolímero), lo que equivale a una viscosidad de 0.2-0.3, y se libera EG que se retira por el sistema de vacío y es condensado para su recirculación. Esta reacción está catalizada por el  $Sb^{3+}$ . También se alimentan aquí el aditivo de fósforo y los toners para controlar el color del producto.

La temperatura del reactor se mantiene en torno a los 285°C, mediante un fluido calefactor que se vaporiza por contacto con el HTM. El tiempo de residencia es ligeramente superior a 1 h.

## **6. Polimeración**

El prepolímero entra al reactor final de polimerización (Reactor Karl- Fischer horizontal) impulsado por una bomba de desplazamiento positivo. En él continúa la reacción de policondensación en estado fundido hasta  $n \approx 100$  ( $IV \approx 0.6$ ), en condiciones de alto vacío y una temperatura de trabajo de 280-290°C, mediante el empleo de un fluido térmico que se vaporiza en contacto con el fluido de calentamiento primario. El valor final de viscosidad depende del producto que se esté fabricando en cada momento. Como en el reactor anterior, el EG producido es retirado por el sistema de vacío y el tiempo de residencia es en torno a 1 h.

## **7. Peletización**

La finalidad de esta etapa es solidificar el polímero líquido que sale del reactor final y cortarlo en trozos pequeños llamados pelets.

El polímero líquido se impulsa por una bomba hasta los cabezales de extrusión de la peletizadora de donde sale en forma de hilos de polímero fundido. Este haz de hilos se enfría con agua pulverizada que hace solidificar progresivamente al material. Cuando el material aún no está totalmente solidificado los hilos llegan a las cortadoras que los transforman en pelets.

A continuación, los pelets se secan con aire y pasan a una tamizadora donde los de tamaño superior al deseado se separan, y el resto se envía a una tolva para su almacenamiento mientras en el laboratorio se analizan sus propiedades (IV, Color, DEG, IPA, Catalizadores, P).

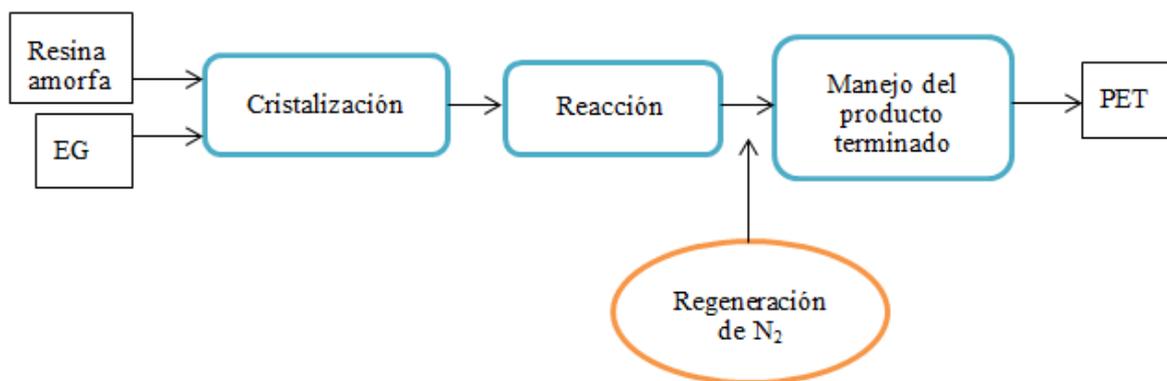
El resultado final de la fase fundida es un material peletizado translucido y en estado amorfo.

### 1.4.3.2 Etapas de la fase sólida

En la fase sólida tiene lugar la finalización del proceso de policondensación iniciado en la fase fundida. El objetivo de esta fase es aumentar el peso molecular de las cadenas de polímeros, es decir, su grado de polimerización hasta contar con unas 120 unidades de promedio, lo que equivale a una viscosidad inherente de entre 0,68 y 0,76. Y, además, conseguir una cristalización parcial del producto final con lo que se consigue la no adherencia cuando se procesa.

Esta fase trabaja a una menor temperatura que la fase fundida con lo que se producen menos reacciones secundarias indeseables y degradación del producto.

Por lo tanto, en la fase sólida, los pelets amorfos de la fase fundida, ya en estado sólido, aumentan su viscosidad y cristalizan transformándose en pelets opacos de color blanco.



**Figura 1- 28.** Diagrama de bloques de la fase sólida.

#### 1. Etapa de cristalización

La finalidad de la etapa de precristalización es cristalizar los pelets para evitar que se peguen durante el proceso de reacción posterior.

Los pelets de PET de la fase fundida se transfieren por transporte neumático hasta el precristalizador donde se calientan con aire caliente a unos 170°C, en lecho fluidizado para evitar que se peguen entre sí. Los pelets salen por rebose y llegan al cristalizador donde continúan siendo calentados por aire caliente que se suministra en forma pulsante. El aire empleado para calentar a los pelets se calienta mediante vapor de alta presión.

Al final de la etapa de cristalización los pelets han alcanzado la mayor parte del nivel de cristalización deseado, y son enviados por transporte neumático hacia la siguiente fase.

## 2. Etapa de reacción

El objetivo de la etapa de reacción es aumentar la viscosidad del polímero y lograr una temperatura de fusión uniforme del producto. En esta fase se mantienen los pelets en contacto con una atmósfera de N<sub>2</sub> caliente.

Los equipos necesarios para esta fase son:

- **Pre calentador:** tiene unas resistencias eléctricas que calientan el N<sub>2</sub> circulando de abajo a arriba, en contracorriente con los pelets.
- **Reactor:** Es un recipiente cilíndrico de gran altura donde los pelets fluyen hacia abajo, en contracorriente con N<sub>2</sub> caliente a unos 210°C. El N<sub>2</sub> retira el agua, el etilenglicol, otros productos obtenidos durante la policondensación y reacciones colaterales como la de acetaldehído. La reacción de policondensación es exotérmica por lo que se genera calor en esta fase. En este equipo es donde se consigue la mayor parte de la uniformidad en cuanto a las temperaturas de fusión de los pelets.
- **Enfriador:** Los pelets salen por la parte inferior del reactor y son transferidos al enfriador, donde circulan en contracorriente con N<sub>2</sub> frío, para detener la reacción de policondensación.

## 3. Etapa de regeneración de nitrógeno

El N<sub>2</sub> cargado de las impurezas que ha retirado anteriormente, se regenera mediante condensación en contacto con EG frío y por su paso a través de unos lechos de adsorción.

## 4. Almacenamiento de producto final

El producto final que sale de los enfriadores se envía a las tolvas de análisis a la espera de su clasificación. A continuación, se transfiere a los silos de producto final. Desde donde se carga en cisternas o en sacas, para su envío a los clientes.

### 1.4.3.3 Tecnologías de polimerización de PTA a PET

#### A. SSP (Solid State Polymeration)

La tecnología SSP [31] se utiliza para aumentar el peso molecular y para reducir aún más el contenido de AA. Hoy en día, la polimerización en estado sólido de PET es utilizada en más de un tercio de la producción mundial de PET.

En primer lugar, un prepolímero con un IV intermedio se produce a partir de DMT o PTA y EG por un proceso de fusión. Este prepolímero es polimerizado adicionalmente en la fase sólida a una temperatura superior a la temperatura de transición vítrea, pero por debajo del punto de fusión cristalino en presencia de una corriente de un gas inerte o bajo un vacío.

El proceso SSP se compone de dos tipos de reacciones, la de policondensación y la de difusión de los subproductos de la reacción. Los prepolímeros de PET producidos comercialmente tienen por lo general forma de gránulos con valores de IV de 0,55-0,65 dl / g.

Las ventajas de la polimerización en estado sólido frente a las demás son:

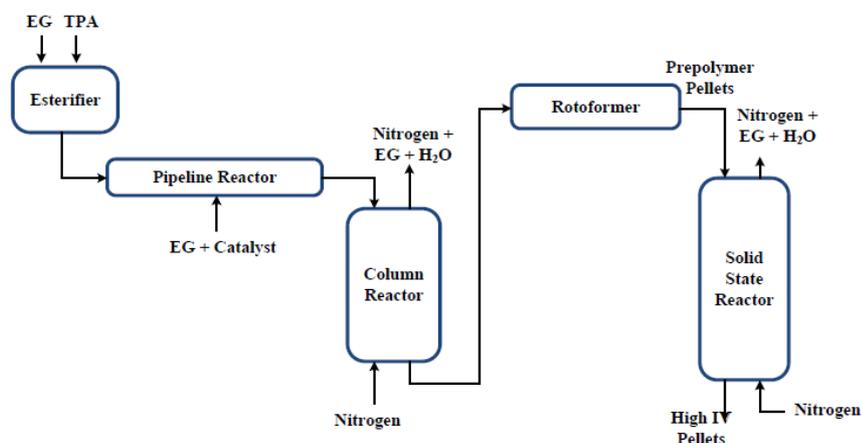
1. Los problemas asociados con la agitación de la masa fundida viscosa se eliminan.
2. Menor inversión y costes de funcionamiento ya que no requiere altas temperaturas ni vacío como lo hacen las otras dos opciones.
3. Las reacciones secundarias y las de degradación están limitadas debido a que las temperaturas de proceso utilizadas son bajas.

### CARACTERÍSTICAS DE SSP DEL PET

La cinética de SSP del PET es bastante diferente a la de la polimerización en masa fundida. Independientemente del tamaño de partícula y del contenido de carboxilo del prepolímero utilizado, el SSP del PET se caracteriza porque no existe un último IV para cada prepolímero a cada temperatura, sino que una vez alcanzado el IV requerido el PET deja de polimerizar incluso si el SSP continúa. El IV final aumenta con el aumento de prepolímero y con la temperatura de SSP.

#### **B. Proceso IPT (Invista Performance Technologies)**

Invista, antes DuPont, produce PET cargando EG y PTA en un esterificador donde el producto esterificado junto con EG y el catalizador se alimenta a un reactor de tubería. Y, seguidamente, el producto del reactor de tubería se alimenta a un reactor de columna para aumentar el grado de polimerización. Se usa un sistema de circulación de nitrógeno en circuito cerrado que permite la eliminación del vacío del sistema. El polímero resultante IV de 0,2 se alimenta a un Rotoformer que finalmente se dirige a SSP para producir gránulos de alta IV.

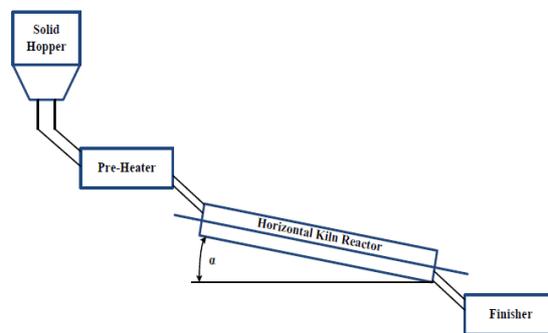


**Figura 1- 29.** Proceso Invista Performance Technologies. [32]

Mediante este proceso se produce un polímero de baja/intermedia IV, por lo que luego se lleva a cabo la mayor parte de la polimerización en estado sólido en lugar de depender de la planta en estado fundido para producir un prepolímero con un intermedio/alto IV (típicamente 0,6-0,65).

### C. M&G Easy up process

M & G utiliza SSP para llegar a IV requerido. Después de calentar el prepolímero procedente de polimerización en fase fundida en el precalentador, la reacción se tiene que realizar en una atmósfera de gas especial, lo que permite el uso de equipos de tamaño más pequeño. Un reactor de tipo horno horizontal garantiza un flujo pistón perfecto equivalente a 500 CSTR mientras que la serie de reactores ordinarios son equivalentes a 10 CSTR en serie. El producto del reactor se envía a un finalizador donde se lleva a cabo la polimerización final tras la cual el producto se enfría y forma cristales. El siguiente esquema muestra la sección SSP solamente:



**Figura 1- 30.** Sección SSP de M & G Easy up process. [32]

### D. Uhde- Inventa- Fischer 2R process

El modelo MTR (Melt-To-Resin) es destacado por basarse en la tecnología de 2-Reactor. Esta tecnología patentada por Uhde Inventa-Fischer 2R se utiliza para producir PET y otros poliésteres tales como PBT, PTT o PEN. La tecnología 2R cubre toda la gama de viscosidades y propiedades de los productos comercializables que permitan su uso en aplicaciones textiles, envases y plásticos de ingeniería.

El proceso se compone de un reactor de torre y de un finalizador (discage) o finalizador de estado sólido. La esterificación se realiza en el reactor de torre, donde la suspensión de PTA y diol se prepara a una relación molar baja y son alimentados bajo presión o bajo vacío a temperaturas de entre 170 ° C a 270 ° C.

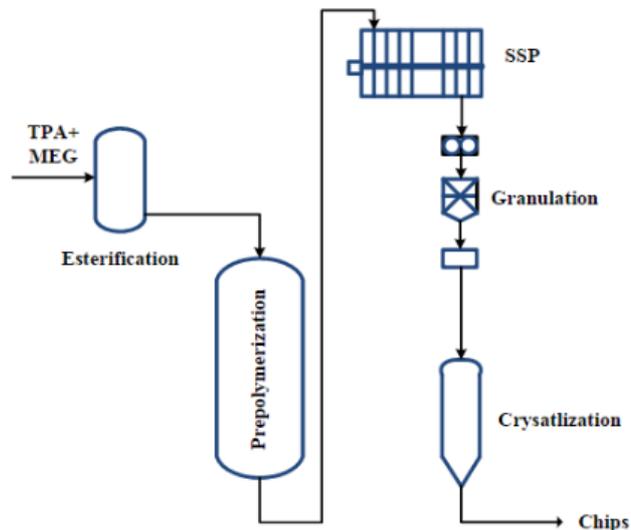


## 5. Lurgi Zimmer DHI process

El proceso de DHI se basa en la esterificación- transesterificación de PTA puro / EG.

El PTA puro se mezcla con EG y con la pasta de catalizador y se introduce en el sistema de esterificación. El material dividido de la esterificación-transesterificación se hace pasar a una columna para la recuperación de materias primas.

Los productos de la esterificación se alimentan a la pre-policondensación donde la reacción se realiza bajo vacío, siendo luego enviados a la policondensación final. La policondensación se lleva a cabo bajo vacío y a alta temperatura en el reactor SSP



**Figura 1- 33.** Proceso de Lurgi Zimmer policondensación DHI

## 6. Eastman IntegRex

Eastman resolvió el problema de hacer que todo el proceso de polimerización se realizara en la fase fundida mediante el uso de un reactor tubular. A diferencia de los procesos convencionales que elevan la IV usando SSP, la tecnología IntegRex eleva el IV en la fase fundida aproximadamente 0,75, que es tres veces superior al valor alcanzado por otras tecnologías en la fase de fusión. El vacío aplicado en el reactor tubular permite una fácil extracción de subproductos y elimina el problema de la transferencia de masa.

Como se muestra en la Figura 1-34, la retroalimentación que puede ser sólido o una solución de PTA se introduce con EG a un bucle de circulación, donde la alimentación se disuelve por el producto de esterificación con la ayuda de la temperatura a través del intercambio de calor con un fluido calefactor. Los gases procedentes de la esterificación se envían a una columna de destilación para separar el agua del EG.

El BHET producido a partir de la esterificación se calienta y se envía a la tubería de polimerización que se divide en tres secciones. Cada sección tiene un IV distinto, mientras que el vacío aplicado aumenta a través de secciones. El intercambio de calor puede ser proporcionado entre las secciones. Los vapores de la

policondensación, principalmente EG, se condensan y se envían a una columna de proceso donde el EG puro es el producto de fondo que se recicla mediante recirculación.

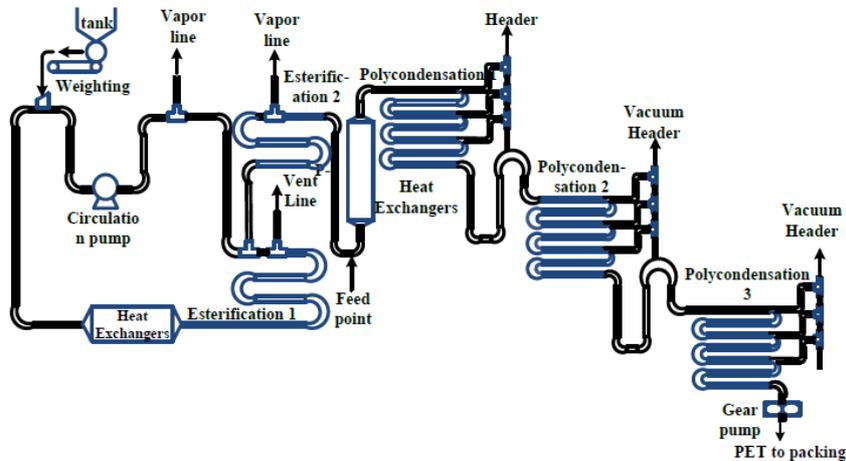


Figura 1- 34. Proceso Eastman IntegRex [32]

## 7. Etoxilación de PTA

Otra forma de producción de PET se basa en la fabricación directa del intermedio BHET a partir de óxido de etileno y PTA, usando el BHET como un monómero para obtener PET (en otros métodos de producción BHET aparece como producto intermedio en el reactor de polimerización).

Toyobo y Nippon Soda trabajaron en el desarrollo de esta ruta que se divide en dos pasos. En la primera etapa el BHET se produce mezclando óxido de etileno y PTA en el recipiente de mezcla en la proporción de 1: 3 a 1: 6 y un catalizador y / o solvente. La suspensión producida se alimenta al precalentador y seguidamente, directamente al reactor sellando la olla donde el producto se pulveriza. Las partículas pequeñas que están más frías se dispersan y se descargan a través de un transportador de tornillo a una unidad de almacenamiento de BHET. Durante la pulverización, el óxido de etileno se evapora por lo que será separado en óxido de etileno depósito de recuperación.

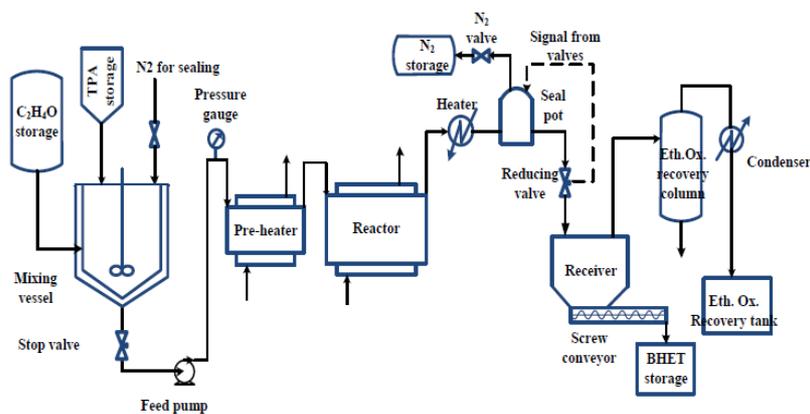
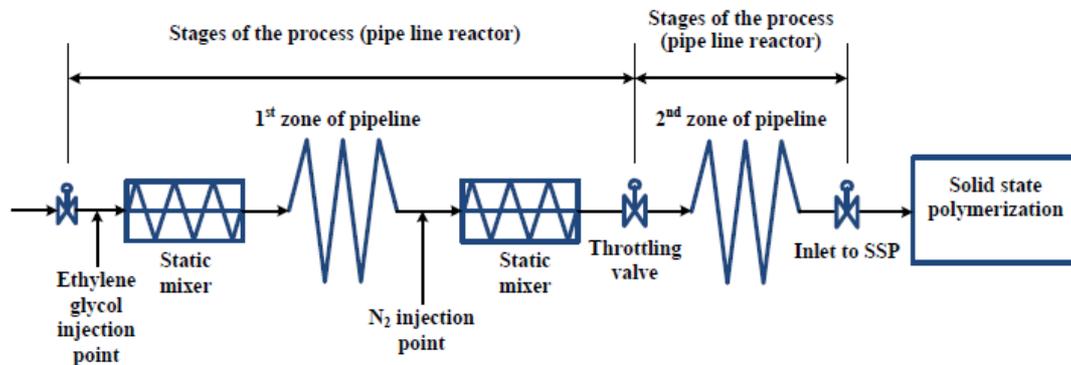


Figura 1- 35. Producción de BHET del método ethoxilation de PTA. [32]

En el segundo paso, los oligómeros de BHET (grado de polimerización entre 2 y 40), se polimerizan mínimo en dos etapas de reactores de tubería.



**Figura 1- 36.** Polimerización del método. [32]

Los primeros oligómeros de la etapa, en forma de masa fundida, después de la adición de EG se mezclan en un mezclador estático y seguidamente se alimenta al primer reactor tubular que opera bajo presión (230 a 2000 kPa).

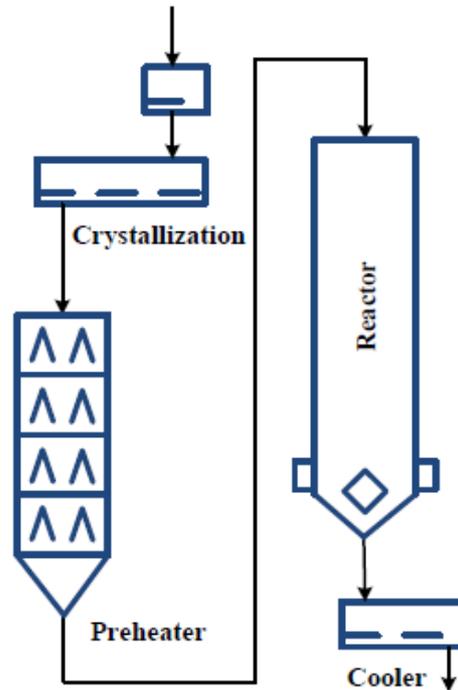
En la segunda etapa se inyecta un gas inerte bajo presión positiva con el fin de eliminar o reducir los problemas de las fugas de aire en el sistema que puede causar la degradación reacciones y desarrollo de colores en sistemas de polimerización de vacío tradicionales. Después se mezcla la mezcla de masa fundida y el gas inerte y se dirige al segundo reactor de tubería que opera a presión atmosférica o a vacío para producir un prepolímero que tiene un grado medio de polimerización 10-25 que posteriormente se alimenta a la unidad SSP.

## 8. Buhler process

El proceso Buhler convierte el PET escama reciclada de botellas post consumo en gránulos de grado botella. El proceso contiene cuatro etapas típicas para la producción de grado botella: cristalización, recocido, SSP y enfriamiento.

La alimentación de reciclaje amorfa de bajo peso molecular cristaliza por calentamiento en lecho fluidizado utilizando aire o nitrógeno a temperatura inferior a 185 ° C para evitar la oxidación (color amarillo).

El recocido se realiza para elevar el punto de fusión de los cristales a valores más altos utilizados en SSP para evitar la sinterización. Los cristales son introducidos en el reactor SSP aumentándose el grado de polimerización y finalmente, los gránulos se enfrían y se almacenan.



**Figura 1- 37.** Proceso Buhler de reciclaje. [32]

#### 1.4.4 Catalizadores y estabilizantes

A pesar de los inconvenientes que tiene el catalizador de antimonio en la policondensación son los más usados en los procesos de catálisis industrial, debido a que los resultados obtenidos en la investigación de otros catalizadores estables y baratos basados en titanio, aluminio y otros metales de transición, como molibdeno, cobalto y zirconio, no han resultado satisfactorios.

##### Catalizadores industriales usados actualmente

- ANTIMONIO [34], se emplean 3 compuestos distintos de antimonio:
  - $Sb_2O_3$ : la mayoría del poliéster se sintetiza con este catalizador.
  - $SbAc_3$ : se emplea para el 30% de la producción total de poliéster.
  - Glicolato de antimonio: se emplea en algunos casos.

Es importante para el éxito de todos estos catalizadores la correlación entre el precio y el rendimiento del producto.

- GERMANIO [35], la mayor parte se consume por productores de poliéster japoneses, a los que les gusta el alto brillo del polímero para las aplicaciones de botella. El germanio se suele usar para la catálisis como óxido de germanio. El motivo principal para remplazar este catalizador es el precio (500 dólares/kg de dióxido de germanio puro).

### Desarrollo de nuevos catalizadores

La eficacia catalítica está relacionada con la calidad del polímero y con el coste de producción, cuanto menos catalizador mayor pureza del poliéster y más bajo es el coste.

La precipitación y la decoloración tienen varios efectos secundarios, como puntos negros creados por depósitos de antimonio metálicos en las paredes de las tuberías y reactor, y un tono verdoso-grisáceo o blanco-grisáceo en el polímero.

También la velocidad y nivel de cristalización del poliéster está influenciada significativamente por el tipo y concentración del catalizador. Los catalizadores de titanio proporcionan una baja velocidad de cristalización.

Un importante impacto durante el proceso con antimonio, es la reacción del oxígeno con glicol o glicolatos durante la esterificación y prepolicondensación, seguida de la formación de CO que reduce el  $\text{Sb}^{3+}$  presente en la mezcla de reacción para dar un precipitado grisáceo.

De todo esto se puede resumir los siguientes objetivos de desarrollo para un nuevo catalizador de poliéster:

- Mayor eficacia catalítica, alta velocidad de reacción en fase fundida y policondensación en fase sólida, baja concentración de catalizador y bajo coste.
- Alta pureza del polímero, color blanco, alta transparencia, filtrabilidad excelente y bajo contenido de oligómeros.
- Alta estabilidad térmica y oxidativa del polímero, pequeña generación de acetaldehído. No tóxico, inerte para el medioambiente, fácil manipulación y fácil aplicación.
- Sin impacto sobre el procesado: como hilado, soplado, o producción de películas.

### TITANIO

Hasta hoy los alcóxidos de titanio simples no desempeñan un papel como catalizadores para la producción de PET.

Las propiedades negativas de los alcóxidos de titanio simples son: la decoloración amarilla, la precipitación de  $\text{TiO}_2$  por hidrólisis unido a la baja reproducibilidad de la actividad catalítica y la inestabilidad térmica del poliéster.

Debido a la alta actividad catalítica y la posible aceleración de la reacción de esterificación, el titanio será una de las herramientas principales para el desarrollo de nuevos sistemas catalíticos.

### ALUMINIO Y ZEOLITAS

Durante la última década, los catalizadores basados en aluminio se han convertido en el centro de los desarrollos técnicos. Las primeras patentes que sugieren el aluminio como catalizador datan de antes de los 50, además desde hace 25 años que ya se han usado zeolitas como aditivos finamente dispersos para modificar las películas de poliéster.

El aspecto negativo de la zeolita como catalizador está en que para poder realizar la reacción de policondensación con éxito serían necesarias concentraciones de 900 ppm en zeolitas. Estos valores pueden reducirse si se utilizan zeolitas con un contenido original en agua de aprox 30% en peso, pero no es aconsejable ya que se ha demostrado que el secado de las zeolitas después de su síntesis proporciona una actividad catalítica más baja.

Por tanto, a parte del titanio y el aluminio sólo unos pocos elementos, como Sm, Sn, Fe, Mo, W y algunas combinaciones Mg-K-P y Zr-Si-Co se han propuesto como catalizadores de policondensación durante la última década.

Hasta hoy no hay sustituto comercial del antimonio a la vista, a pesar de que se han ensayado algunos de los catalizadores descritos a escala industrial.

### **Estabilizadores**

Finalmente decir que son necesarios otros componentes para llevar a cabo la Polimeración: los estabilizantes como triarilfosfitos o fosfatos, cuya misión es impedir la precipitación de sales tereftálicas de los elementos del catalizador que son insolubles.

## 1.5 Aplicaciones y usos

Actualmente, el PET tiene muchos campos de aplicación en distintos sectores debido a sus propiedades y características. Entre muchas otras, se encuentran las siguientes:

### A) ENVASES Y EMPAQUE

Se desarrollan envases para llenado a temperaturas normales y para llenado en caliente, con un rango de tamaño muy amplio, desde envases de 10 mililitros hasta garrafrones de 19 litros. Este material se ha convertido en esencial para el empaque de:

- Bebidas carbonatadas.
- Aguas minerales.
- Aceite, zumos, tés, etc.
- Conservas.
- Detergentes, productos químicos y lubricantes.
- Productos farmacéuticos y cosméticos.
- Productos alimentarios como los aderezos, encurtidos, salsas, mantequilla, carnes, lácteos, etc.

Además, los envases de PET molidos pueden ser usados como sustitutos de fibra en la dieta de borregos [36]. Así como en forma de film para producir radiografías, material fotográfico y filmográfico, etc.



**Figura 1- 38.** Ilustraciones de envases y empaques de PET. [37-38]

## B) MATERIAL ELECTRÓNICO Y ELÉCTRICO

Para la realización de material eléctrico y electrónico duradero debido a sus propiedades ignífugas, dieléctricas, térmicas y de estabilidad dimensional. Se emplea en:

- Películas muy delgadas para intercambiadores de un micrómetro hasta de 0.5 milímetros, utilizadas para aislamiento de motores.
- Como material dieléctrico, película PET empleada para telecomunicaciones.
- Como formas helicoidales y encapsulación eléctrica.
- Hacer los dispositivos eléctricos, paneles fotovoltaicos, interruptores y otros componentes críticos de energía más fuertes y fiables.



**Figura 1- 39.** Película de PET, material electrónico [39], material dieléctrico de PET [40]

## C) FIBRAS

En la industria textil, la fibra de poliéster sirve para confeccionar gran variedad de telas y prendas de vestir.

- Debido a su resistencia, el PET se emplea en telas tejidas y cuerdas, partes para cinturones, hilos de costura y refuerzo de llantas.
- Su baja elongación y alta tenacidad se aprovechan en refuerzos para mangueras.

- Su resistencia química permite aplicarla en cerdas de brochas para pinturas y cepillos industriales.

Además, debido a su dureza, también tiene su aplicación médica como material de reconstrucción de tejidos dañados en cirugía.



**Figura 1- 40.** Tela de PET [41] || Cerdas sintéticas de PET [42]

#### D) MATERIALES MECÁNICOS

Para la fabricación de repuestos que necesitan superficies duras, planas, buena estabilidad dimensional y ser resistentes al desgaste, como engranajes, levas, cojinetes, pistones, ruedas dentadas y en bastidores de bombas que soportan elevadas fuerzas de impacto. Esta es una ventaja para la tendencia existente de miniaturizar piezas.



**Figura 1- 41.** Piezas mecánicas de PET [43]

# 2 MEMORIA DESCRIPTIVA Y JUSTIFICATIVA

En la Figura 2-1, se muestra el diagrama de bloques completo del proceso de producción de polietileno tereftalato. En este apartado se procede a describir y justificar cada etapa del proceso de producción, desde la preparación de las materias primas hasta el almacenamiento del pellet de PET.

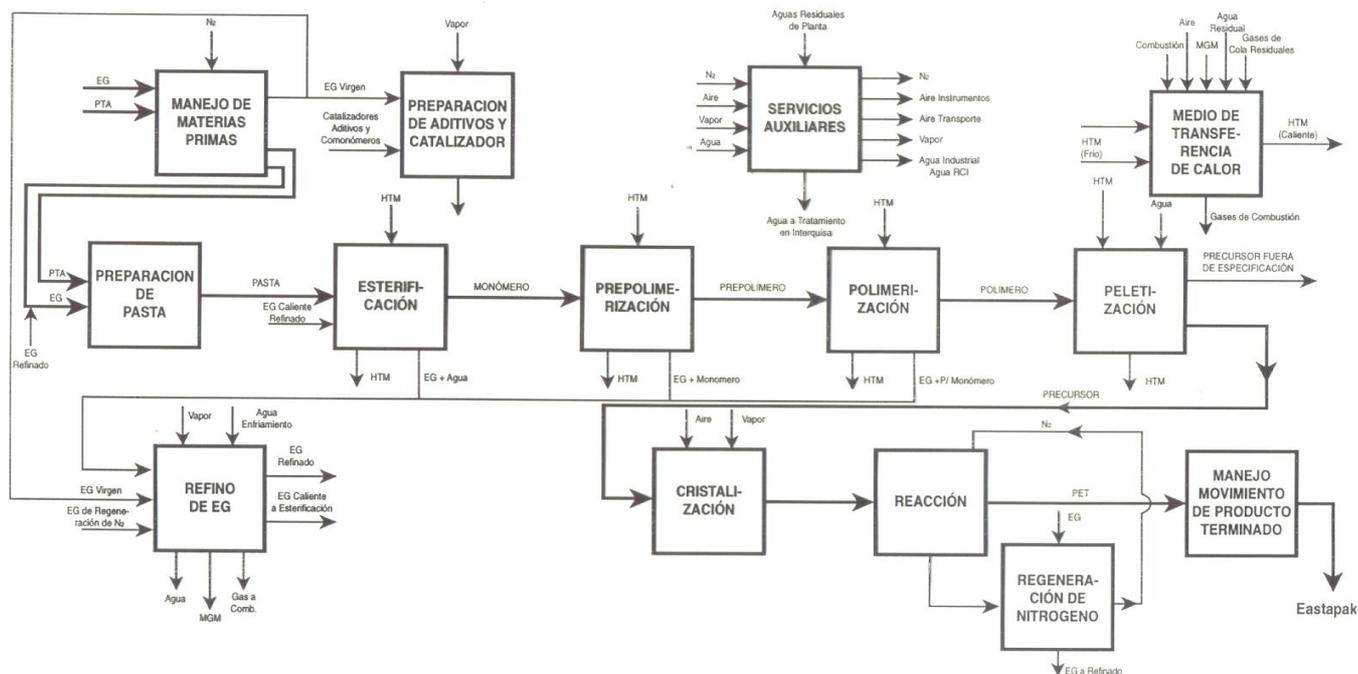


Figura 2- 1. Diagrama de bloques completo de la producción de PET.

## 2.1 FASE FUNDIDA

### 2.1.1 PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS, ADITIVOS Y CATALIZADORES

#### 2.1.1.1 Diagrama de flujo de la etapa

La primera etapa de la fase fundida de producción de PET consiste en la preparación de la materia prima, de los aditivos y del catalizador, por lo tanto, esta fase se encarga del acondicionamiento tanto de las materias primas principales como de las materias primas auxiliares.

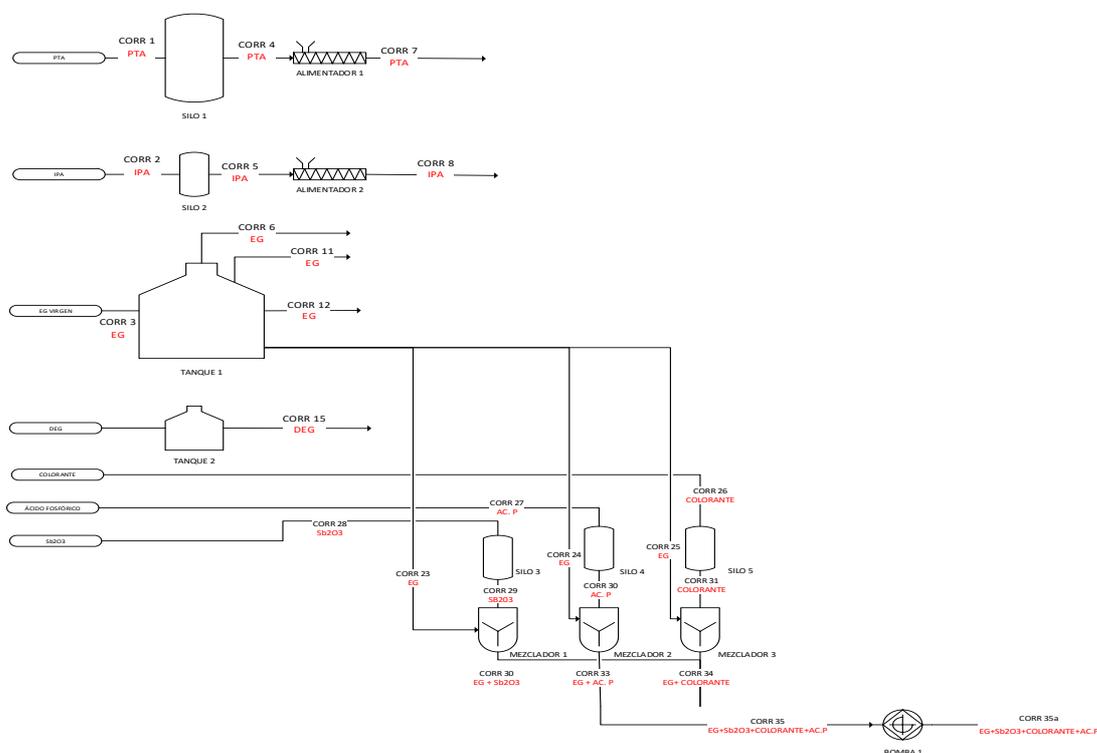
En la Figura 2-2, se aprecia que tanto el PTA (Corriente 1) como el IPA (Corriente 2) se encuentran contenidos en silos (*SILO 1, SILO 2*) en estado sólido (polvo) que, mediante transporte neumático se alimentan a sus respectivos alimentadores de tornillo (*ALIMENTADOR 1 Y ALIMENTADOR 2*) los cuales conducen estas materias primas al tanque de preparación de la pasta definido posteriormente.

El etilenglicol, por el contrario, se encuentra en estado líquido contenido en el *TANQUE 1*, tanque del cual fluyen varias corrientes. Como se observa en la Figura 2-2, las Corrientes 23, 24 y 25 son utilizadas para la

disolución de los diferentes aditivos del proceso, tanto el  $Sb_2O_3$  (Corriente 28) como el aditivo de fósforo (Corriente 27) como el colorante (Corriente 26), que se encuentran en estado sólido en sus respectivos silos (*SILO 3*, *SILO 4* y *SILO 5*). Estos aditivos se disuelven con EG mediante agitación rápida en sus respectivos mezcladores (*MEZCLADOR 1*, *MEZCLADOR 2*, *MEZCLADOR 3*) siendo la mezcla resultante (Corriente 35) posteriormente impulsada a la fase de prepolimerización mediante una bomba de tornillo helicoidal (*BOMBA 1*).

Así como, las demás corrientes que provienen del tanque de etilenglicol: la Corriente 6, se introduce directamente en el tanque de preparación de la pasta, la Corriente 11 se introduce en el sistema para la regeneración del etilenglicol del sistema, concretamente en el ciclón (*CICLÓN 1*) y la Corriente 12 se introduce directamente en el primer esterificador donde se da lugar el comienzo de la reacción de esterificación.

Finalmente, se observa que la Corriente 4 es de DEG. El dietilenglicol se encuentra en estado líquido en el *TANQUE 2*, esta corriente también es introducida directamente en el primer reactor de esterificación.



**Figura 2- 2.** Diagrama de flujo de la etapa de preparación de las materias primas.

### 2.1.1.2 Especificaciones de la etapa

En la Tabla 2-1 se resumen algunos parámetros importantes de las materias primas introducidas en el proceso, la densidad y el peso molecular. La materia prima principal es el etilenglicol y el ácido tefáltico puro, así como las auxiliares son el ácido isotefáltico, el dietilenglicol, el colorante, el aditivo de fósforo y el catalizador.

**Tabla 2- 1.** Densidades y pesos moleculares de las materias primas del proceso.

| <b>Material</b>                | <b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>PM (g/mol)</b> |
|--------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| PTA puro (polvo)               | 1522                               | 166,13            |
| EG líquido                     | 1116                               | 62,068            |
| IPA                            | 1522                               | 166,13            |
| DEG                            | 1120                               | 106,121           |
| Colorante                      | 4230                               | 79,866            |
| Ácido fosfórico                | 1880                               | 98,00             |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5200                               | 291,52            |

El colorante o tóner utilizado en el proceso es el TiO<sub>2</sub> [44] (Dióxido de Titanio), la función del colorante es aportar color blanco al PET. En el proceso se introduce un 3% de colorante por cada 100 kg de producto final [45], es decir, 0.3% de TiO<sub>2</sub> por cada tonelada de PET.

El catalizador utilizado es el trióxido de antimonio (Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y se introducen 300 ppm de catalizador por cada tonelada de producto final, es decir, 0,03% por tonelada de PET. Así como el aditivo de fósforo utilizado está compuesto por ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) [46] y se introducen 20 ppm de ácido fosfórico por cada tonelada de producto final, es decir, un 0,002 % de ácido por tonelada de PET.

Además, durante esta etapa se mantienen todas las proporciones de las mezclas ya sean del colorante como del catalizador o del aditivo de fósforo con etilenglicol en relación molar 1:2, es decir, por cada mol de sólido introducido, se introducen 2 moles de líquido (EG).

En el proceso, a su vez, se introduce un 5% molar de IPA, así como un 5% molar de DEG ambos respecto al PTA inicial.

Finalmente decir, que todas las corrientes se introducen a temperatura y presión ambiente y que la mezcla se mantiene homogénea en los diferentes mezcladores.

### 2.1.1.3 Lista de equipos

Los equipos necesarios para la realización de la etapa de preparación de las materias primas son los siguientes:

- Silo 1: Silo de PTA, el PTA se encuentra en estado sólido (polvo).
- Silo 2: Silo de IPA, el IPA se encuentra en estado sólido (polvo) y es utilizado para favorecer la formación de copolímeros.
- Tanque 1: Tanque de EG, el etilenglicol se encuentra en estado líquido a presión y temperatura ambiente.
- Tanque 2: Tanque de DEG, el dietilenglicol se encuentra en estado líquido a presión y temperatura ambiente y es usado para facilitar y controlar la reacción de esterificación.
- Dos alimentadores de tornillo uno para la alimentación de PTA (Alimentador 1) y otro para la alimentación de IPA (Alimentador 2), se usan alimentadores de tornillo porque se tiene que salvar cierta altura manteniendo un rendimiento óptimo.

- Silo 3: Silo de catalizador,  $Sb_2O_3$ , se encuentra en estado sólido (polvo) por lo que se mezcla con EG para mejorar su manejo.
- Silo 4: Silo de aditivo de fósforo, ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), se encuentra en estado sólido.
- Silo 5: Silo de tóner, Óxido de Titanio ( $TiO_2$ ), se encuentra en estado sólido.
- Tres mezcladores de agitación rápida. Los mezcladores son de agitación permanente a temperatura ambiente.
- Bomba 1, es una bomba de tornillo helicoidal ya que en la corriente se encuentra con alto contenido de sólido.

**Tabla 2- 2.** Lista de equipos de la etapa de preparación de materia prima.

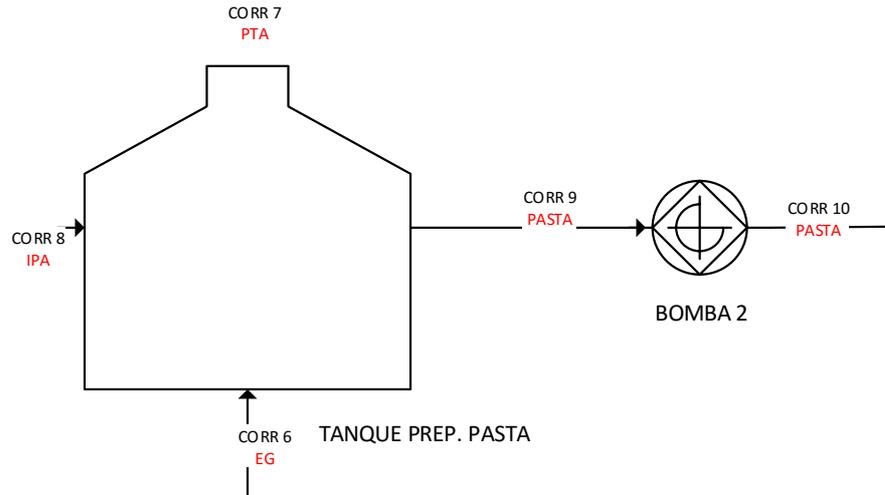
| EQUIPO        | MATERIAL         | CAPACIDAD                       |
|---------------|------------------|---------------------------------|
| SILO 1        | Acero inoxidable | 330 m <sup>3</sup> (6 silos)    |
| SILO 2        | Acero inoxidable | 105 m <sup>3</sup> (1 silo)     |
| SILO 3        | Acero inoxidable | 3 m <sup>3</sup>                |
| SILO 4        | Acero inoxidable | 40 l                            |
| SILO 5        | Acero inoxidable | 230 l                           |
| TANQUE 1      | Acero inoxidable | 1450 m <sup>3</sup> (3 tanques) |
| TANQUE 2      | Acero inoxidable | 90 m <sup>3</sup> (1 tanque)    |
| ALIMENTADOR 1 | Acero inoxidable | 10 m <sup>3</sup> /h            |
| ALIMENTADOR 2 | Acero inoxidable | 0,5 m <sup>3</sup> /h           |
| MEZCLADOR 1   | Acero inoxidable | 40 l                            |
| MEZCLADOR 2   | Acero inoxidable | 2 l                             |
| MEZCLADOR 3   | Acero inoxidable | 40 l                            |
| BOMBA 1       | Acero inoxidable | 70 l/h                          |

## 2.1.2 PREPARACIÓN DE LA PASTA

### 2.1.2.1 Diagrama de flujo

La segunda etapa de la fase fundida, la preparación de la pasta, se encarga de la realización de la mezcla de las materias primas principales dando lugar a una pasta que es introducida posteriormente en la etapa de esterificación.

Observando la Figura 2-3, se aprecia que esta etapa consiste en la introducción de la corriente de PTA (Corriente 7), la de IPA (Corriente 8) y la de EG (Corriente 6) en un tanque (*TANQUE 3*) para llevar a cabo su mezcla creando así una pasta (Corriente 9) que, posteriormente será impulsada por una bomba (*BOMBA 2*) hacia el primer reactor de la etapa de esterificación.



**Figura 2- 3.** Diagrama de flujo de la etapa de preparación de la pasta.

### 2.1.2.2 Especificaciones de la etapa

Durante esta etapa, todas las corrientes se introducen a temperatura y presión ambiente en el tanque de preparación de la pasta donde permanecen hasta que la mezcla es óptima. Para la realización de la mezcla es necesaria la agitación permante de las corrientes en el tanque para conseguir la mayor homogeneidad de la pasta posible. Además, durante esta etapa se mantienen las proporciones de las mezclas ya sean del colorante como del catalizador o del aditivo de fósforo con etilenglicol para conseguir un 80% de concentración de sólidos en el tanque y el tiempo de residencia es de una hora aproximadamente.

A la salida del tanque de preparación de la pasta se utiliza una bomba de tornillo helicoidal (BOMBA 2), este tipo de bomba se debe a la alta viscosidad del fluido y a su alto contenido en sólidos.

### 2.1.2.3 Lista de equipos

Los equipos necesarios de esta etapa son un tanque para la preparación de la pasta (TANQUE 3) y una bomba de tornillo helioidal (BOMBA 2).

A continuación, en la Tabla 2-3, se muestra la lista de equipos correspondiente a esta etapa:

**Tabla 2- 3.** Lista de equipos de la fase de preparación de la pasta.

| EQUIPO   | MATERIAL         | CAPACIDAD            |
|----------|------------------|----------------------|
| TANQUE 3 | Acero inoxidable | 16,9 m <sup>3</sup>  |
| BOMBA 2  | Acero inoxidable | 17 m <sup>3</sup> /h |

## 2.1.3 ESTERIFICACIÓN

### 2.1.3.1 Diagrama de flujo

La tercera etapa de la fase fundida, la etapa de esterificación, está compuesta por dos reactores de esterificación en los que se lleva a cabo la reacción de esterificación, reacción en la cual se genera el monómero de PET y agua producto.



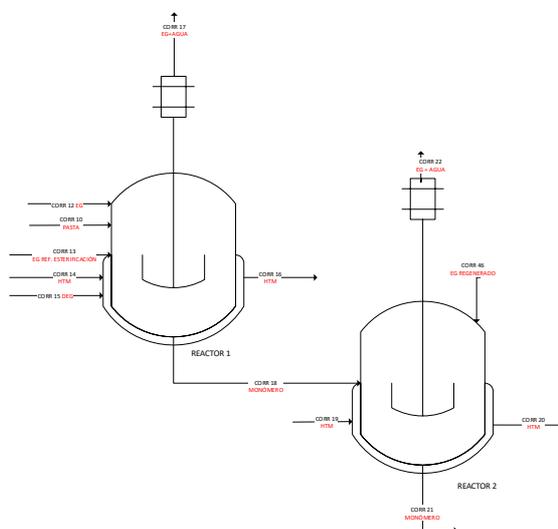
**Figura 2- 4.** Reacción de esterificación simplificada

Como se observa en la Figura 2-5, en el primer esterificador (*REACTOR 1*) se introduce la pasta (Corriente 10), el DEG (Corriente 15) y el EG (Corrientes 12 y 13); las corrientes permanecen en este primer reactor aproximadamente 3,5h y luego pasan (Corriente 18) al segundo reactor de esterificación (*REACTOR 2*) en el que permanecen aproximadamente 1h y donde finaliza la reacción de esterificación. En el REACTOR 2 se introduce además una corriente de EG regenerado proveniente de la etapa de regeneración de etilenglicol posteriormente explicada (Corriente 46), para conseguir la cantidad de EG requerida para la finalización de la reacción de esterificación.

Los dos reactores son reactores discontinuos ya que ni las reacciones ni el proceso se realizan de forma continua, por esta razón los volúmenes de los reactores son mayores a los que resultarían si el proceso se realizara de forma continua ya que se llevan a cabo las reacciones de forma discontinua.

En ambos reactores existe una corriente de purga compuesta por EG sin reaccionar y agua producto de la reacción, estas corrientes son purgadas hacia la etapa de regeneración de EG, la Corriente 17 en el primer reactor y la Corriente 22 en el segundo reactor.

Finalmente decir, que ambos reactores necesitan una manta calefactora para alcanzar la temperatura de operación. Esta energía se consigue introduciendo una corriente de aceite térmico de forma indirecta en cada uno de los reactores (Corriente 14 en el primer reactor y Corriente 19 en el segundo), el aceite no realiza ninguna función en las reacciones, solo se usa como medio calefactor para alcanzar la temperatura de operación.



**Figura 2- 5.** Diagrama de flujo de la etapa de esterificación.

### 2.1.3.2 Especificaciones de la etapa

A continuación, se muestran una serie de consideraciones importantes para la realización de esta etapa. Como se observa en la Tabla 2-4, las temperaturas de operación de los reactores no difieren mucho, pero al contrario las presiones sí, en el primer reactor se encuentra aproximadamente a presión atmosférica mientras que en el segundo reactor trabaja aproximadamente a la mitad de esta. Además, decir que las conversiones de los reactores están referidas al reactivo limitante que en este caso es el PTA.

En cuanto al tiempo de reacción, la mayor parte de la reacción se da en el primer reactor (3.5 h), llevándose a cabo en el segundo reactor la finalización de la reacción durante una hora.

**Tabla 2- 4.** Especificaciones de la etapa de esterificación.

| PARÁMETROS IMPORTANTES        | 1 <sup>er</sup> REACTOR | 2 <sup>do</sup> REACTOR |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| TEMPERATURA, T (°C)           | 260                     | 265                     |
| PRESIÓN, P (atm)              | 1,1                     | 0,4                     |
| TIEMPO DE REACCIÓN, $t_R$ (h) | 3,5                     | 1                       |
| CONVERSIÓN, x (%)             | 90                      | 95                      |

En esta etapa, las corrientes de entrada mantienen una proporción PTA:EG de 1:2,6, es decir, por cada mol introducido de PTA se introducen 2,6 moles de EG. Además, de ácido tefáltico se introduce un 95% de ácido tefáltico puro (PTA) y un 5% de ácido isoftáltico (IPA), el ácido isoftáltico es un isómero del ácido tereftáltico; se introduce, a su vez, un 5% molar de DEG respecto a los moles iniciales de PTA.

De todo el EG introducido en el primer reactor, el 10% se introduce por la Corriente 10 proveniente de la preparación de la pasta (corriente cuya concentración en sólidos es del 80%); el 85% de la Corriente 12 que es EG virgen proveniente directamente del tanque de EG y el 5% restante se introduce por la Corriente 13, EG regenerado originado en la etapa de regeneración de EG.

Por otro lado, de todo el EG encontrado en el segundo reactor, el 85% proviene de la Corriente 18, corriente de salida del primer reactor, y el 15% restante de la Corriente 46, corriente proveniente de la etapa de regeneración de EG.

Ambos reactores tienen purga por el que se elimina el EG sin reaccionar, las impurezas y el agua. Se asume que, en el primer reactor, un 10% del EG introducido se va por la purga, Corriente 17, así como toda el agua producida en esa fase de reacción. Mientras que, por la purga del segundo reactor, Corriente 22, se eliminan todas las impurezas producidas durante la reacción, todo el EG restante de la reacción y el agua producida en esta fase.

Finalmente, decir que el monómero producido tiene un índice de viscosidad de 0,15 dando lugar a un peso molecular de 192,2 g/mol (ANEXO I) y que el aceite térmico empleado en las mantas calefactoras es aceite térmico Therminol VP-1 en fase líquida. [47].

### 2.1.3.3 Lista de equipos

A continuación, se muestra una lista con los equipos necesarios para la realización de esta etapa, como se observa en la Tabla 2-5. los equipos necesarios son dos reactores aproximadamente de las mismas características y capacidades.

**Tabla 2- 5.** Lista de equipos de la fase de esterificación.

| <b>EQUIPO</b> | <b>MATERIAL</b>  | <b>CAPACIDAD</b>   |
|---------------|------------------|--------------------|
| REACTOR 1     | Acero inoxidable | 145 m <sup>3</sup> |
| REACTOR 2     | Acero inoxidable | 51 m <sup>3</sup>  |

### 2.1.4 PREPOLIMERIZACIÓN

#### 2.1.4.1 Diagrama de flujo

En esta etapa de la fase fundida, se lleva a cabo la reacción de prepolimerización (Figura 2-5) en la cual se genera el prepolímero y EG producto a partir de la unión de dos monómeros de PET.

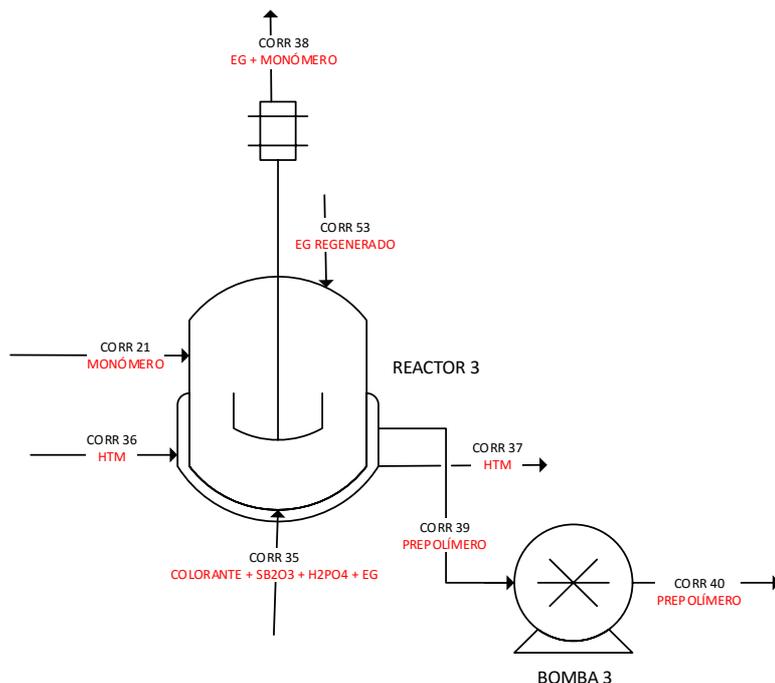


**Figura 2- 6.** Reacción de prepolimerización simplificada.

Como se puede observar en la Figura 2-7, la etapa comienza con la introducción en el reactor de prepolimerización (REACTOR 3) la corriente de salida del segundo reactor de esterificación (Corriente 21) así como la Corriente 35 y la Corriente 53. La Corriente 35 está compuesta por la mezcla de todos los aditivos y catalizadores con etilenglicol y la Corriente 53 proviene de la etapa de regeneración de EG del sistema. La corriente de salida del reactor (Corriente 39) se bombea mediante la BOMBA 3 hacia la etapa de polimerización del proceso.

El Reactor 3 genera una corriente de purga (Corriente 38) compuesta por impurezas y EG producido en la reacción de prepolimerización, dirigida hacia la etapa de regeneración de EG.

Finalmente decir, que el reactor de prepolimerización al igual que los anteriores reactores requiere de una manta calefactora para mantener la temperatura de operación necesaria. La manta calefactora está alimentada por aceite térmico (Corriente 36, Corriente 37).



**Figura 2- 7.** Diagrama de flujo de la etapa de prepolimerización.

#### 2.1.4.2 Especificaciones de la etapa

A continuación, se observan en la Tabla 2-6, una serie de parámetros importantes para llevar a cabo la etapa de prepolimerización. Se observa que el reactor trabaja a presión vacío y que la temperatura es superior a la de la etapa anterior.

**Tabla 2- 6.** Especificaciones de la etapa de prepolimerización.

| PARÁMETROS                    | REACTOR de PREPOLIMERIZACIÓN |
|-------------------------------|------------------------------|
| TEMPERATURA, T (°C)           | 285                          |
| PRESIÓN, P (atm)              | 0,04                         |
| TIEMPO DE REACCIÓN, $t_R$ (h) | 1                            |
| RENDIMIENTO, $\eta$ (%)       | 94                           |

En esta etapa se introducen todos los aditivos del proceso en forma de mezcla con el EG: el catalizador, el colorante y el aditivo de fósforo.

En la reacción de prepolimerización se generan dos moles de EG por cada mol de prepólímero producido, EG que se elimina por la corriente de purga junto a las impurezas de la etapa por la Corriente 38.

La bomba posicionada tras el reactor de prepolimerización es una bomba de desplazamiento positivo.

En esta etapa se multiplica el grado de polimerización por 10 con respecto a la etapa anterior, es decir, el grado de polimerización del prepólímero es 10 veces superior al grado del monómero [48].

El índice de viscosidad de esta etapa se encuentra entorno al 0,2-0,3 aproximadamente, por lo tanto, su peso molecular será superior al de la etapa anterior. Se puede observar en el ANEXO I, en el apartado A1.

### 2.1.4.3 Lista de equipos

Los equipos necesarios para la realización de esta etapa, como se observa en la Tabla 2-7 son: un reactor complementado por una manta calefactora y una bomba de desplazamiento positivo.

**Tabla 2- 7.** Lista de equipos de la etapa de prepolimerización.

| <b>EQUIPO</b> | <b>MATERIAL</b>  | <b>CAPACIDAD</b>        |
|---------------|------------------|-------------------------|
| REACTOR 3     | Acero inoxidable | 70 m <sup>3</sup>       |
| BOMBA 3       | Acero inoxidable | 15,16 m <sup>3</sup> /h |

### 2.1.5 POLIMERIZACIÓN

#### 2.1.5.1 Diagrama de flujo

La etapa de polimerización es la etapa más importante de la fase fundida ya que gracias a ésta se consigue el polímero amorfo. Esta etapa está compuesta por un único reactor en el que se lleva a cabo la reacción de polimerización (Figura 2-7):

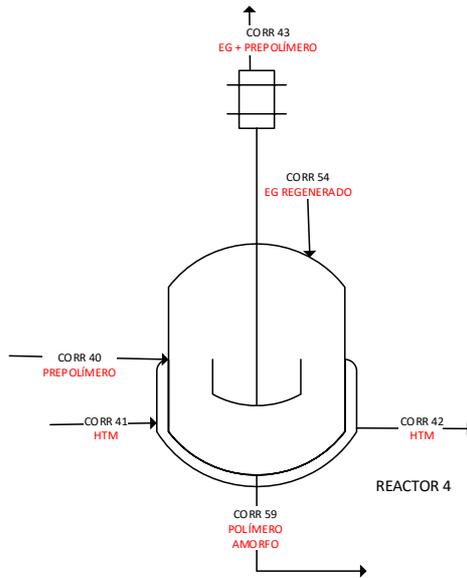


**Figura 2- 8.** Reacción de polimerización simplificada.

Observando la Figura 2-9, se corrobora que la etapa está compuesta por un único reactor (REACTOR 4), en el se introducen varias corrientes: la Corriente 40 que es la corriente de salida del reactor de prepolimerización y la Corriente 54 que está compuesta por EG regenerado proveniente de la etapa de regeneración de EG.

Por otro lado, las corrientes de salida del reactor son: la Corriente 43 que está compuesta por EG producido en la reacción de polimerización más impurezas y la Corriente 59 que está compuesta por el polímero amorfo de PET.

Al igual que los anteriores reactores, el reactor de polimerización, necesita de una manta calefactora para mantener la temperatura de operación requerida. La manta calefactora está alimentada por aceite térmico (Corriente 41, Corriente 42).



**Figura 2- 9.** Diagrama de flujo de la etapa de polimerización.

### 2.1.5.2 Especificaciones de la etapa

A continuación, se observan en la Tabla 2-8, una serie de parámetros importantes para la realización de esta etapa: la temperatura, la presión, el tiempo de reacción y el rendimiento del reactor. Se observa que el reactor trabaja a presión de alto vacío y que la temperatura es ligeramente superior a la de la etapa anterior de prepolimerización.

**Tabla 2- 8.** Especificaciones de la etapa de polimerización.

| PARÁMETROS                             | REACTOR de POLIMERIZACIÓN |
|--|---------------------------|
| TEMPERATURA, T (°C)                    | 290                       |
| PRESIÓN, P (kg/cm <sup>2</sup> )       | 0,001                     |
| TIEMPO DE REACCIÓN, t <sub>R</sub> (h) | 1                         |
| RENDIMIENTO, η (%)                     | 98                        |

Durante esta etapa se generan tres moles de EG por cada mol de polímero producido, el EG se elimina mediante la corriente de purga (Corriente 43) que, junto las impurezas de la etapa, se dirigen a la etapa de regeneración de EG.

El Grado de Polimerización en esta etapa se multiplica por 100 con respecto a la etapa anterior, es decir, el grado de polimerización del polímero amorfo es 100 veces superior al grado de polimerización del prepolímero. El índice de viscosidad de esta etapa se encuentra en 0,6 y se mantendrá constante tanto para el polímero amorfo como para el polímero cristalino, únicamente cambiará cuando se lleve a cabo la etapa de reacción de policondensación donde se consigue el índice de viscosidad deseado.

### 2.1.5.3 Lista de equipos

Para la realización de esta etapa únicamente se necesita un reactor de polimerización complementado con manta calefactora (REACTOR 4).

**Tabla 2- 9.** Lista de equipos de la etapa de polimerización.

| EQUIPO    | MATERIAL         | CAPACIDAD           |
|-----------|------------------|---------------------|
| REACTOR 4 | Acero inoxidable | 1250 m <sup>3</sup> |

## 2.1.6 PELETIZACIÓN

### 2.1.6.1 Diagrama de flujo

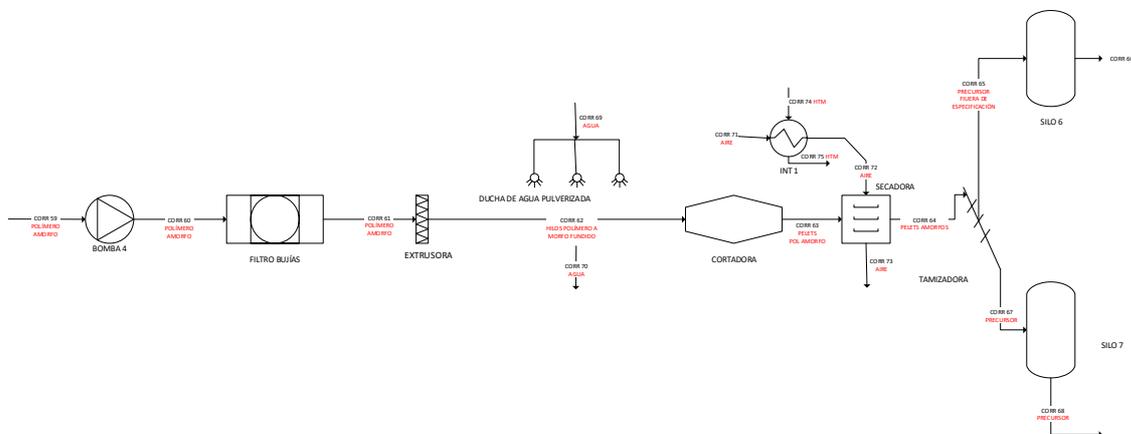
Esta etapa de la fase fundida, la peletización, consiste en someter al polímero amorfo a una serie de cambios físicos para cambiar su forma y tamaño, así como temperatura.

Observando la Figura 2-10, en primer lugar, se introduce la Corriente 59, corriente de polímero amorfo a alta temperatura, en una bomba de polímero (BOMBA 4), la cual llega a un filtro de bujías (FILTRO), donde se elimina previamente a la extrusión partículas o grumos provenientes de impurezas de carbonización, pigmentos o aditivos. Seguidamente, la Corriente 61 es introducida en la extrusora, mediante este equipo se consigue que la masa viscosa saliente de la reacción de polimerización se transforme en cilindros alargados de una sección transversal específica (Corriente 62).

Luego, se lleva a cabo una bajada de temperatura mediante un lavado con agua pulverizada (LAVADOR), seguidamente llega a una CORTADORA donde se transforman los cilindros de polímero amorfo en pellets de longitud deseada (Corriente 63).

Después, dichos pellets se introducen en la SECADORA donde se realiza la eliminación de humedad de los pellets. La secadora está alimentada por una corriente de aire caliente (Corriente 72) proveniente del INTERCAMBIADOR 1 donde se consigue la temperatura adecuada del aire a partir del aire de servicios (Corriente 71). En el intercambiador el fluido caliente es aceite térmico a alta temperatura (Corriente 74, Corriente 75).

Seguidamente, los pellets ya secos se introducen en una TAMIZADORA que clasifica los pellets según su tamaño, dejando pasar los que tienen tamaño óptimo al silo de precursor (SILO 7) y desechando el pellet que no pasa cierta luz de malla introduciéndolo en el silo de precursor fuera de especificación (SILO 6).



**Figura 2- 10.** Diagrama de flujo de la etapa de peletización.

### 2.1.6.2 Especificaciones de la etapa

Durante esta etapa, se realizan cambios significantes de temperatura a las corrientes. La primera corriente de la etapa (Corriente 59) se encuentra a muy alta temperatura que tras pasar por la Bomba 4, el Filtro y la Extrusora se enfría mediante un lavado de agua pulverizada (Corriente 62). Seguidamente se introduce en la Cortadora y luego en la Secadora donde se le vuelve a elevar la temperatura (Corriente 64).

La Bomba de esta etapa es una bomba de muy alta presión debido a que necesita impulsar grandes caudales de fluido muy viscoso y caliente.

Por otro lado, durante la extrusión se crean unos cilindros de unos 1200 mm de largo y de radio constante que, mediante un lavado de agua pulverizada a temperatura ambiente llegan a la cortadora. En la Cortadora se transforman los cilindros de polímero en pellets de tamaño medio 28mm lo que equivale a un peso de 0,05g aproximadamente [49]. Tras la Cortadora se encuentra la Secadora, la cual consigue que los pellets de PET no contengan más de 0,005% de humedad mediante el uso de aire sobresaturado a 180°C (conseguido mediante el intercambiador 1). En la Secadora el tiempo de residencia del polímero se encuentra entre 2-6 h.

Finalmente decir que la Tamizadora clasifica los pellets por tamaño dejando pasar el polímero de tamaño admisible.

### 2.1.6.3 Lista de equipos

**Tabla 2- 10.** Lista de equipos de la etapa de peletización.

| <b>EQUIPO</b>    | <b>MATERIAL</b>  | <b>CAPACIDAD</b>      |
|------------------|------------------|-----------------------|
| BOMBA 4          | Acero inoxidable | 5,6 m <sup>3</sup> /h |
| FILTRO           | Acero inoxidable | 9 m <sup>3</sup> /h   |
| EXTRUSORA        | Acero inoxidable | 50 kW                 |
| LAVADOR          | Acero inoxidable | 40 m <sup>3</sup> /h  |
| CORTADORA        | Acero inoxidable | 35 t/h                |
| INTERCAMBIADOR 1 | Acero inoxidable | 240 kW                |
| SECADORA         | Acero inoxidable | 248kW                 |
| TAMIZ            | Acero inoxidable | 2,2 kW                |
| SILO 6           | Acero inoxidable | 0,81 m <sup>3</sup>   |
| SILO 7           | Acero inoxidable | 15,52 m <sup>3</sup>  |

## 2.1.7 REGENERACIÓN DE EG

### 2.1.7.1 Diagrama de flujo

La regeneración de EG es la última etapa de la fase fundida, esta etapa podría considerarse como una etapa auxiliar debido a que consiste en la recuperación del etilenglicol empleado en el proceso que ha sido recogido por las purgas de los reactores.

Durante la etapa se lleva a cabo la separación tanto de las impurezas como del agua de las corrientes de etilenglicol purgadas.

Como se puede observar en la Figura 2-11, la etapa comienza con el SCRUBBER, donde se mezcla la corriente resultante de la suma de todas las purgas de los reactores (Corriente 44) con una corriente de EG virgen (Corriente 11). Del Scrubber surgen varias corrientes: la Corriente 55, corriente compuesta de EG más agua que se dirige a la TORRE 1 (torre de destilación donde se realiza la separación física del agua (Corriente 57) y el EG (Corriente 58)), la Corriente 56 que está compuesta por impurezas y agua y, la Corrientes 45 está compuesta por EG regenerado y la Corriente 48 que está compuesta por EG, agua e impurezas.

Estas últimas dos corrientes se dirigen a una serie de eyectores y bombas (EYECTOR 1, EYECTOR 2, BOMBA 5) que realizan un cambio de presión a las corrientes dando lugar a unos condensados de agua con impurezas.

Por tanto, las corrientes resultantes de esta etapa son EG regenerado (Corriente 46 y Corriente 53), EG refinado (Corriente 58), agua (Corriente 57) y condensados de agua con impurezas (Corriente 49 y Corriente 51).

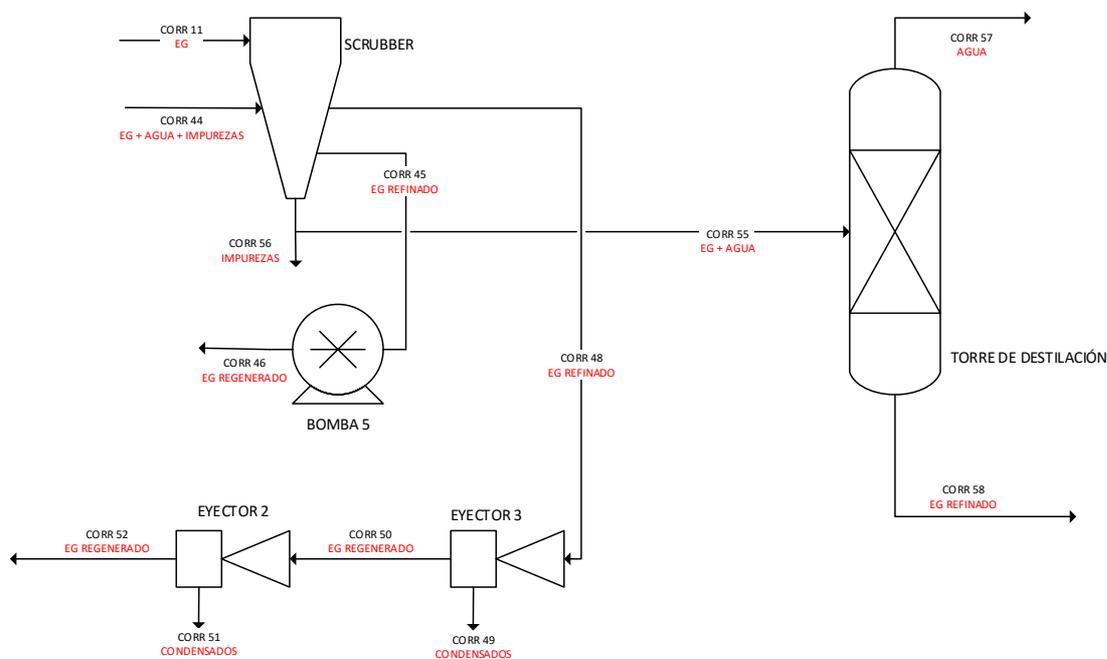


Figura 2- 11. Diagrama de flujo de la etapa de regeneración de EG.

### 2.1.7.2 Especificaciones de la etapa

En esta etapa, todas las corrientes se encuentran a altas temperaturas a excepción de la corriente introducida de EG virgen que está a temperatura ambiente.

Además, se asume que la Corriente 48 está compuesta además de EG, por 5% de agua y 20% de las impurezas introducidas en el Scrubber mediante la Corriente 44. A su vez, se asume que la Corriente 56 está compuesta por el 80% de las impurezas que entran por la Corriente 44 más un 2% de agua y que por la Corriente 55 se va el 93% del agua que entra por la Corriente 44 y el resto de EG.

El Scrubber o depurador es de lavador húmedo ya que se introduce la Corriente 11, corriente de EG virgen en estado líquido, con la función de lavado de la Corriente 44 para conseguir la eliminación de la mayor parte de las impurezas del sistema. La eficiencia de la eliminación de estas impurezas se mejora mediante el aumento del tiempo de residencia de las corrientes en el Scrubber, así como mediante el aumento del área superficial de lavado.

Los Eyectores 1 y 2 se emplean para la producción de vacío de las corrientes resultantes debido que la Corriente 53 y Corriente 54 han de introducirse en los reactores a presiones mucho más bajas a la atmosférica. Estos equipos crean una corriente de condensados, siendo en el caso de la producción de PET condensados de agua con impurezas. La Bomba 5 se emplea para la impulsión de etilenglicol al segundo reactor de esterificación mediante la Corriente 46.

Finalmente, se asume que la separación en la torre de destilación es ideal, es decir, que por la corriente superior (Corriente 57) sale toda el agua y por la corriente inferior (Corriente 58) todo el etilenglicol ya que la volatilidad del agua es superior que la del etilenglicol.

### 2.1.7.3 Lista de equipos

A continuación, se muestra una lista con los equipos necesarios para la realización de esta etapa, como se observa en la Tabla 2-11. los equipos necesarios son varios eyectores, una torre de destilación y un equipo Scrubber o depurador de lavado húmedo.

**Tabla 2- 11.** Lista de equipos de la etapa de regeneración de EG.

| <b>EQUIPO</b> | <b>MATERIAL</b>          | <b>CAPACIDAD</b>       |
|---------------|--------------------------|------------------------|
| SCRUBBER      | Propileno PPH + aditivos | 20 t/h                 |
| EYECTOR 1     | AL-LATON PPS             | 1,5 m <sup>3</sup> /h  |
| EYECTOR 2     | AL-LATOM PPS             | 1,5 m <sup>3</sup> /h  |
| BOMBA 5       | Acero inoxidable         | 0,54 m <sup>3</sup> /h |
| TORRE 1       | Acero inoxidable         | 9,86 m <sup>3</sup> /h |

## 2.2 FASE SÓLIDA

### 2.2.1 CRISTALIZACIÓN

#### 2.2.1.1 Diagrama de flujo

La etapa de cristalización es la primera etapa de la fase sólida, en esta etapa se consigue un polímero cristalino a partir de un polímero amorfo. Todas las corrientes se mueven con transporte neumático por lo que se emplean soplantes para su movimiento, SOPLANTE 1.

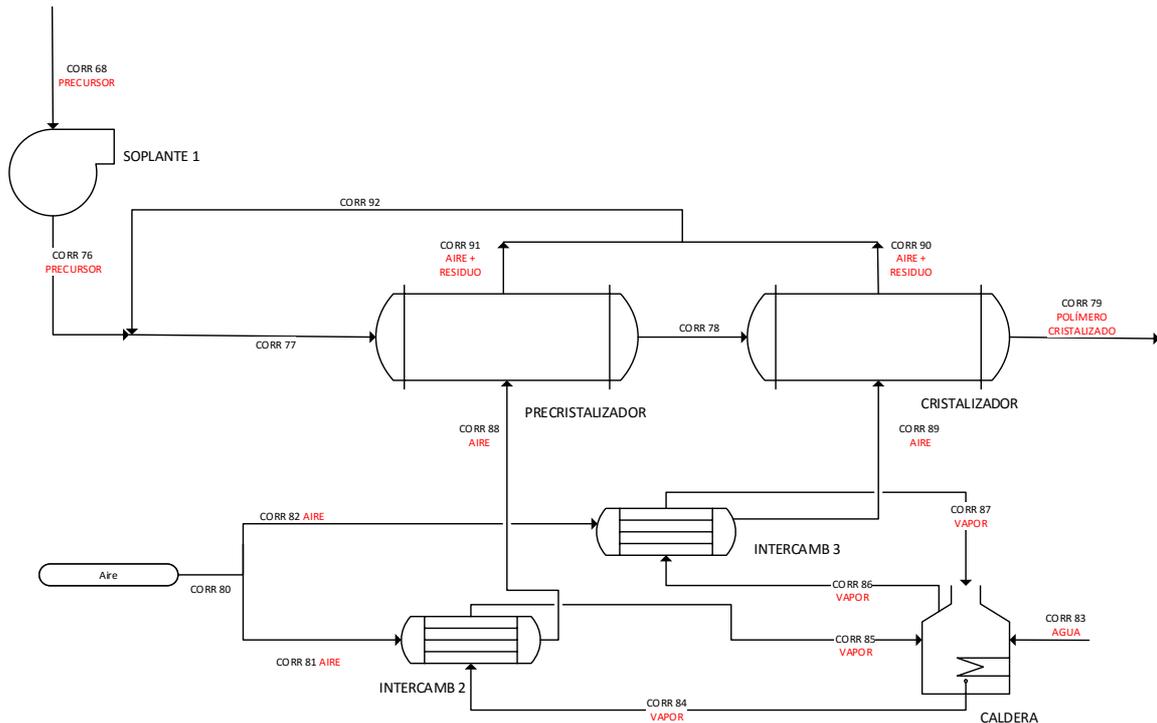
Como se observa en la Figura 2-12, la Corriente 77 compuesta por polímero amorfo es introducida en el PRECRISTALIZADOR a la vez que la Corriente 88, compuesta por aire a alta temperatura (170°C). El precristalizador es un lecho fluidizado en el que el polímero amorfo se calienta (115°C) y consigue un grado de cristalinidad medio (aproximadamente 25-30%). Seguidamente, la corriente de salida del precristalizador, la Corriente 78 es introducida en el CRISTALIZADOR donde se sigue introduciendo aire a 170°C de forma pulsante hasta conseguir el grado de cristalinidad deseado (40%), la temperatura de salida del polímero cristalino es de 130°C.

Tanto del Precristalizador como del Cristalizador fluye una corriente de salida compuesta por aire y polímero que no ha alcanzado el grado de cristalinidad deseado en su equipo (Corriente 90 y Corriente 91), estas corrientes se mezclan y se recirculan (Corriente 92).

Por otro lado, en esta etapa se usan varios servicios auxiliares: aire, agua y combustible.

El aire utilizado necesita un tratamiento previo debido a que la temperatura a la que se encuentra el aire de servicio es la temperatura ambiente y se necesita introducirlo en el precristalizador y el cristalizador a 170°C. La temperatura requerida por los equipos de cristalización se alcanza mediante el empleo de una caldera de vapor saturado y varios intercambiadores de calor.

Por lo tanto, como se observa en la Figura 2-12, la Corriente 83 compuesta por agua de servicio a temperatura ambiente es introducida a la CALDERA y mediante la combustión de gasoil se consigue el calor suficiente para generar vapor saturado a alta temperatura y presión (179,9°C y 10bar). Este vapor (Corriente 84 y Corriente 86) se emplea como fluido caliente para hacer que el aire alcance la temperatura requerida en el INTERCAMBIADOR 2 y el INTERCAMBIADOR 3. Las corrientes de salida del vapor se recirculan a la caldera (Corriente 87 y Corriente 85).



**Figura 2- 12.** Diagrama de flujo de la etapa de cristalización.

### 2.2.1.2 Especificaciones de la etapa

A continuación, se muestran una serie de consideraciones importantes para la realización de esta etapa.

El polímero amorfo en el precrystalizador alcanza un grado de cristalización del 30% mientras que en el cristalizador se finaliza el proceso de cristalización alcanzando un grado de cristalización del 40%.

La CALDERA es una caldera pirotubular de vapor saturado en la que se introduce agua y genera vapor saturado a 10 bar (179,9°C) alimentada por gasóleo tipo C especificado en la Tabla 3-26. Las calderas pirotubulares son aquellas calderas en las que los gases de la combustión circulan por el interior de los tubos y el líquido se encuentra en un recipiente atravesado por dichos tubos (carcasa). Son de aplicación principalmente cuando la presión de trabajo es inferior a los 22 bar. Por ellas circula un gran volumen de agua y el vapor producido por la misma suele tener un título de vapor cercano a 1, es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es bajo (aprox 3%), no siendo necesario instalar equipos auxiliares.

A continuación, en la Tabla 2-12, se muestran algunos datos de interés para el cálculo de los balances en la caldera:

**Tabla 2- 12.** Parámetros caldera de vapor de la etapa de cristalización.

| PARÁMETRO                             | CANTIDAD | UNIDAD  |
|---------------------------------------|----------|---------|
| $\Delta H_{LIQ-VAP}$ (kJ/kg)          | 2662,782 | kJ/kg   |
| Capacidad calorífica del líquido      | 4,18     | kJ/kg·K |
| $T_{VAP}$                             | 452,9    | K       |
| $T_{LIQ}$                             | 298      | K       |
| $\lambda$ (Calor latente)             | 2015,3   | kJ/kg   |
| Capacidad calorífica de gases a 250°C | 1,02     | kJ/kg·K |
| Capacidad calorífica del vapor a 25°C | 1,9      | kJ/kg·K |
| $T_{gases\ salida}$                   | 250      | °C      |
| $T_{entrada}$                         | 25       | °C      |
| Caudal vapor salida                   | 31,997   | kg/s    |
|                                       | 115191,0 | kg/h    |
| Caudal combustible                    | 2,323    | kg/s    |
|                                       | 8361,686 | kg/h    |

En la caldera se genera vapor saturado a 10 bar y, por lo tanto, con una temperatura de 179,9°C (452,9K) [48]. Mientras que el precrystalizador se encuentra a una temperatura de operación de 115°C y el crystalizador a una temperatura de operación de 130°C. El aire introducido en estos equipos se encuentra seco y a 170°C.

### 2.2.1.3 Lista de equipos

Para la realización de esta etapa son necesarios los siguientes equipos: una soplante, un precrystalizador, un crystalizador, dos intercambiadores de calor y una caldera de vapor pirotubular.

**Tabla 2- 13.** Lista de equipos de la etapa de cristalización.

| EQUIPO           | MATERIAL         | CAPACIDAD          |
|------------------|------------------|--------------------|
| SOPLANTE 1       | Acero inoxidable | 21t/h              |
| PRECRISTALIZADOR | Acero inoxidable | 463 m <sup>3</sup> |
| CRISTALIZADOR    | Acero inoxidable | 36 m <sup>3</sup>  |
| INTERCAMBIADOR 2 | Acero inoxidable | 100 kW             |
| INTERCAMBIADOR 3 | Acero inoxidable | 66,67 kW           |
| CALDERA          | Acero inoxidable | 13956 kW           |

## 2.2.2 REACCIÓN DE POLICONDENSACIÓN Y REGENERACIÓN DE N<sub>2</sub>

### 2.2.2.1 Diagrama de flujo

La etapa de reacción de policondensación de la fase sólida consiste en la realización de la reacción de policondensación, durante esta reacción, los pellets de polímero cristalizado aumentan su temperatura, aproximadamente a su temperatura de fusión consiguiendo así el grado de polimerización y el índice de viscosidad requerido, siendo posteriormente refrigerados y consolidados. Durante esta etapa, a su vez, se lleva a cabo la regeneración del nitrógeno empleado en el sistema, considerada como una etapa auxiliar.

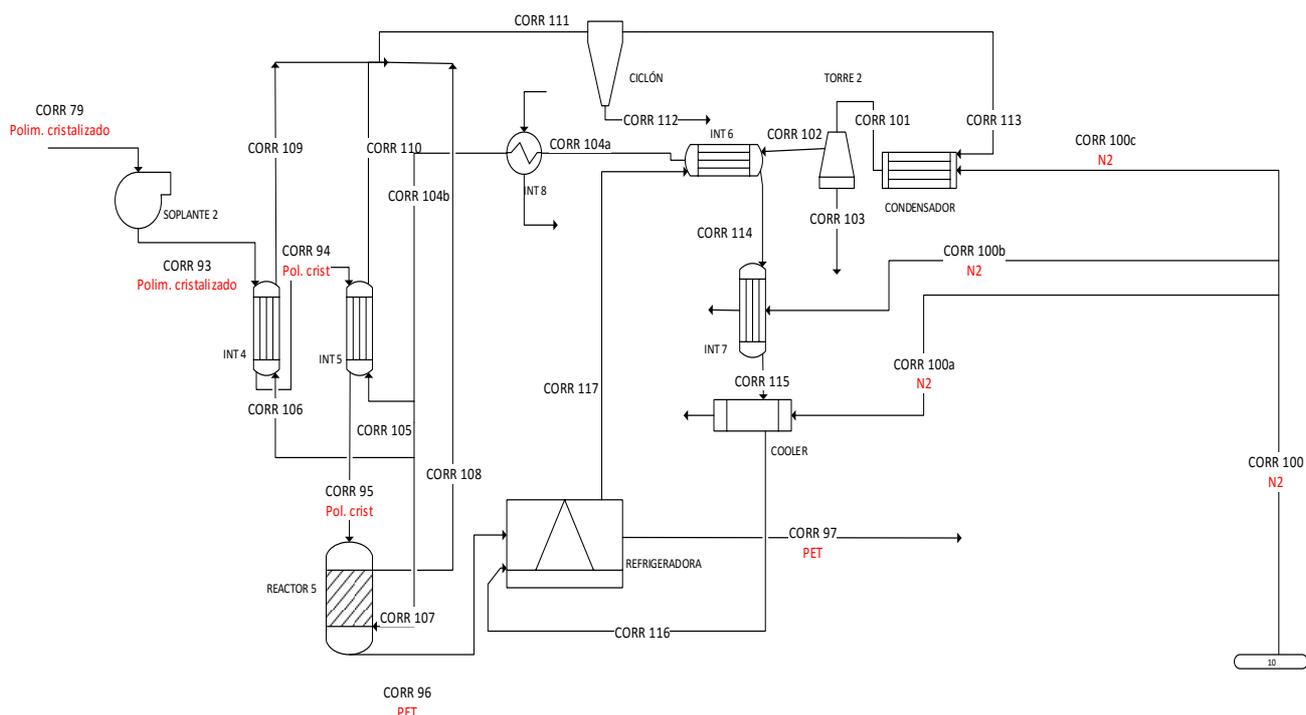
Como se observa en la Figura 2-13, en el diagrama se encuentra tanto la etapa de reacción como la etapa de regeneración de N<sub>2</sub>. El proceso comienza con una soplante (SOPLANTE 2), que desplaza las toneladas de polímero cristalizado (Corriente 93) a un tren de intercambiadores (INTERCAMBIADOR 2, INTERCAMBIADOR 3) en los que mediante una corriente de N<sub>2</sub> a alta temperatura se consigue aumentar la temperatura para la introducción de los pellets (Corriente 95) en el reactor (REACTOR 5). El reactor también se alimenta con N<sub>2</sub> (Corriente 107) a alta temperatura el cual consigue que los pellets cristalizados alcancen la temperatura necesaria para conseguir el índice de viscosidad requerido. La corriente de salida del reactor, Corriente 96 compuesta por PET se introduce en una REFRIGERADORA para así bajar la temperatura de los pellets para posteriormente almacenarlos.

La regeneración del nitrógeno se realiza en favor de obtener su máximo aprovechamiento tanto de calor como de frío. Se introduce nitrógeno limpio por la Corriente 100, la cual se subdivide en tres corrientes (Corriente 100a, Corriente 100b y Corriente 100c). Estas corrientes de nitrógeno fresco se introducen en el COOLER, en el INTERCAMBIADOR 7 y en el CONDENSADOR para disminuir la temperatura de la Corriente 115, de la Corriente 114 y de la Corriente 113.

Debido a que tanto en los INTERCAMBIADORES 4 y 5 como en el reactor se generan impurezas que son conducidas por las corrientes de nitrógeno (Corriente 108, Corriente 109 y Corriente 110) se necesita de un CICLÓN para realiza la máxima eliminación posible de impurezas del sistema de regeneración (Corriente 112).

Seguidamente, la Corriente 113 se introduce en un CONDENSADOR en el cual se baja la temperatura de la corriente para luego ser introducida en una torre de absorción (TORRE 2) en la cual se realiza la eliminación total de las impurezas del sistema.

Finalmente, la corriente de salida de la torre se introduce en dos intercambiadores en serie (INTERCAMBIADOR 6 e INTERCAMBIADOR 8) tras los cuales se obtiene la temperatura deseada en la corriente 104b.



**Figura 2- 13.** Diagrama de flujo de la etapa de reacción de polimerización + regeneración de N<sub>2</sub>.

### 2.2.2.2 Especificaciones de la etapa

A continuación, se muestran una serie de consideraciones importantes para la realización de estas etapas:

- El rendimiento del reactor de policondensación es del 98% siendo, por tanto, su generación de cenizas de un 2%. Así como su temperatura de operación es de 200°C.
- En los intercambiadores 4 y 5 se realiza un intercambio de calor entre la corriente de polímero cristalizado (fría) y una corriente de nitrógeno a alta temperatura, 210°C (caliente). Ambos intercambiadores generan una impureza del 2%.
- El ciclón tiene un rendimiento del 70%.
- Mediante la correlación de la Tabla 2-15, se puede calcular el calor específico del nitrógeno según la temperatura tanto en unidades de masa como de volumen en todas las corrientes.

**Tabla 2- 14.** Correlación calor específico del nitrógeno en intervalo 0-1500°C. [51]

| NITRÓGENO      | $\frac{kJ}{kg \cdot K}$             | $\frac{kJ}{m^3 \cdot K}$            |
|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| C <sub>p</sub> | $C_p = 1,024 + 0,00008855 \cdot T$  | $C_p = 1,2799 + 0,00011067 \cdot T$ |
| C <sub>v</sub> | $C_v = 0,7272 + 0,00008855 \cdot T$ | $C_v = 0,9089 + 0,00008855 \cdot T$ |

- La torre de absorción se encarga de la eliminación total de las impurezas del sistema.
- El nitrógeno introducido en el sistema se introduce a 30°C.

### 2.2.2.3 Lista de equipos

Para la realización de estas etapas se requieren los equipos mostrados en la Tabla 2-15. En la etapa de reacción de policondensación se emplean dos intercambiadores de calor, una soplante y un reactor. Mientras que en la etapa de regeneración de N<sub>2</sub> se emplean tres intercambiadores de calor, una refrigeradora, un ciclón, una torre de absorción, un condensador y un cooler.

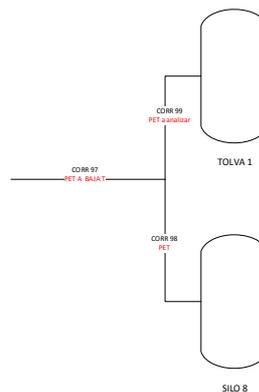
**Tabla 2- 15.** Lista de equipos de la etapa de reacción de policondensación y regeneración de N<sub>2</sub>.

| <b>EQUIPO</b>    | <b>MATERIAL</b>  | <b>CAPACIDAD</b>    |
|------------------|------------------|---------------------|
| SOPLANTE 2       | Acero inoxidable | 21 t/h              |
| INTERCAMBIADOR 4 | Acero inoxidable | 425,86 kW           |
| INTERCAMBIADOR 5 | Acero inoxidable | 490 kW              |
| INTERCAMBIADOR 6 | Acero inoxidable | 830,75 kW           |
| INTERCAMBIADOR 7 | Acero inoxidable | 373,53 kW           |
| INTERCAMBIADOR 8 | Acero inoxidable | 115,5 kW            |
| CICLÓN           | Acero inoxidable | 82,10 t/h           |
| REACTOR 5        | Acero inoxidable | 8300 m <sup>3</sup> |
| REFRIGERADORA    | Acero inoxidable | 2600kW              |
| TORRE 2          | Acero inoxidable | 81,23 t/h           |
| CONDENSADOR      | Acero inoxidable | 2300kW              |
| COOLER           | Acero inoxidable | 750W                |

## 2.2.3 ALMACENAMIENTO DE PRODUCTO FINAL

### 2.2.3.1 Diagrama de flujo

La última etapa de la fase sólida para la producción de PET es la de almacenamiento de producto final. Como se observa en la Figura 2-14, esta etapa está compuesta por un silo (SILO 8) en el que se almacena todo el product final de la producción y una tolva de análisis (TOLVA 1) del mismo. En la tolva de análisis se realiza la comprobación de algunas propiedades imprescindibles como pueden ser la medida del peso molecular del pellet y por tanto, el índice de viscosidad; la medida del punto del material así como la comprobación de la uniformidad del producto entre otras, es decir, se comprueba que el producto cumpla las especificaciones deseadas.



**Figura 2- 14.** Diagrama de flujo de la etapa de almacenamiento del producto final.

### 2.2.3.2 Especificaciones de la etapa

A continuación, se muestran algunas consideraciones a tomar para la realización de la etapa:

- El producto deseado es el pellet de PET con un índice de viscosidad de 0,8 y un grado de cristalización del 40%. Se produce PET “grade bottle”.

**Tabla 2- 16.** Especificaciones PET producto de la etapa de almacenamiento de producto final.

| <b>Pellet de PET</b> | <b>IV (dl/g)</b> | <b>G. Cristalización (%)</b> | <b>GP</b>   |
|----------------------|------------------|------------------------------|-------------|
| Grade Bottle         | 0.8              | 40                           | Aprox 26000 |

Existen varias estaciones de envasado alimentadas desde los silos de producto final y que permiten el llenado de sacas y cisternas.

- Cisternas granel para transporte por carreteras
  - Cisternas granel para transporte por ferrocarril
  - Contenedores a granel por transporte marítimo
  - Envasado en sacas de 1000 kg.
- Se manda a la tolva de análisis un 1% en peso del total de producto final.

### 2.2.3.3 Lista de equipos

Para llevar a cabo la etapa de almacenamiento de producto final únicamente se necesitan un silo y una tolva de análisis.

**Tabla 2- 17.** Lista de equipos de la etapa de almacenamiento de product final.

| <b>EQUIPO</b> | <b>MATERIAL</b>  | <b>CAPACIDAD</b>      |
|---------------|------------------|-----------------------|
| SILO 8        | Acero inoxidable | 380,61 m <sup>3</sup> |
| TOLVA 1       | Acero inoxidable | 22,96 m <sup>3</sup>  |

## 2.3 VARIABLES A CONTROLAR

En primer lugar, en la Etapa de preparación de materias primas las variables a controlar son los caudales de etilenglicol introducidos a los mezcladores, así como la carga introducida a los alimentadores de tornillo, además de la pérdida de carga de la bomba de aditivos.

Seguidamente, en la Etapa de Preparación de la Pasta la principal variable a controlar es el caudal de pasta seguido de la pérdida de carga de la bomba de la pasta.

En la Etapa de Esterificación, el tiempo de residencia está controlado por válvulas en las líneas de transferencia entre reactores. Las variables a controlar de esta etapa son la temperatura, la presión, el tiempo de residencia y el caudal de pasta.

Tanto en la Etapa de Prepolimerización como la Etapa de Polimerización las variables a controlar son la presión, la temperatura y el tiempo de residencia en el reactor. Además, en la de prepolimerización se debe controlar la pérdida de carga de la bomba de desplazamiento positivo.

En la Etapa de Peletización, las variables principales a controlar son las siguientes:

- ❖ Bomba: la pérdida de carga en la bomba.
- ❖ Extrusora: la presión y la temperatura.
- ❖ Lavador: la temperatura de salida del polímero amorfo.
- ❖ Cortadora: el caudal de entrada y el tamaño de los pellets.
- ❖ Tamiz: granulometría requerida de los pellets.

Luego, en la Etapa de Regeneración de EG, las variables a controlar principalmente son las temperaturas y presiones de los equipos.

En la Etapa de Cristalización, se debe controlar principalmente las temperaturas, así como los caudales de aire a las entradas de los equipos principales. A su vez, hay que controlar los caudales de vapor entrantes a los intercambiadores de calor.

Y, finalmente, en la Etapa de Reacción y Recuperación de nitrógeno, las variables más importantes son la presión, la temperatura y el tiempo de residencia de los pellets en el reactor. En segundo plano se debe controlar las temperaturas de los intercambiadores, cooler y condensador, así como los caudales de nitrógeno a la entrada de los equipos.

## **2.4 SERVICIOS AUXILIARES**

Los servicios auxiliares requeridos por el proceso son:

- ❖ Aceite térmico usado como fluido caliente en algunos intercambiadores de calor, así como en las mantas calefactoras de los reactores.
- ❖ Agua, utilizada como fluido frío en el lavador de agua pulverizada en la etapa de peletización y utilizada como fluido a calentar por la caldera de vapor sobresaturado.
- ❖ Aire, usado en la secadora de la etapa de peletización como fluido caliente para realizarle la eliminación de humedad al producto y utilizado en la etapa de cristalización como fluido caliente en los equipos de precrystalización y cristalización.
- ❖ Nitrógeno, tiene como cometido transferir calor. Se utiliza exclusivamente en la etapa de reacción como fluido caliente en los equipos y como fluido frío y caliente en los diferentes intercambiadores de la etapa de regeneración de nitrógeno.
- ❖ Combustible.

## **2.5 RESIDUOS**

Los residuos del proceso de producción de polietileno tereftalato son exclusivamente los caudales de precursor fuera de especificación, así como de impurezas.

Por otra parte, se necesitaría una planta de tratamiento de aguas para las salidas del lavador de agua pulverizada y la torre de destilación de la etapa de regeneración de EG.

Estos residuos se entregarán a una empresa de gestión externa durante el funcionamiento de la planta hasta la realización de una posible ampliación del rango de prestaciones.

# 3 MEMORIA DE CÁLCULO

Para la realización de la memoria de cálculo de este trabajo se han usado diferentes softwares informáticos entre los que se encuentran Microsoft Excel, EES y Visio.

Se realiza por cada etapa del proceso tanto el balance de materia como el de energía si fuera necesario o interesante estudiarlo, además se realiza el diseño de algunos de los equipos más importantes. Los balances se han realizado desde el final del proceso hacia el principio del proceso con el fin de producir una capacidad de PET al año de 175.000 toneladas, produciendo 330 días al año (aproximadamente 8000 horas/año).

## 3.1 FASE FUNDIDA

### 3.1.1 PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS, ADITIVOS Y CATALIZADORES

#### 3.1.1.1 Balances

Las siguientes tablas (Tabla 3-1, Tabla 3-2, Tabla 3-3) representan los balances de materia en la etapa de preparación de las materias primas (Figura 2-2), de ellas obtenemos las toneladas/hora necesarias para producir la cantidad de PET deseada. Son necesarias aproximadamente 15 toneladas de PTA, 0,8 toneladas de IPA, 24 toneladas de EG, 600 kilogramos de DEG, 60 kilogramos de colorante, 400 gramos de ácido fosfórico y 6 kilogramos de catalizador a la hora.

**Tabla 3- 1.** Balance de materia de la etapa de preparación de la pasta I.

| ELEMENTO                       | CORRIENTES (t/h) |      |        |       |      |       |       |      |
|--------------------------------|------------------|------|--------|-------|------|-------|-------|------|
|                                | 1                | 2    | 3      | 4     | 5    | 6     | 7     | 8    |
| PTA                            | 15,13            | -    | -      | 15,13 | -    | -     | 15,13 | -    |
| IPA                            | -                | 0,80 | -      | -     | 0,80 | -     | -     | 0,80 |
| EG                             | -                | -    | 24,18  | -     | -    | 3,98  | -     | -    |
| DEG                            | -                | -    | -      | -     | -    | -     | -     | -    |
| Colorante                      | -                | -    | -      | -     | -    | -     | -     | -    |
| H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | -                | -    | -      | -     | -    | -     | -     | -    |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                | -    | -      | -     | -    | -     | -     | -    |
| <b>TOTAL (t/h)</b>             | 15,13            | 0,80 | 24,18  | 15,13 | 0,80 | 3,98  | 15,13 | 0,80 |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b>          | 91,08            | 4,79 | 389,60 | 91,08 | 4,79 | 64,16 | 91,08 | 4,79 |

**Tabla 3- 2.** Balance de materia de la etapa de preparación de la pasta II.

| ELEMENTO                       | CORRIENTES (kg/h) |          |        |       |      |       |       |      |
|--------------------------------|-------------------|----------|--------|-------|------|-------|-------|------|
|                                | 11                | 12       | 15     | 23    | 24   | 25    | 26    | 27   |
| PTA                            | -                 | -        | -      | -     | -    | -     | -     | -    |
| IPA                            | -                 | -        | -      | -     | -    | -     | -     | -    |
| EG                             | 7245,07           | 12898,47 | -      | 36,19 | 0,51 | 19,77 | -     | -    |
| DEG                            | -                 | -        | 508,72 | -     | -    | -     | -     | -    |
| Colorante                      | -                 | -        | -      | -     | -    | -     | 59,93 | -    |
| H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | -                 | -        | -      | -     | -    | -     | -     | 0,40 |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                 | -        | -      | -     | -    | -     | -     | -    |
| <b>TOTAL (kg/h)</b>            | 7245,07           | 12898,47 | 508,72 | 36,19 | 0,51 | 19,77 | 59,93 | 0,40 |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b>          | 116,73            | 207,81   | 4,79   | 0,58  | 0,01 | 0,32  | 0,16  | 0,00 |

**Tabla 3- 3.** Balance de materia de la etapa de preparación de la pasta III.

| ELEMENTO                       | CORRIENTES (kg/h) |      |      |       |       |      |       |        |
|--------------------------------|-------------------|------|------|-------|-------|------|-------|--------|
|                                | 28                | 29   | 30   | 31    | 32    | 33   | 34    | 35     |
| PTA                            | -                 | -    | -    | -     | -     | -    | -     | -      |
| IPA                            | -                 | -    | -    | -     | -     | -    | -     | -      |
| EG                             | -                 | -    | -    | -     | 36,19 | 0,51 | 19,77 | 56,46  |
| DEG                            | -                 | -    | -    | -     | -     | -    | -     | -      |
| Colorante                      | -                 | -    | -    | 59,93 | -     | -    | 59,93 | 59,93  |
| H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | -                 | -    | 0,40 | -     | -     | 0,40 | -     | 0,40   |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,99              | 5,99 | -    | -     | 5,99  | -    | -     | 5,99   |
| <b>TOTAL (kg/h)</b>            | 5,99              | 5,99 | 0,40 | 59,93 | 42,18 | 0,91 | 79,70 | 122,79 |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b>          | 0,29              | 0,02 | 0,00 | 0,16  | 0,60  | 0,01 | 0,48  | 1,09   |

### 3.1.1.2 Cálculo de equipos

Los tanques de almacenamiento de materias primas se rigen según el Código API-ASME para diseño de tanques que trabajan a presión atmosférica y en contención de líquidos o sólidos. Tanto en tanques (almacenamiento de líquidos) como en silos (almacenamiento de sólidos) se establece un coeficiente de seguridad con el cual los recipientes han de estar llenos como máximo al 80%.

Para materiales líquidos, la cabeza y el fondo es elipsoidal 2:1 y la carcasa es cilíndrica mientras que para materiales sólidos la cabeza es elipsoidal 2:1, la carcasa es cilíndrica y el fondo cónico.

Tanto los tanques de EG y DEG como los silos de PTA e IPA han de ser de acero inoxidable preferentemente, tanques revestidos (sin Zinc) para conseguir buenas condiciones con la mínima abrasión y

descomposición posible [52]. Las demás materias primas (colorante, ácido fosfórico y catalizador) se encuentran en bidones.

En las figuras Figura 3-1 se presentan las ecuaciones para la realización de los cálculos de los parámetros de diseño de los tanques y en la Figura 3-2 las ecuaciones para el cálculo de los parámetros de diseño de los silos.

$$V_{tanque} = V_{cilindro} + 2 \cdot V_{cabeza} \quad \text{donde} \quad V_{cilindro} = \frac{\pi \cdot H \cdot D^2}{4} \quad \text{y} \quad V_{cabeza} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h}{6}$$

$$D = \frac{3}{2} \cdot H \quad h = \frac{D}{4} \quad H_{total} = H + 2 \cdot h_{cabeza}$$

**Figura 3- 1.** Cálculo de parámetros de diseño de recipientes para materiales líquidos.

$$V_{silo} = V_{cilindro} + V_{cabeza} + V_{tolva} \quad V_{tolva} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h_{tolva}}{12}$$

$$h_{tolva} = \frac{H}{2} = H + h_{cabeza} + h_{tolva}$$

**Figura 3- 2.** Cálculo de parámetros de diseño de recipientes para materiales sólidos.

El PTA [53] puede ser distribuido por tuberías, en sacos de 500/1000 kg o a granel en contenedores de 27 Tm o en cisternas dedicadas a este fin, al igual que el IPA que se distribuye en sacos de 500/1000 kg o a granel en contenedores de 23Tm o en cisternas.

El EG con fin de matener la calidad del producto, el grado y la baja conductividad debería estar almacenado bajo una ligera capa de gas inerte, normalmente nitrógeno, de presión positiva. Este producto al igual que el DEG se distribuye en contenedores de estaño de 1 galón, cubetas de 5 galones DOT 17E o bidones de 55 galones DOT 17E.

Como base de diseño de recipientes de las materias primas se toma que se almacena la materia necesaria para siete días completos, teniendo en cuenta el factor de seguridad:

**Tabla 3- 4.** Especificaciones de los tanques de EG y DEG.

| TANQUE 1                              |         | TANQUE 2                              |       |
|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|-------|
| H (m)                                 | 8,85    | H (m)                                 | 3,50  |
| D (m)                                 | 13,28   | D (m)                                 | 5,25  |
| h <sub>cab</sub> (m)                  | 3,32    | h <sub>cab</sub> (m)                  | 1,31  |
| H <sub>tot</sub> (m)                  | 15,49   | H <sub>tot</sub> (m)                  | 6,13  |
| V <sub>cil</sub> (m <sup>3</sup> )    | 1224,90 | V <sub>cil</sub> (m <sup>3</sup> )    | 75,77 |
| V <sub>cab</sub> (m <sup>3</sup> )    | 306,23  | V <sub>cab</sub> (m <sup>3</sup> )    | 18,94 |
| V <sub>tanque</sub> (m <sup>3</sup> ) | 1469,89 | V <sub>tanque</sub> (m <sup>3</sup> ) | 90,92 |
| n° equipos                            | 3       | n° equipos                            | 1     |

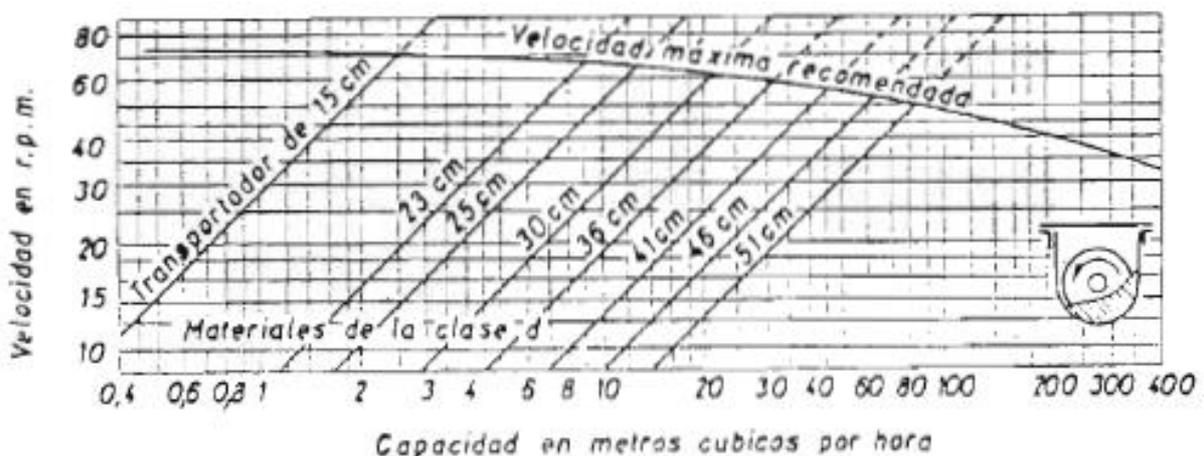
Por lo tanto, se tienen 3 tanques de EG de 1470 m<sup>3</sup> de volumen y un tanque de DEG de 91 m<sup>3</sup> volumen, como se observa en la Tabla 3-4 y, se tienen 6 silos de PTA de 330 m<sup>3</sup> de volumen y un silo de IPA de 105 m<sup>3</sup> de volumen como se observa en la Tabla 3-5.

**Tabla 3- 5.** Especificaciones de los silos de PTA e IPA.

| SILO 1                               |        | SILO 2                               |        |
|--------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|
| H (m)                                | 5,10   | H (m)                                | 3,45   |
| D (m)                                | 7,65   | D (m)                                | 5,18   |
| h <sub>cab</sub> (m)                 | 1,91   | h <sub>cab</sub> (m)                 | 1,29   |
| h <sub>tolva</sub> (m)               | 2,55   | h <sub>tolva</sub> (m)               | 1,73   |
| H <sub>tot</sub> (m)                 | 9,56   | H <sub>tot</sub> (m)                 | 6,47   |
| V <sub>cil</sub> (m <sup>3</sup> )   | 234,41 | V <sub>cil</sub> (m <sup>3</sup> )   | 72,57  |
| V <sub>cab</sub> (m <sup>3</sup> )   | 58,60  | V <sub>cab</sub> (m <sup>3</sup> )   | 18,14  |
| V <sub>tolva</sub> (m <sup>3</sup> ) | 39,07  | V <sub>tolva</sub> (m <sup>3</sup> ) | 12,09  |
| V <sub>silo</sub> (m <sup>3</sup> )  | 332,09 | V <sub>silo</sub> (m <sup>3</sup> )  | 102,80 |
| nº equipos                           | 6      | nº equipos                           | 1      |

Para el diseño de los tornillos sin fin se hace uso de la Figura 3-3, con lo que se calcula la velocidad del tornillo (en revoluciones por minuto) en función de la capacidad a transportar y según la clase de material.

Se considera que, el ácido tereftálico, tanto el IPA como el PTA, como material de clase d, material abrasivo o semiabrasivo, de granulares o pequeños terrones mezclados con finos de 830 a 1600 kg/m<sup>3</sup>. Los materiales de clase d tiene un factor F de 3-4, para el diseño se usa el valor más desfavorable por lo que se utiliza F=4.



**Figura 3- 3.** Curvas de velocidad-capacidad para transportes de tornillo para material clase d.

A continuación, usando la ecuación de la Figura 3-4, se calcula la potencia necesaria por cada alimentador de tornillo. Donde Q es el caudal volumétrico en m<sup>3</sup>/h, ρ es el peso específico del material en t/m<sup>3</sup> encontrándose la potencia en CV, η es el rendimiento del tornillo que es aproximadamente del 30%, L es la longitud del tonillo y H la altura del mismo.

$$Potencia(CV) = \frac{Q \cdot L \cdot F \cdot \rho}{270 \cdot \eta} + \frac{Q \cdot \rho \cdot H}{270}$$

**Figura 3- 4.** Ecuación del cálculo de la potencia de un tornillo sin fin.

Por lo tanto, como se observa en la Tabla 3-6, el Tornillo 1 de capacidad 10m<sup>3</sup>/h tiene una velocidad de 30 rpm con un transportador de 30cm y el Tornillo 2 de capacidad 0,5 m<sup>3</sup>/h tiene una velocidad de 15 rpm con un transportador de 15cm.

**Tabla 3- 6.** Especificaciones de los alimentadores de tornillo.

| <b>TORNILLO 1</b>             |       | <b>TORNILLO 2</b>             |       |
|-------------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| Q (m <sup>3</sup> /h)         | 9,942 | Q (m <sup>3</sup> /h)         | 0,523 |
| Potencia (CV)                 | 7,775 | Potencia (CV)                 | 0,409 |
| Densidad (t/m <sup>3</sup> )  | 1,522 | Densidad (t/m <sup>3</sup> )  | 1,522 |
| F (material clase d)          | 4     | F (material clase d)          | 4     |
| L (m)                         | 10    | L (m)                         | 10    |
| H (m)                         | 5,4   | H (m)                         | 5,4   |
| rend                          | 0,3   | rend                          | 0,3   |
| <b>Transportador de 30 cm</b> |       | <b>Transportador de 15 cm</b> |       |
| <b>velocidad de 30 rpm</b>    |       | <b>velocidad de 15 rpm</b>    |       |

Los mezcladores se calculan en función del caudal en m<sup>3</sup>/h contenido, el mezclador 1 será de 40 l, el mezclador 2 de 2 l y el mezclador 3 de 40 l.

Finalmente, la Bomba 1 es de tipo helicoidal cuyo caudal es de 70 l/h.

### 3.1.2 PREPARACIÓN DE LA PASTA

#### 3.1.2.1 Balances

La Tabla 3-7 representa el balance de materia en la etapa de preparación de la pasta (Figura 2-3), de él se obtiene que es necesaria la producción de aproximadamente 20 toneladas de pasta a la hora.

**Tabla 3- 7.** Balance de materia de la etapa de preparación de la pasta.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |              |             |               |               |
|-----------------------|------------------|--------------|-------------|---------------|---------------|
|                       | 6                | 7            | 8           | 9             | 10            |
| PTA                   | -                | 15,13        | -           | 15,13         | 15,13         |
| IPA                   | -                | -            | 0,80        | 0,80          | 0,80          |
| EG                    | 3,98             | -            | -           | 3,98          | 3,98          |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>3,98</b>      | <b>15,13</b> | <b>0,80</b> | <b>19,91</b>  | <b>19,91</b>  |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>64,16</b>     | <b>91,08</b> | <b>4,79</b> | <b>160,03</b> | <b>160,03</b> |

#### 3.1.2.2 Cálculo de equipos

El cálculo del tanque de preparación de la pasta se realiza mediante las ecuaciones de la Figura 3-1. Se introducen 15 toneladas de PTA, 0,8 toneladas de IPA y 4 toneladas de EG a la hora, el tanque ha de tener un volumen mínimo de 16,84 m<sup>3</sup> (teniendo en cuenta el coeficiente de seguridad) ya que el tiempo de residencia en este equipo es de una hora.

Por lo tanto, el TANQUE 3 tendrá unas dimensiones de H=4,89 m; D=2,45 m; V=16,9 m<sup>3</sup>; será de acero inoxidable y se encontrará a presión y temperatura atmosférica.

La Bomba 2 es una bomba de tornillo helicoidal, esta bomba es una máquina de impulsión de desplazamiento positivo rotativa. El rendimiento volumétrico en este tipo de bombas se encuentra sobre el 90% y el rendimiento másico entre 30-40% para bombas pequeñas y entre 60-80% para bombas grandes.

Para calcular la potencia de una bomba se usa la ecuación de la Figura 3-5 donde  $\dot{m}$  es el caudal másico (kg/s) y  $W_b$  es la energía consumida por la bomba en kJ/kg.

$$Potencia = \dot{m} \cdot W_b = \frac{\rho \cdot Q \cdot \Delta H}{\eta_b} \quad W_b = \frac{H_B - H_A}{\eta_b}$$

**Figura 3- 5.** Cálculo de la potencia que absorbe una bomba.

El caudal es directamente proporcional a la velocidad de giro y mantiene una relativa constancia con la altura (Figura 3-6). En la Figura 3-6, R es el radio del cilindro, L la carrera del pistón y n el número de revoluciones por minuto.

$$Q = \pi \cdot R^2 \cdot L \cdot \eta_v \cdot n$$

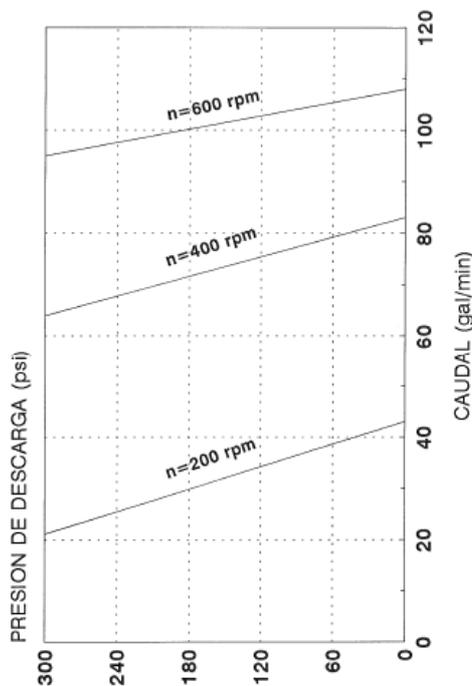
**Figura 3- 6.** Cálculo de la velocidad de giro en función del caudal en una bomba.

Para evitar la cavitación en la bomba lo que llevaría a un desgaste del rodete, a la pérdida de rendimiento y a la erosión de los elementos a transportar se calcula la altura neta positiva de la bomba o NPSH, que es la diferencia de altura en la aspiración de la bomba y la altura del fluido en reposo (a presión de vapor).

$$NPSH_R = \frac{P_A}{\rho} - q \cdot z_A - h_{fA} - \frac{P_0}{\rho} \geq 0 \quad NPSH_D \geq 1,2 * NPSH_R$$

**Figura 3- 7.** Cálculo del NSPH requerido y disponible de una bomba.

Se observa que al aumentar el caudal de fluido disminuye el NPSH disponible en el punto de aspiración de la bomba al ir aumentando el valor de las pérdidas en los conductos.



**Figura 3- 8.** Curva característica de una bomba rotativa.

El punto teórico de la Bomba 2 es  $Q=14,03 \text{ m}^3/\text{h}$  y una  $h_{\text{bomba}}=7,49 \text{ m}$ . Tras la aplicación de las ecuaciones de las figuras anteriores se tiene  $n=400 \text{ rpm}$ , la presión de descarga es 1,1 atm, el NPSH requerido es 11,7 m y el NPSH disponible es 14 m. Así como, la potencia de accionamiento de la bomba es 555,4 W.

Mediante el uso del catálogo del fabricante SDM se escoge una bomba tipo SDFlow-T+ con un caudal de  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  y una velocidad de 300 rpm.

Todos los parámetros de diseño y especificaciones se podrán ver de forma más clara en las hojas de especificaciones del Anexo I, A4.

### 3.1.3 ESTERIFICACIÓN

#### 3.1.3.1 Balances

Las siguientes tablas, Tabla 3-8 y Tabla 3-9, representan la evolución de la reacción de esterificación (Figura 2-3) en los dos reactores de esterificación. Se descartó la producción de AA debido a que su caudal se podría considerar prácticamente traza y se introdujo un caudal de DEG que se considera se consume en la reacción de DEG. El parámetro X en las tablas es el factor de conversión de las reacciones.

**Tabla 3- 8.** Reacción de esterificación con caudales en kmol/h.

| kmol/h            |         | PTA   | EG   | MONÓMERO | AGUA   | X    |
|-------------------|---------|---|--|----------|--|------|
|                   |         | C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (COOH) <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> |          | C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> O <sub>6</sub> |      |
| <b>REACCIÓN 1</b> | Entrada | 95,88   | 244,48                                       | -        | -  | 0,9  |
|                   | Salida  | 9,59  | 71,91  | 86,29    | 172,58   |      |
| <b>REACCIÓN 2</b> | Entrada | 9,59  | 64,72  | 86,29    | 0,00   | 0,95 |
|                   | Salida  | 0,48  | 46,50  | 95,40    | 18,22  |      |

**Tabla 3- 9.** Reacción de esterificación con caudales en t/h.

| t/h               |         | PTA   | EG   | MONÓMERO | AGUA   | X    |
|-------------------|---------|---|--|----------|--|------|
|                   |         | C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (COOH) <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> |          | C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> O <sub>6</sub> |      |
| <b>REACCIÓN 1</b> | Entrada | 15,93   | 15,17  | -        | -  | 0,9  |
|                   | Salida  | 1,59  | 4,46   | 21,94    | 3,11   |      |
| <b>REACCIÓN 2</b> | Entrada | 1,59  | 4,02   | 21,94    | -  | 0,95 |
|                   | Salida  | 0,08  | 2,89   | 24,25    | 0,33   |      |

La Tabla 3-10 y la Tabla 3-11 representan los balances de materia en la etapa de esterificación (Figura 2-5). Se consigue una producción de monómero a la hora de aproximadamente 25 toneladas.

El tiempo de reacción de los reactivos en los reactores es un parámetro crucial, en el primer reactor los reactivos se quedan tres horas y media mientras que en el segundo reactor aproximadamente una hora.

**Tabla 3- 10.** Balance de materia de la etapa de esterificación I.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |               |              |              |             |              |               |
|-----------------------|------------------|---------------|--------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
|                       | 10               | 12            | 13           | 14           | 15          | 16           | 17            |
| PTA                   | 15,13            | -             | -            | -            | -           | -            | -             |
| IPA                   | 0,80             | -             | -            | -            | -           | -            | -             |
| EG                    | 3,98             | 12,90         | 0,76         | -            | -           | -            | 0,45          |
| DEG                   | -                | -             | -            | -            | 0,51        | -            | -             |
| Agua                  | -                | -             | -            | -            | -           | -            | 3,11          |
| HTM                   | -                | -             | -            | 15,35        | -           | 15,35        | -             |
| Monómero              | -                | -             | -            | -            | -           | -            | -             |
| Impurezas             | -                | -             | -            | -            | -           | -            | -             |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>19,91</b>     | <b>12,90</b>  | <b>0,76</b>  | <b>15,35</b> | <b>0,51</b> | <b>15,35</b> | <b>3,55</b>   |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>160,03</b>    | <b>207,81</b> | <b>12,22</b> | <b>-</b>     | <b>4,79</b> | <b>-</b>     | <b>179,77</b> |

**Tabla 3- 11.** Balance de materia de la etapa de esterificación II.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |             |             |              |              |             |
|-----------------------|------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
|                       | 18               | 19          | 20          | 21           | 22           | 46          |
| PTA                   | 1,59             | -           | -           | -            | -            | -           |
| IPA                   | -                | -           | -           | -            | -            | -           |
| EG                    | 3,41             | -           | -           | -            | 2,89         | 0,60        |
| DEG                   | -                | -           | -           | -            | -            | -           |
| Agua                  | -                | -           | -           | -            | 0,33         | -           |
| HTM                   | -                | 1,46        | 1,46        | -            | -            | -           |
| Monómero              | 21,94            | -           | -           | 24,25        | -            | -           |
| Impurezas             | -                | -           | -           | -            | 0,08         | -           |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>26,95</b>     | <b>1,46</b> | <b>1,46</b> | <b>24,25</b> | <b>3,29</b>  | <b>0,60</b> |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>150,89</b>    | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>95,40</b> | <b>65,20</b> | <b>9,71</b> |

### 3.1.3.2 Cálculo de equipos

En el primer reactor de esterificación, REACTOR 1, se introducen 15 toneladas/h de PTA y 18 t/h de EG entre otros. El tiempo de reacción es de 3,5 horas y la temperatura y presión son de 260°C y 1,1 atm. Es de geometría cilíndrica y esbelta, contiene un sistema de agitación interna y un sistema de calefacción mediante aceite térmico y es de acero inoxidable.

En el segundo reactor de esterificación, REACTOR 2, se introducen 22 t/h de monómero, 1,5 t/h de PTA y 3,5 t/h de EG. El tiempo de reacción es de una hora y la temperatura y la presión son de 265°C y 0,4 atm. Es de geometría cilíndrica y contiene un sistema de agitación interna y un sistema de calefacción mediante aceite térmico y está constituido por acero inoxidable.

El cálculo de volumen de los reactores se realiza de forma simplificada conociendo el tiempo de ciclo de los reactivos en el reactor y el caudal introducido en cada reactor debido a que los reactores del proceso son discontinuos, es más conveniente trabajar con tiempo de ciclo y no tiempo de residencia.

Un ciclo está compuesto por el tiempo de llenado del reactor, el tiempo de reacción y el tiempo de descarga, así como el tiempo de alcanzar la temperatura necesaria de operación y el tiempo de enfriamiento.

$$t_{ciclo} = t_{llenado} + t_{alcanzTra} + t_{reacción} + t_{descarga} + t_{enfri}$$

**Figura 3- 9.** Cálculo de un ciclo.

$$t_{ciclo} = \frac{V}{Q}$$

**Figura 3- 10.** Cálculo del volumen del reactor, donde V se encuentra en m<sup>3</sup> y Q en m<sup>3</sup>/h.

Se supone que el tiempo de llenado de ambos reactores es de 20 min, el tiempo de descarga es de 20 min y el tiempo de alcanzar la temperatura y el tiempo de enfriamiento son de 10 min cada uno.

Por lo tanto, el tiempo de ciclo del reactor 1 es de 4,5h obteniéndose un volumen de 145 m<sup>3</sup> ( $D_{\text{reactor1}} = 5$  m;  $H_{\text{reactor1}} = 7,5$  m) y un volumen de 51 m<sup>3</sup> en el Reactor 2 ( $D_{\text{reactor2}} = 3,53$  m;  $H_{\text{reactor2}} = 5,3$  m)

### 3.1.4 PREPOLIMERIZACIÓN

#### 3.1.4.1 Balances

La siguiente tabla, Tabla 3-12, representa los balances de materia entre las diferentes corrientes de la etapa de prepolimerización del proceso (Figura 2-7). Se observa que se produce aproximadamente 23 toneladas de prepolímero a la hora.

**Tabla 3- 12.** Balance de materia en la etapa de prepolimerización.

| ELEMENTO                       | CORRIENTES (t/h) |      |      |      |       |       |       |      |
|--------------------------------|------------------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
|                                | 21               | 35   | 36   | 37   | 38    | 39    | 40    | 53   |
| EG                             | -                | 0,06 | -    | -    | 0,50  | -     | -     | 0,45 |
| Colorante                      | -                | 0,06 | -    | -    | -     | -     | -     | -    |
| H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | -                | 0,00 | -    | -    | -     | -     | -     | -    |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                | 0,01 | -    | -    | -     | -     | -     | -    |
| Agua                           | -                | -    | -    | -    | -     | -     | -     | -    |
| HTM                            | -                | -    | 5,48 | 5,48 | -     | -     | -     | -    |
| Monómero                       | 24,25            | -    | -    | -    | -     | -     | -     | -    |
| Prepolímero                    | -                | -    | -    | -    | -     | 22,80 | 22,80 | -    |
| Impurezas                      | -                | -    | -    | -    | 1,46  | -     | -     | -    |
| <b>TOTAL (t/h)</b>             | 24,25            | 0,12 | 5,48 | 5,48 | 1,96  | 22,80 | 22,80 | 0,45 |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b>          | 95,40            | 1,09 | -    | -    | 13,82 | 4,05  | 4,05  | 7,18 |

#### 3.1.4.2 Cálculo de equipos

En el reactor de prepolimerización, es decir, el REACTOR 3, se introducen 24 t/h de monómero, así como la mezcla de todos los aditivos del proceso y 500 l/h de EG. El tiempo de reacción es de una hora y la temperatura y la presión son de 285°C y 0,04 atm. Este reactor es de geometría cilíndrica y contiene un sistema de agitación interna y de calefacción con aceite térmico y es de acero inoxidable como los reactores de esterificación.

El cálculo del volumen de reactor se realiza con ayuda de la Figura 3-9 y Figura 3-10.

El tiempo de carga y descarga es de 40 min, mientras que el tiempo de alcanzar la temperatura de operación y el de enfriamiento del reactor es de 20min y el tiempo de reacción es de 2 horas, por lo que el tiempo de ciclo del reactor 3 será de 3h obteniéndose un volumen de reactor de 70 m<sup>3</sup> ( $D_{\text{reactor3}} = 4,8$  m;  $H_{\text{reactor3}} = 3,2$  m).

La bomba de prepolimerización, Bomba 3, es de desplazamiento positivo, por lo que se calcula de la misma forma que la bomba de tornillo de la etapa de preparación de la pasta. En esta etapa se necesita una alimentación muy estable por lo que se usa una bomba de piñones o engranajes, bomba de desplazamiento positivo rotativa con rotor múltiple.

La Bomba 3 tendrá una altura de impulsión de 11,5 m y un NPSH disponible de 11,8 m y NPSH requerido de 9,78 m. La potencia de accionamiento de la bomba es de 1060W y el caudal es de 15,16 m<sup>3</sup>/h aproximadamente.

Se puede estudiar con más detenimiento en el apartado ANEXO I, A4 donde se encuentran sus hojas de especificación.

### 3.1.5 POLIMERIZACIÓN

#### 3.1.5.1 Balances

La Tabla 3-13, representa el balance de materia de la etapa de polimerización (Figura 2-9). En esta se aprecia que se produce 22,3 toneladas de polímero amorfo a la hora, así como casi 0,5 toneladas de impurezas.

**Tabla 3- 13.** Balance de materia de la etapa de polimerización.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |             |             |             |             |              |
|-----------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
|                       | 40               | 41          | 42          | 43          | 54          | 59           |
| EG                    | -                | -           | -           | 0,25        | 0,09        | -            |
| Agua                  | -                | -           | -           | -           | -           | -            |
| HTM                   | -                | 1,48        | 1,48        | -           | -           | -            |
| N <sub>2</sub>        | -                | -           | -           | -           | -           | -            |
| Prepolímero           | 22,80            | -           | -           | -           | -           | -            |
| Polímero amorfo       | -                | -           | -           | -           | -           | 22,34        |
| Impurezas             | -                | -           | -           | 0,46        | -           | -            |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>22,80</b>     | <b>1,48</b> | <b>1,48</b> | <b>0,71</b> | <b>0,09</b> | <b>22,34</b> |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>4,05</b>      | <b>-</b>    | <b>-</b>    | <b>4,17</b> | <b>1,49</b> | <b>1,36</b>  |

#### 3.1.5.2 Cálculo de equipos

Esta etapa está constituida únicamente por el reactor de polimerización, REACTOR 4, se introducen 22,8 toneladas de prepolímero a la hora. El tiempo de reacción es de una hora y la temperatura y la presión de 290 °C y 0,001 atm. Al igual que los demás reactores, tiene un sistema de agitación interna y de calefacción con aceite térmico y es de acero inoxidable.

El tiempo de carga y descarga del reactor será de 40 min así como el tiempo de alcanzar la temperatura y el tiempo de enfriamiento es de 20 min, mientras que el tiempo de reacción es de 1 hora, por lo que el tiempo de ciclo es 2h necesiándose un volumen de reactor 1250 m<sup>3</sup> ( $D_{\text{reactor4}}= 12,6$  m;  $H_{\text{reactor4}}= 14,70$  m).

### 3.1.6 PELETIZACIÓN

#### 3.1.6.1 Balances

Las siguientes tablas, la Tabla 3-14 y la Tabla 3-15, muestra el balance de materia global de la etapa de peletización (Figura 2-10) del proceso.

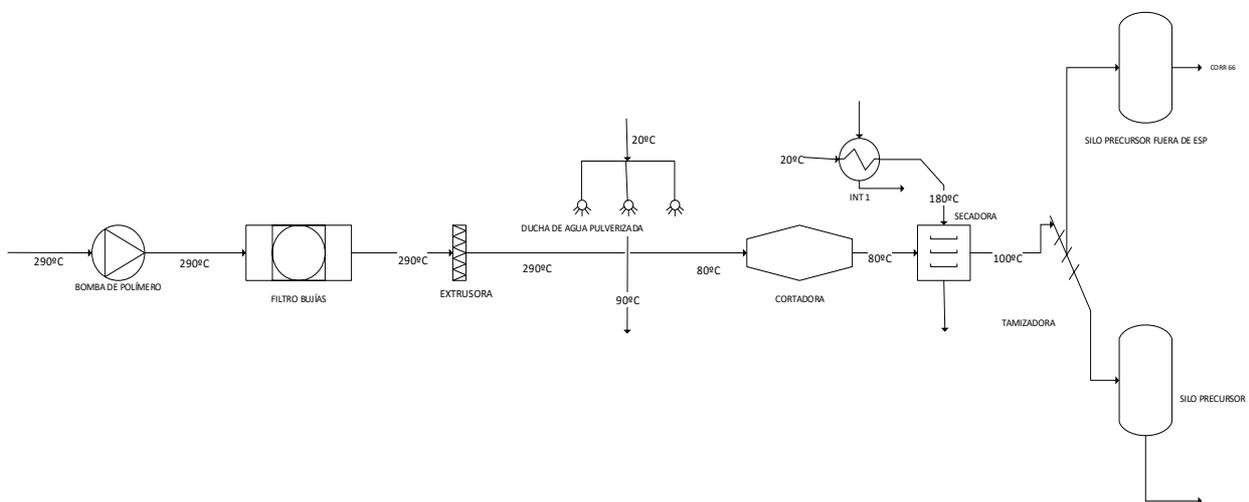
**Tabla 3- 14.** Balance de materia de la etapa de peletización I.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |                |                |                |                |                |                |              |              |  |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--|
|                       | 59               | 60             | 61             | 62             | 62sal          | 63             | 64             | 65           | 66           |  |
| Agua                  | -                | -              | -              | -              | 0,19           | 0,19           | 0,00001        | -            | -            |  |
| Aire                  | -                | -              | -              | -              | -              | -              | -              | -            | -            |  |
| HTM                   | -                | -              | -              | -              | -              | -              | -              | -            | -            |  |
| P. amorfo             | 22,34            | 22,34          | 22,34          | 22,34          | 22,34          | 22,34          | 22,34          | 1,12         | 1,12         |  |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>22,34</b>     | <b>22,34</b>   | <b>22,34</b>   | <b>22,34</b>   | <b>22,53</b>   | <b>22,53</b>   | <b>22,34</b>   | <b>1,12</b>  | <b>1,12</b>  |  |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>1363,26</b>   | <b>1363,26</b> | <b>1363,26</b> | <b>1363,26</b> | <b>1373,74</b> | <b>1373,74</b> | <b>1363,26</b> | <b>68,16</b> | <b>68,16</b> |  |

**Tabla 3- 15.** Balance de materia de la etapa de peletización II.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |                |                |                |               |               |               |              |              |  |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--|
|                       | 67               | 68             | 69             | 70             | 71            | 72            | 73            | 74           | 75           |  |
| Agua                  | -                | -              | 37,72          | 37,53          | -             | -             | 0,19          | -            | -            |  |
| Aire                  | -                | -              | -              | -              | 24,89         | 24,89         | 24,89         | -            | -            |  |
| HTM                   | -                | -              | -              | -              | -             | -             | -             | 11,61        | 11,61        |  |
| P. amorfo             | 21,23            | 21,23          | -              | -              | -             | -             | -             | -            | -            |  |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>21,23</b>     | <b>21,23</b>   | <b>37,72</b>   | <b>37,53</b>   | <b>24,89</b>  | <b>24,89</b>  | <b>25,08</b>  | <b>11,61</b> | <b>11,61</b> |  |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>1295,10</b>   | <b>1295,10</b> | <b>2095,28</b> | <b>2084,80</b> | <b>861,26</b> | <b>861,26</b> | <b>871,74</b> | <b>-</b>     | <b>-</b>     |  |

A continuación, en la siguiente figura (Figura 3-11) se contemplan las variaciones de temperatura de la etapa de peletización.



**Figura 3- 11.** Balance térmico de la etapa de peletización.

### 3.1.6.2 Cálculo de equipos

La etapa comienza con la Bomba 4 que es una bomba de engranajes, bomba de desplazamiento positivo rotativa de rotor múltiple. Se calcula al igual que las anteriores mediante las figuras, Figura 3-5, Figura 3-6 y Figura 3-7.

La Bomba 4 proporciona una altura de impulsión de 4,3 m y un NPSH disponible de 5,1 m y NPSH requerido de 4,2 m. La potencia de accionamiento de la bomba es de 373 W y el caudal es de 5,6 m<sup>3</sup>/h aproximadamente.

Posteriormente, en el ANEXO I, A4 se encuentra la hoja de especificaciones de la bomba.

Por otro lado, el Filtro 1 es un filtro de discos neumáticos (Sharplex) cuyas ventajas son: operación de auto-limpieza en línea y tiempo de purga ajustable, no involucra mano de obra, sin reemplazo de medio de filtro, muy baja caída de presión y no hay pérdida de productos.

Este tipo de filtro tiene varios modelos según el fabricante, modelos detallados en la Tabla 3-16.

**Tabla 3- 16.** Modelos de filtros de discos neumáticos Sharplex.

| MODELO   | CAPACIDAD                     |
|----------|-------------------------------|
| SFC-400  | De hasta 7 m <sup>3</sup> /h  |
| SFC-800  | De hasta 14 m <sup>3</sup> /h |
| SFC-1600 | De hasta 25 m <sup>3</sup> /h |

La capacidad a filtrar de la planta es de 9 m<sup>3</sup>/h, por lo que el filtro utilizado es un filtro de disco neumático Sharplex Modelo SFC-800 de hasta 14 m<sup>3</sup>/h.



**Figura 3- 12.** Imagen de filtro de discos neumáticos. [54]

Por otro lado, la Extrusora [55] será una extrusora Asunt/ CE AS90 con diámetro de cuerda de 5-30 mm, diámetro de tornillo de 90 mm, velocidad de tornillo 30-70 m/min, una anchura de cabeza de troquel de

800mm, una tasa de estiramiento de 1:5 y una potencia de 50 kW.

El lavador de agua pulverizada tendrá una capacidad de 40 m<sup>3</sup>/h aproximadamente, como se observa en la Tabla 3-17 donde las corrientes 69 y 70 son la entrada y salida del agua y la corriente 62 la corriente de polímero amorfo.

**Tabla 3- 17.** Balance de energía en el lavador de agua pulverizada.

| LAVADOR      | Corriente 69 | Corriente 70 | Corriente 62 | Corriente 62sal |
|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| m (kg/h)     | 37715,0      | 37526,4      | 22342,5      | 22531,1         |
| T (K)        | 293          | 363          | 563          | 353             |
| Cp (kJ/kg·K) | 4,18         | 4,18         | 2,352        | 2,352           |

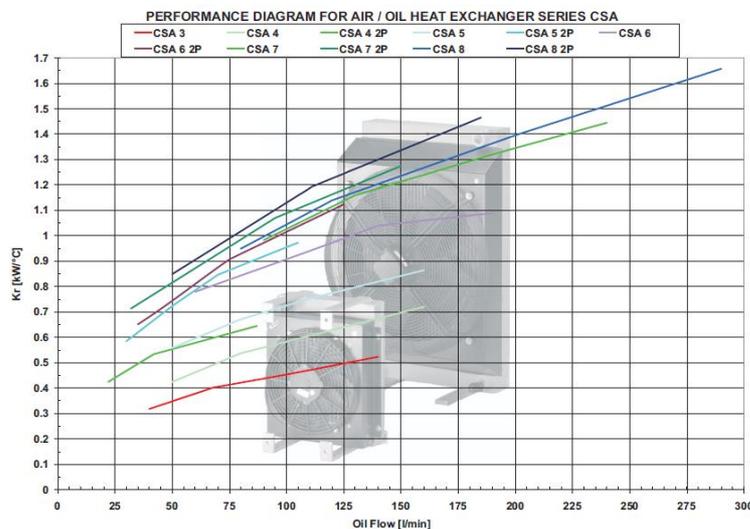
La cortadora [56] será una UG Underwater Pelletizer UG500 con una capacidad de 35 t/h, máxima velocidad de cuchillo de 1000 min<sup>-1</sup> y una potencia de 70 kW.

Tras la cortadora se encuentra la secadora, para realizar el balance de energía representado en la Tabla 3-18 se ha tenido en cuenta que la absorción de agua del PET hasta alcanzar la saturación es de 0,5% [57] y que la humedad máxima contenida en el PET puede ser 0,005%. La potencia de la Secadora deberá ser de 248,4kW.

**Tabla 3- 18.** Balance de energía en la secadora.

| SECADORA       | Corriente 72 | Corriente 63 | Corriente 64 | Corriente 73 |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| m (kg/h)       | 24890,5      | 22531,1      | 22342,5      | 25079,1      |
| T (K)          | 453          | 353          | 373          | 423          |
| Cp (kJ/kg·K)   | 1,019        | -            | -            | 1,014        |
| DeltaH (kJ/kg) | -            | 2,352        | 2,352        | -            |

Seguidamente, el Intercambiador 1 se utiliza para calentar el aire de servicios hasta la temperatura de operación de la secadora mediante aceite térmico.



**Figura 3- 13.** Diagrama de intercambiador de aceite/aire.

El Intercambiador 1 necesita un caudal de aceite de 237 l/min, por lo tanto, mediante el uso de la Figura 3-12, se obtiene el intercambiador deseado Cessie que sería el CSA 8 con un gradiente de 1,5 kW/°C.

Finalmente decir que la Tamizadora clasifica los pellets por tamaño dejando pasar el polímero de tamaño admisible. La Tamizadora [58] será un tamiz vibratorio de alta frecuencia (Longshi) Modelo ZC-500 con un tamaño de malla de 2,5-6 mm y una potencia de 2,2kW ya que como se dijo posteriormente en el apartado 2.1.6.2, los pellets tendrán un tamaño de 2,8 mm aproximadamente.

El Silo 6 y el Silo 7 se calculan mediante las ecuaciones de la Figura 3-2, sus medidas se pueden observar en la tabla siguiente, Tabla 3-19. Siendo la capacidad del silo de precursor (Silo 7) de 15,52 m<sup>3</sup> y del silo de precursor fuera de especificación (Silo 6) de 0,81 m<sup>3</sup>, teniendo una capacidad de 7 días de producción, es decir, el silo 7 tiene una carga de 3560 toneledas y el silo 6 de 190 toneladas.

**Tabla 3- 19.** Especificaciones de los silos de precursor y precursor fuera de especificación.

| SILO 6                                  |             | SILO 7                                  |              |
|---|-------------|---|--------------|
| H (m)                                   | 1,22        | H (m)                                   | 3,27         |
| D (m)                                   | 0,82        | D (m)                                   | 2,18         |
| h <sub>cab</sub> (m)                    | 0,20        | h <sub>cab</sub> (m)                    | 0,54         |
| h <sub>tolva</sub> (m)                  | 0,61        | h <sub>tolva</sub> (m)                  | 1,63         |
| H <sub>tot</sub> (m)                    | 2,04        | H <sub>tot</sub> (m)                    | 5,44         |
| V <sub>cil</sub> (m <sup>3</sup> )      | 0,64        | V <sub>cil</sub> (m <sup>3</sup> )      | 12,15        |
| V <sub>cab</sub> (m <sup>3</sup> )      | 0,07        | V <sub>cab</sub> (m <sup>3</sup> )      | 1,35         |
| V <sub>tolva</sub> (m <sup>3</sup> )    | 0,11        | V <sub>tolva</sub> (m <sup>3</sup> )    | 2,02         |
| <b>V<sub>silo</sub> (m<sup>3</sup>)</b> | <b>0,81</b> | <b>V<sub>silo</sub> (m<sup>3</sup>)</b> | <b>15,52</b> |
| <b>nº equipos</b>                       | <b>1,00</b> | <b>nº equipos</b>                       | <b>1,00</b>  |

### 3.1.7 REGENERACIÓN DE ETILENGLICOL

#### 3.1.7.1 Balances

Las siguientes tablas, la Tabla 3-20, la Tabla 3-21 y la Tabla 3-22, representan los balances de materia correspondientes a la etapa de recuperación del etilenglicol.

**Tabla 3- 20.** Balance de materia en la etapa de regeneración de EG I.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |               |              |              |             |               |             |
|-----------------------|------------------|---------------|--------------|--------------|-------------|---------------|-------------|
|                       | 11               | 17            | 22           | 38           | 43          | 44            | 45          |
| EG                    | 7,62             | 0,45          | 2,89         | 0,50         | 0,25        | 4,09          | 0,60        |
| Agua                  | -                | 3,11          | 0,33         | -            | -           | 3,43          | 0,00        |
| Impurezas             | -                | -             | 0,08         | 1,46         | 0,46        | 1,99          | -           |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>7,62</b>      | <b>3,55</b>   | <b>3,29</b>  | <b>1,96</b>  | <b>0,71</b> | <b>9,51</b>   | <b>0,60</b> |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>122,70</b>    | <b>179,77</b> | <b>65,03</b> | <b>13,82</b> | <b>4,17</b> | <b>262,78</b> | <b>9,71</b> |

**Tabla 3- 21.** Balance de materia en la etapa de regeneración de EG II.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |              |             |              |             |             |
|-----------------------|------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|                       | 46               | 48           | 49          | 50           | 51          | 52          |
| EG                    | 0,60             | 0,54         | -           | 0,54         | -           | 0,54        |
| Agua                  | -                | 0,17         | 0,09        | 0,09         | 0,09        | -           |
| Impurezas             | -                | 0,40         | 0,20        | -            | 0,20        | -           |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>0,60</b>      | <b>1,11</b>  | <b>0,28</b> | <b>0,62</b>  | <b>0,28</b> | <b>0,54</b> |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>9,71</b>      | <b>18,26</b> | <b>4,80</b> | <b>13,44</b> | <b>4,80</b> | <b>8,67</b> |

**Tabla 3- 22.** Balance de materia en la etapa de regeneración de EG III.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |             |               |             |               |               |
|-----------------------|------------------|-------------|---------------|-------------|---------------|---------------|
|                       | 53               | 54          | 55            | 56          | 57            | 58            |
| EG                    | 0,45             | 0,09        | 7,44          | -           | -             | 7,44          |
| Agua                  | -                | -           | 3,19          | 0,07        | 3,19          | -             |
| Impurezas             | -                | -           | -             | 1,59        | -             | -             |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>0,45</b>      | <b>0,09</b> | <b>10,63</b>  | <b>1,59</b> | <b>3,19</b>   | <b>7,44</b>   |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>7,18</b>      | <b>1,49</b> | <b>297,28</b> | <b>4,03</b> | <b>177,44</b> | <b>119,85</b> |

### 3.1.7.2 Cálculo de equipos

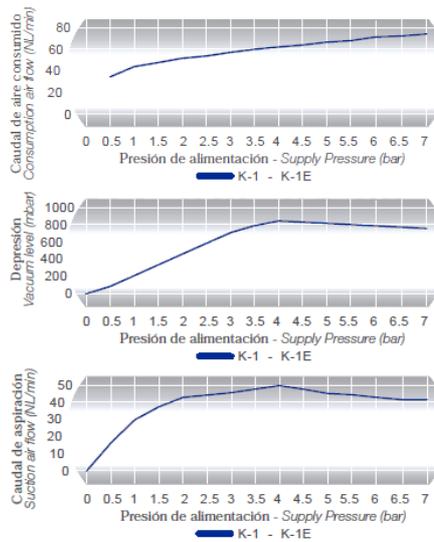
El Scrubber está alimentado por las corrientes que provienen de los reactores de esterificación y de los reactores de prepolimerización y polimerización, así como de una corriente de EG fresca que realiza la función de ducha. Este equipo consiste en un lavador por vía húmeda y se encarga de separar tanto el agua como los sólidos de la corriente de etilenglicol permitiendo reutilizar gran parte de esta. El Scrubber tiene una capacidad de 20 t/h y es un Scrubber Ciclónico Multietapas Modelo Vortex 7200 [59] con una altura de 6500 mm y un diámetro de 1400 mm. Está construido en propileno PPH con aditivo de protección UV, este material le confiere una resistencia total a la corrosión y tiene una eficiencia de aproximadamente 95%.

Entre las ventajas del uso de este equipo se encuentran: una caída de presión relativamente baja, la posibilidad de manejar polvos inflamables con poco riesgo y una inversión inicial relativamente baja. Y, entre sus desventajas destacan coste de operación alto y no ser muy adecuado para la recuperación de partículas finas.

Por otro lado, los eyectores están alimentados por etilenglicol y producen presiones bajas en cada reactor, además extraen los vapores del reactor para el refinado del etilenglicol condensándolos.

Los eyectores son Eyectores de vacío INDEX Serie K, Standard and high suction flow [60]. A continuación, en la Figura 3-13 se presentan una serie de gráficas de comportamiento, las cuales representan el caudal de aire consumido frente a la presión de alimentación, la depresión frente a la presión de alimentación y el caudal de aspiración frente a la presión de aspiración. La presión de alimentación de los eyectores sería de 0,8 atm por lo tanto, el caudal de aire consumido sería de 40 NI/min, la depresión de 175 mbar y el caudal de aspiración de 25 NI/min.

**GRAFICA DE COMPORTAMIENTO**  
**BEHAVIOUR GRAPHIC**



**Figura 3- 14.** Gráficas de comportamiento de Eyectores.

La Bomba 5 es una bomba de desplazamiento positivo con una altura de bomba de 4,6 m; un NPSH disponible de 4,7 m y un NPSH requerido de 3,9 m. La potencia de accionamiento de la bomba es d 10,7 kW, es mucho más grande que la potencia de las demás bombas debido a que el fluido que impulsa tiene una viscosidad superior a lo demás fluidos y necesita mucha potencia para ser impulsado; y el caudal es de 0,54 m<sup>3</sup>/h aproximadamente.

La Torre 1, es una torre de destilación con la cual mediante la diferencia de volatilidades de los componentes se realiza la separación asumida ideal de los mismos, se introducen aproximadamente 9,86 m<sup>3</sup>/h de mezcla de agua y EG y salen por cabeza 3,19 m<sup>3</sup>/h y por fondos 6,67 m<sup>3</sup>/h.

## 3.2 FASE SÓLIDA

### 3.2.1 CRISTALIZACIÓN

#### 3.2.1.1 Balances

Las siguientes tablas, la Tabla 3-23, la Tabla 3-24 y la Tabla 3-25 representan los balances de materia de la etapa de cristalización de la fase sólida (Figura 2-12).

**Tabla 3- 23.** Balance de materia en la etapa de cristalización I.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |       |       |       |       |        |
|-----------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                       | 68               | 76    | 77    | 78    | 79    | 80     |
| Agua                  | -                | -     | -     | -     | -     | -      |
| Aire                  | -                | -     | 36,25 | 34,96 | -     | 3,85   |
| Polímero amorfo       | 21,23            | 21,23 | 26,20 | 23,58 | -     | -      |
| Polímero cristaliz.   | -                | -     | -     | -     | 21,23 | -      |
| Impurezas             | -                | -     | -     | -     | -     | -      |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | 21,23            | 21,23 | 62,45 | 58,54 | 21,23 | 3,85   |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | 1,30             | 1,30  | 1,60  | 1,44  | 1,30  | 133,13 |

**Tabla 3- 24.** Balance de materia en la etapa de cristalización II.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |              |                |               |               |               |
|-----------------------|------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
|                       | 81               | 82           | 83             | 84            | 85            | 86            |
| Agua                  | -                | -            | 30,00          |               |               |               |
| Aire                  | 2,31             | 1,54         | -              | 18,00         | 18,00         | 12,00         |
| Polímero amorfo       | -                | -            | -              | -             | -             | -             |
| Polímero cristaliz.   | -                | -            | -              | -             | -             | -             |
| Impurezas             | -                | -            | -              | -             | -             | -             |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>2,31</b>      | <b>1,54</b>  | <b>30,00</b>   | <b>18,00</b>  | <b>18,00</b>  | <b>12,00</b>  |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>79,88</b>     | <b>53,25</b> | <b>1666,67</b> | <b>622,84</b> | <b>622,84</b> | <b>415,22</b> |

**Tabla 3- 25.** Balance de materia en la etapa de cristalización III.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |              |              |                |               |                |
|-----------------------|------------------|--------------|--------------|----------------|---------------|----------------|
|                       | 87               | 88           | 89           | 90             | 91            | 92             |
| Agua                  |                  | -            | -            | -              | -             | -              |
| Aire                  | 12,00            | 2,31         | 1,54         | 34,09          | 3,60          | 37,69          |
| Polímero amorfo       | -                | -            | -            | -              | -             | -              |
| Polímero cristaliz.   | -                | -            | -            | -              | -             | -              |
| Impurezas             | -                | -            | -            | 2,36           | 2,62          | 4,98           |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>12,00</b>     | <b>2,31</b>  | <b>1,54</b>  | <b>36,45</b>   | <b>6,22</b>   | <b>42,67</b>   |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>415,22</b>    | <b>79,88</b> | <b>53,25</b> | <b>1179,83</b> | <b>124,73</b> | <b>1304,56</b> |

A continuación, la Tabla 3-27 representa el balance de materia de la caldera pirotubular para producir vapor sobrecalentado a partir de agua a temperatura ambiente, calculado con las ecuaciones de la Figura 3-15.

$$\begin{aligned}
 n \cdot O_T \cdot \left( \frac{100}{21} - \frac{1}{v_{O_2}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{79}{21} \cdot \frac{v_{CO_2}}{v_{O_2}} \right) \\
 = \left( 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{CO_2}}{v_{O_2}} \right) \left( \frac{C - C_R}{12 \cdot v_{CO_2}} - \frac{C}{12} - \frac{S}{32} - \frac{N}{28} + O_T \right) \\
 - \left( \frac{1}{v_{CO_2}} + \frac{1}{2} \right) \left( \frac{C - C_R}{12} - \frac{C_R}{12} \cdot \frac{v_{CO_2}}{v_{O_2}} + O_T \cdot \frac{v_{CO_2}}{v_{O_2}} \right) \\
 b = \left( \frac{C - C_R}{12} - \frac{v_{CO_2}}{v_{O_2}} \left( (n - 1) \cdot O_T + \frac{C_R}{12} \right) \right) \cdot \left( \frac{12}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{CO_2}}{v_{O_2}}} \right) \\
 C_R = \frac{C'_R}{1 - C'_R} \cdot P \\
 X = a + b \\
 C = X + C_R
 \end{aligned}$$

**Figura 3- 15.** Cálculo de parámetros del balance de materia en la caldera.

En la Figura 3-15, el parámetro  $O_T$  es el oxígeno teórico, a son los kg  $CO_2$ /kg combustible, b son los kg CO/kg combustible,  $C_R$  son los kg inquemados/kg combustible y P son las cenizas en kg inquemados/kg combustible. El balance de materia en la caldera de vapor saturado se realiza asumiendo que  $v_{CO_2} = 12\%$  y  $v_{O_2} = 5\%$  y  $C'_R = 20\%$ . Además de la composición del combustible, que es Gasóleo tipo C (Tabla 3-26).

Además, en la Tabla 3-28 se presentan el caudal de gases de combustión, así como el caudal de aire necesitado para quemar el combustible calculados con las ecuaciones de la Figura 3-16.

$$m_{gs} = \left( \frac{44}{12} \cdot a + \frac{28}{12} \cdot b + 2S + \left( (n - 1) \cdot O_T + \frac{b}{12} + \frac{C_R}{12} \right) \cdot 32 + 28 \cdot \frac{79}{21} \cdot n \cdot O_T + N_2 \right)$$

$$m_v = 9H + W$$

**Figura 3- 16.** Cálculo de caudal de gases de combustión (*kg gas seco/kg combustible*) y caudal de vapor de agua (*kg vapor de agua/kg combustible*)

**Tabla 3- 26.** Composición del combustible introducido en la caldera. [50]

| Composición del combustible |       |
|-----------------------------|-------|
| C                           | 0,86  |
| H                           | 0,111 |
| S                           | 0,008 |
| N                           | 0,01  |
| H <sub>2</sub> O            | 0,01  |
| P                           | 0,001 |
| TOTAL                       | 1     |

**Tabla 3- 27.** Balance de materia en la caldera de vapor sobrecalentado.

| BALANCE MATERIA |                       | Entrada (kg/kg cble) | Salida (kg/kg cble) |                       |
|-----------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| Combustible     | H                     | 0,111                | 0,9990              | H <sub>2</sub> O      |
|                 | a                     | 0,8229               | 3,0173              | CO <sub>2</sub>       |
|                 | b                     | 0,01211              | 0,0283              | CO                    |
|                 | Cr                    | 0,025                | 0,0250              | Cr                    |
|                 | N                     | 0,01                 | 0,0100              | N <sub>2</sub>        |
|                 | S                     | 0,008                | 0,0160              | SO <sub>2</sub>       |
|                 | H <sub>2</sub> O_cble | 0,01                 | 0,0100              | H <sub>2</sub> O_cble |
| TOTAL           |                       | 1,00                 | 4,1056              |                       |
| n=1,261         |                       | Entrada              | Salida              |                       |
| Aire            | O <sub>2</sub>        | 4,0224               | 0,9153              | O <sub>2</sub>        |
|                 | N <sub>2</sub>        | 13,3196              | 13,3196             | N <sub>2</sub>        |
| TOTAL           |                       | 17,3420              | 14,2349             |                       |
| TOTAL           |                       | 18,3410              | 18,3404             |                       |

$O_{teorico}$   
0,09967

**Tabla 3- 28.** Caudales de gases de la caldera.

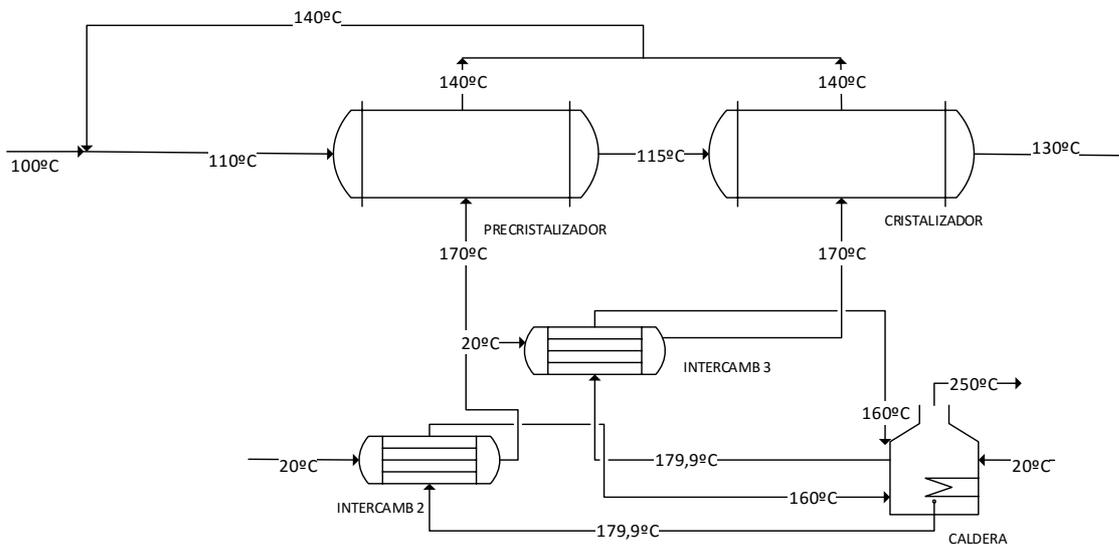
|                               |                       |         |           |
|-------------------------------|-----------------------|---------|-----------|
| <b>Caudal de gases secos</b>  | mgs                   | 17,3314 | kg/kgcble |
| <b>Caudal de vapor</b>        | mv                    | 1,0090  | kg/kgcble |
| <b>Total gases</b>            | mgh                   | 18,3404 | kg/kgcble |
| <b>Caudal de aire real</b>    | ma                    | 17,342  | kg/kgcble |
| <b>Caudal de aire teórico</b> | ma <sub>teórico</sub> | 13,688  | kg/kgcble |

La Tabla 3-29, representa el balance de energía de la caldera mediante el cual se conocen los diferentes tipos de potencias de entrada y salida de la caldera. Para recordar los datos necesarios para la realización del balance de energía se debe volver a la Tabla 2-13 del capítulo anterior, en la cual se muestran las diferentes temperaturas, entalpías, calores específicos y caudales necesarios para la realización del balance.

**Tabla 3- 29.** Balance de energía de la caldera de vapor.

| <b>BALANCE ENERGÍA</b> |                 | <b>Entrada (kW)</b> | <b>Salida (kW)</b> |
|------------------------|-----------------|---------------------|--------------------|
| Combustible            | Calor reacción  | 27952,20            | -                  |
|                        | Calor sensible  | -                   | -                  |
| Aire                   | air calor sensi | -                   | -                  |
| Potencia útil          |                 | -                   | 22189,85           |
| Gases                  | Gases secos     | -                   | 3977,56            |
|                        | Vapor agua      | -                   | 431,35             |
| Inquemados             | inq sol         | -                   | 847,67             |
|                        | inq gas         | -                   | 283,88             |
| Pérdidas paredes       |                 | -                   | 221,90             |
| <b>TOTAL</b>           |                 | <b>27952,20</b>     | <b>27952,20</b>    |

Finalmente, la Figura 3-17 representa el balance térmico de la etapa de cristalización mediante el siguiente diagrama (temperaturas calculadas mediante el software EES):



**Figura 3- 17.** Balance térmico de la etapa de cristalización.

### 3.2.1.2 Cálculo de equipos

En esta etapa se tienen dos intercambiadores de calor, Intercambiador 2 e Intercambiador 3, en ambos el fluido caliente es el vapor proveniente de la caldera y el fluido frío es el aire proveniente de servicios.

La Caldera es una caldera de vapor saturado alimentada por gasoil de composición presentada en la Tabla 2-12 y por agua de servicios, que se evapora y se lleva a la saturación.

Para la realización del balance de energía en la caldera, presentado en la Tabla 3-29 se usan los siguientes datos: la  $\Delta H_{L-V} = 2662,782 \text{ kJ/kg}$ ,  $C_{p\text{agua}} = 4,18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ , la  $T_{\text{vapor}} = 452,9 \text{ K}$  y la  $T_{\text{agua}} = 298 \text{ K}$ . El calor latente del vapor de agua es de  $2015,3 \text{ kJ/kg}$  siendo la  $P = 10 \text{ bar}$  y  $T = 179,9^\circ\text{C}$  y tienen un  $C_{p\text{GasesCb}} = 1,02 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  y  $C_{p\text{vapor}} = 1,9 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  siendo la temperatura de los gases de salida de  $250^\circ\text{C}$ .

Por otro lado, el almacenamiento de combustible, para almacenar gasoil, lo más recomendable es emplear un depósito de plástico de doble pared. Una marca que cuenta con este tipo de depósitos de varias capacidades es Schutz [61].

La Caldera se especifica como una caldera de vapor media presión de tres pasos de humo VAPOPRES 3GN 12000, cuya presión de diseño estándar es de 10-12-15 bares y la producción de vapor de 2,15 a 28 t/h. Así como la potencia útil de 13956 kW. La cámara de evaporación está ampliamente dimensionada con una gran área de intercambio para la producción de vapor saturado de alta calidad. La cámara de combustión está reforzada con juntas omega o de cuña y el quemador está fijado a la placa de anclaje quemador.

| VAPOPRES 3GN   |                 | 1000  | 1250  | 1500  | 1750  | 2000  | 2500  | 3000  | 3500  | 4000  | 4500  | 5000  | 6000   | 7200   | 9000   | 10400  | 12000  | 15000  |
|--|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Potencia útil / Heat output                              | kW              | 1109  | 1455  | 1744  | 2035  | 2326  | 2907  | 3488  | 4070  | 4651  | 5233  | 5814  | 6977   | 8374   | 10465  | 12093  | 13956  | 16895  |
| Gasto calorífico/ Heat input                             | kW              | 1252  | 1615  | 1938  | 2261  | 2584  | 3230  | 3876  | 4522  | 5168  | 5814  | 6460  | 7752   | 9302   | 11628  | 13457  | 15504  | 18773  |
| Producción de vapor Alm. / Steam production Alm. 80°C    | t/h             | 1,627 | 2,132 | 2,559 | 2,985 | 3,412 | 4,193 | 5,118 | 5,970 | 6,824 | 7,676 | 8,529 | 10,235 | 12,282 | 15,353 | 17,741 | 20,470 | 24,787 |
| Pérdida carga lado humos / Press. drop flue gas side     | mbar            | 4,0   | 4,61  | 5,7   | 6,8   | 5,0   | 6,0   | 7,5   | 6,0   | 8,5   | 9,0   | 6,5   | 7,5    | 8,0    | 12,5   | 9,0    | 12,0   | 11,0   |
| Caudal de gases de combustión* / Flue gas flow-rate *gas | kg/h            | 1859  | 2437  | 2924  | 3411  | 3899  | 4873  | 5848  | 6823  | 7797  | 8772  | 9747  | 11696  | 14035  | 17545  | 20275  | 23395  | 28325  |
|  | gasóleo/gasoil  | 1974  | 2589  | 3104  | 3621  | 4138  | 5173  | 6208  | 7242  | 8277  | 9311  | 10346 | 12415  | 14898  | 18625  | 21520  | 24830  | 30065  |
| Superficie calentamiento - Heating surface               | m <sup>2</sup>  | 35    | 51    | 60    | 70    | 76    | 90    | 105   | 130   | 145   | 172   | 190   | 205    | 255    | 330    | 405    | 440    | 575    |
| Min. capacidad nivel / Min. level capacity               | dm <sup>3</sup> | 3600  | 4700  | 6110  | 7220  | 7400  | 8600  | 9270  | 10200 | 11500 | 12900 | 13800 | 15200  | 15700  | 20500  | 26500  | 28200  | 28000  |
| Capacidad total / Total capacity                         | dm <sup>3</sup> | 4500  | 5800  | 7420  | 8740  | 9000  | 10500 | 11450 | 12500 | 14000 | 15600 | 17000 | 19000  | 21250  | 25100  | 33000  | 35800  | 36000  |
| Presión trabajo máx** / Max working pressure**           | bar             | 12    | 12    | 12    | 12    | 12    | 12    | 12    | 12    | 12    | 12    | 12    | 12     | 12     | 12     | 12     | 12     | 12     |

\* Combustible líquido: CO<sub>2</sub> = 13% - Gas combustión: CO<sub>2</sub> = 10%

\*\* Oil fuel: CO<sub>2</sub> = 13% - Gas fuel: CO<sub>2</sub> = 10%

Figura 3- 18. Datos técnicos VAPOPRES 3GN Ferroli.

Por otro lado, se encuentran el Precristalizador y el Cristalizador que se especifican igual que los reactores, mediante el tiempo de residencia. Se asume la densidad del aire como  $0,8 \text{ kg/m}^3$ .

En el Precristalizador el tiempo de residencia es de 4h y la capacidad de  $464 \text{ m}^3$ , mientras que en el Cristalizador el tiempo de residencia es de 1h y la capacidad de  $36 \text{ m}^3$ .

Tanto el Intercambiador 2 como el Intercambiador 3, son equipos en los que se se calienta el aire de servicios mediante vapor saturado a  $179,9^\circ\text{C}$  queriéndose obtener una temperatura de salida del aire de  $170^\circ\text{C}$ . Para realizar el cálculo de los intercambiadores de esta etapa, su diseño y selección se sigue el siguiente esquema:

❖ Para realizar el diseño de un intercambiador de calor

- Balance de energía en el equipo

$$Q = m \cdot (h_e - h_s) + \text{pérdidas} = M \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2) = m \cdot C_p \cdot (t_2 - t_1)$$

- Ecuación de transferencia de calor, donde  $(T-t)$  es el salto de temperaturas entre el fluido caliente y el fluido frío.

$$Q = A \cdot U \cdot (T - t)$$

**Figura 3- 19.** Ecuación de balance de energía y de transferencia de calor en un intercambiador.

Cuanto más  $U$ , menor es el área necesitada, es decir, el intercambiador es más pequeño para una potencia dada. Mientras que cuanto más  $U$ , menor es  $\Delta T$ , por lo tanto, se puede trabajar con menores saltos de temperatura.

Para especificar los intercambiadores se utiliza el Método F-DTLM, el cual se presenta a continuación:

$$Q = U \cdot A \cdot F \cdot DTLM$$

$$DTLM = \frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\ln(\Delta T_{in}/\Delta T_{out})}$$

$$P = \frac{\Delta T \text{ fluido tubos}}{\Delta T_{m\acute{a}x}} = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

$$R = \frac{\text{Capacidad fluido tubos}}{\text{Capacidad fluido fuera}} = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$

**Figura 3- 20.** Diseño de un intercambiador mediante el método F-DTLM.

En primer lugar, se calcularían los parámetros  $R$  y  $P$ . Con  $R$ ,  $P$  determinados y el tipo de intercambiador a usar, se calcula el parámetro  $F$  (mediante tablas). Seguidamente, se calcula la potencia necesaria en el intercambiador y el coeficiente global de transferencia. Este parámetro  $U$  se puede calcular mediante temperaturas calóricas, mediante el uso de los coeficientes de película interior y exterior y factores de ensuciamiento, mediante un método iterativo o mediante tablas de resultados. Y, finalmente, se calcularía el área de intercambio necesaria  $A = \frac{Q}{U \cdot DTLM}$ .

❖ La selección del intercambiador se determina mediante el estudio de:

- Los caudales y las propiedades de los fluidos.
- Potencia a transferir.
- Temperaturas de entrada y salida en fluidos.
- Factores de ensuciamiento.
- Pérdida de carga máxima admisible.

Ambos intercambiadores, el Intercambiador 2 y el Intercambiador 3 son intercambiadores de carcasa y tubo en el que el fluido caliente es vapor sobresaturado y el fluido frío aire proveniente de servicios. Siguiendo las recomendaciones de la Tabla 3-30, el fluido por el interior de los tubos es el vapor de agua y el que va por la carcasa es el aire, ya que el vapor está a mayor presión. El coeficiente global de transferencia [48] se encuentra entre 28-280 W/m<sup>2</sup>°C, por lo que para ajustar lo más posible el valor se procede a calcular las temperaturas

calóricas del sistema y con ellas el coeficiente más aproximado haciendo uso de la Figura 3-21 y de la Figura 3-22.

$$U_m = U_0(1 + \alpha \cdot (T_c - t_c))$$

$$T_c = T_2 + F_c \cdot (T_1 - T_2)$$

$$t_c = t_1 + F_c \cdot (t_2 - t_1)$$

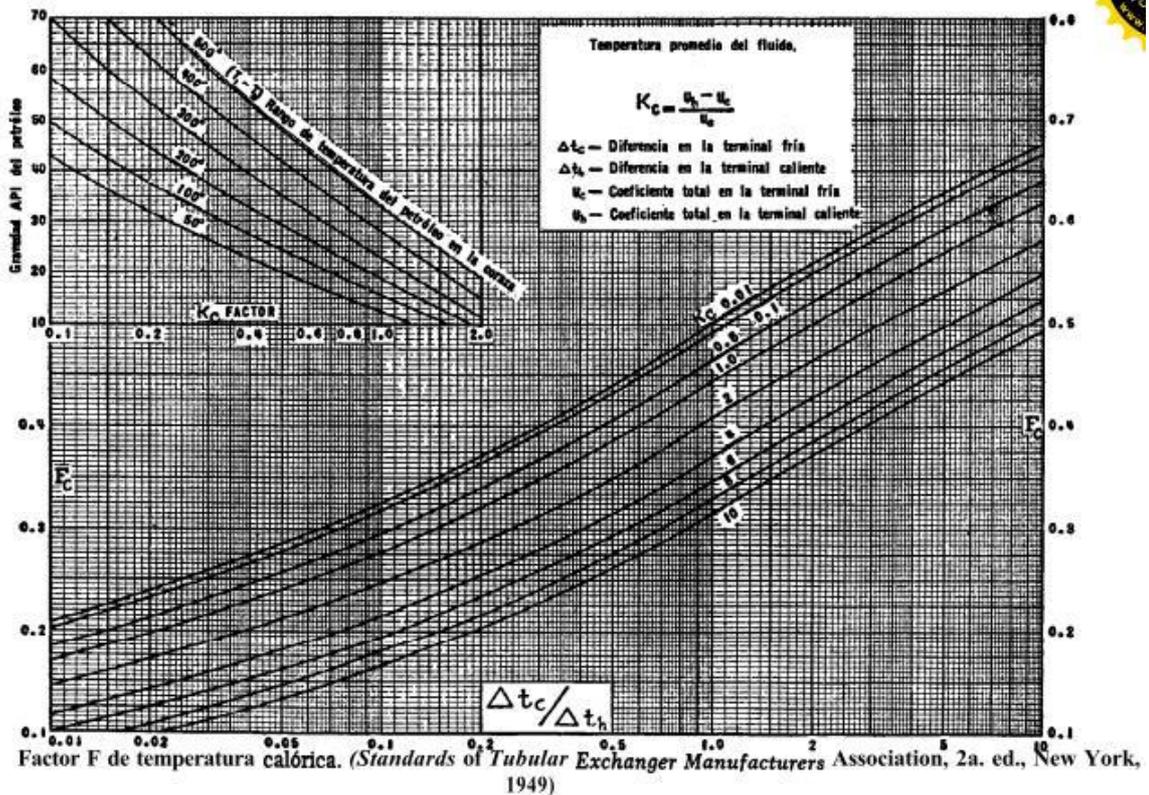
$$K_c = \frac{U_2 - U_1}{U_1}$$

$$\alpha = \frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}$$

**Figura 3-21.** Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

Siendo  $\Delta T_s$  la diferencia de temperaturas a la salida y  $\Delta T_e$  la diferencia de temperaturas a la entrada.

Mediante la Figura 3-22 se obtiene el factor  $F_c$  necesario para calcular las temperaturas calóricas como se ha señalado anteriormente. Definiéndose los parámetros  $\Delta t_c$  como la diferencia de temperatura en la terminal fría,  $\Delta t_h$  como la diferencia de temperatura en la terminal caliente y  $U_1$  y  $U_2$  como el coeficiente total en la terminal fría y caliente que en este caso son los límites presentados anteriormente 28 y 280  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ .



**Figura 3-22.** Factor  $F_c$  para el cálculo de la temperatura calórica.

**Tabla 3- 30.** Factores a tener en cuenta para la disposición de los fluidos en el intercambiador.

| <b>Factor</b>       | <b>Fluido lado tubos</b> | <b>Fluido lado carcasa</b> |
|---------------------|--------------------------|----------------------------|
| Corrosión           | Más corrosivo            | Menos corrosivo            |
| Fouling             | Más sucio                | Menos sucio                |
| Temperatura fluidos | Alta temperatura         | Baja temperatura           |
| Presión             | Alta presión             | Baja presión               |
| Pérdida de carga    | Baja pérdida de carga    | Alta pérdida de carga      |
| Viscosidad          | Menos viscoso            | Más viscoso                |
| Stream flow rate    | Alto caudal              | Bajo caudal                |

**Tabla 3- 31.** Balance de energía del Intercambiador 2 de la etapa de cristalización.

| <b>INT2</b>    | <b>Corriente 81</b> | <b>Corriente 84</b> | <b>Corriente 85</b> | <b>Corriente 88</b> |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| m (kg/h)       | 2308,42             | 18000               | 18000               | 2308,42             |
| T(K)           | 293                 | 452,9               | 433                 | 443                 |
| Cp (kJ/kg·K)   | 1,019               | -                   | -                   | 1,026               |
| DeltaH (kJ/kg) | -                   | 2778,1              | 2758,1              | -                   |

Mediante las ecuaciones de la Figura 3-19 y Figura 3-20 obtiene la potencia del Intercambiador 2 siendo  $Q_2=100\text{kW}$ , la  $DTLM_2 = 54,08\text{ }^\circ\text{C}$ , el parámetro  $P = 0,1245$ ,  $R = 0,13267$  y  $F=1$ . Usando las Figuras 3-21 y 3-22 se obtiene  $\frac{\Delta t_c}{\Delta t_h} = 7,53$ ;  $K_c = \frac{280-28}{28} = 9$  y un  $F_c = 0,47$ . Obteniéndose una  $T_c=169,35\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_c=90,5\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha=0,0625$  y  $U_m=165,98\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ .

Por lo tanto, el área necesaria por este intercambiador es de:

$$A_2 = \frac{Q_2}{U \cdot DTLM_2} = \frac{100\text{ kW}}{0,166 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 54,08^\circ\text{C}} = 11,14\text{ m}^2$$

**Tabla 3- 32.** Balance de energía del Intercambiador 3 de la etapa de cristalización.

| <b>INT3</b>    | <b>Corriente 82</b> | <b>Corriente 86</b> | <b>Corriente 87</b> | <b>Corriente 89</b> |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| m (kg/h)       | 1538,95             | 12000               | 12000               | 1538,95             |
| T(K)           | 293                 | 452,9               | 433                 | 443                 |
| Cp (kJ/kg·K)   | 1,019               | -                   | -                   | 1,026               |
| DeltaH (kJ/kg) | -                   | 2778,1              | 2758,1              | -                   |

Mediante las ecuaciones de la Figura 3-19 y Figura 3-20 obtiene la potencia del Intercambiador 3 siendo  $Q_3 = 66,67 \text{ kW}$ , la  $DTLM_3 = 54,08 \text{ }^\circ\text{C}$ , el parámetro  $P = 0,1245$ ,  $R = 0,13267$  y  $F = 1$ . Usando las Figuras 3-21 y 3-22 se obtiene  $\frac{\Delta t_c}{\Delta t_h} = 7,53$ ;  $K_c = \frac{280-28}{28} = 9$  y un  $F_c = 0,47$ . Obteniéndose una  $T_c = 169,35 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_c = 90,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha = 0,0625$  y  $U_m = 165,98 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

$$A_3 = \frac{Q_3}{U \cdot DTLM_3} = \frac{66,67 \text{ kW}}{0,166 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 54,08^\circ\text{C}} = 7,43 \text{ m}^2$$

### 3.2.2 REACCIÓN DE POLICONDENSACIÓN Y REGENERACIÓN DE $\text{N}_2$

#### 3.2.2.1 Balances

Las siguientes tablas, la Tabla 3-32, la Tabla 3-33, la Tabla 3-34 y la Tabla 3-35, representan el balance de materia global de la etapa de reacción de policondensación juntamente con la etapa de regeneración de  $\text{N}_2$  (Figura 2-12).

**Tabla 3- 33.** Balance de materia de la etapa de policondesnación y regeneración de  $\text{N}_2$  I.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |       |       |       |       |       |         |        |
|-----------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|
|                       | 79               | 93    | 94    | 95    | 96    | 97    | 100     | 100a   |
| Agua                  | -                | -     | -     | -     | -     | -     | -       | -      |
| Aire                  | -                | -     | -     | -     | -     | -     | -       | -      |
| $\text{N}_2$          | -                | -     | -     | -     | -     | -     | 70,00   | 21,00  |
| HTM                   | -                | -     | -     | -     | -     | -     | -       | -      |
| Polímero cristaliz.   | 21,23            | 21,23 | 20,80 | 20,38 | -     | -     | -       | -      |
| Impurezas             | -                | -     | -     | -     | -     | -     | -       | -      |
| PET                   | -                | -     | -     | -     | 19,98 | 19,98 | -       | -      |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | 21,23            | 21,23 | 20,80 | 20,38 | 19,98 | 19,98 | 30,00   | 21,00  |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | 1,30             | 1,30  | 1,27  | 1,24  | 0,86  | 0,86  | 1071,43 | 750,00 |

**Tabla 3- 34.** Balance de materia de la etapa de policondesnación y regeneración de  $\text{N}_2$  II.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |         |         |         |      |         |         |       |       |
|-----------------------|------------------|---------|---------|---------|------|---------|---------|-------|-------|
|                       | 100b             | 100c    | 101     | 102     | 103  | 104a    | 104b    | HTMe  | HTMs  |
| Agua                  | -                | -       | -       | -       | -    | -       | -       | -     | -     |
| Aire                  | -                | -       | -       | -       | -    | -       | -       | -     | -     |
| $\text{N}_2$          | 21,00            | 28,00   | 80,85   | 80,85   | -    | 80,85   | 80,85   | -     | -     |
| HTM                   | -                | -       | -       | -       | -    | -       | -       | 16,09 | 16,09 |
| Polímero cristaliz.   | -                | -       | -       | -       | -    | -       | -       | -     | -     |
| Impurezas             | -                | -       | 0,37    | -       | 0,37 | -       | -       | -     | -     |
| PET                   | -                | -       | -       | -       | -    | -       | -       | -     | -     |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | 21,00            | 28,00   | 81,23   | 80,85   | 0,37 | 80,85   | 80,85   | 16,09 | 16,09 |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | 750,00           | 1000,00 | 2887,61 | 2887,59 | 0,02 | 2887,59 | 2887,59 | -     | -     |

**Tabla 3- 35.** Balance de materia de la etapa de policondesnación y regeneración de N<sub>2</sub> III.

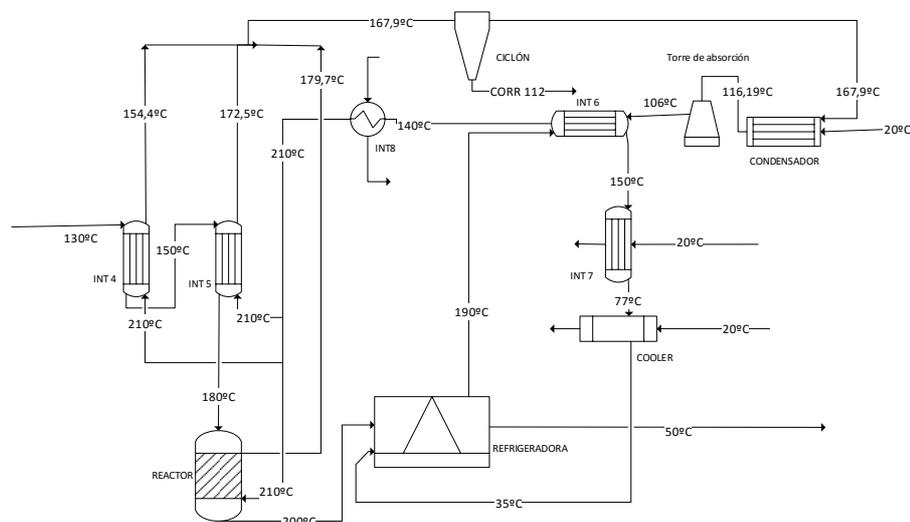
| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |               |               |               |               |                |                |
|-----------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
|                       | 105              | 106           | 107           | 108           | 109           | 110            | 111            |
| Agua                  | -                | -             | -             | -             | -             | -              | -              |
| Aire                  | -                | -             | -             | -             | -             | -              | -              |
| N <sub>2</sub>        | 42,61            | 24,97         | 13,28         | 13,28         | 24,97         | 42,61          | 80,85          |
| HTM                   | -                | -             | -             | -             | -             | -              | -              |
| Polímero cristaliz.   | -                | -             | -             | -             | -             | -              | -              |
| Impurezas             | -                | -             | -             | 0,41          | 0,42          | 0,42           | 1,25           |
| PET                   | -                | -             | -             | -             | -             | -              | -              |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>42,61</b>     | <b>24,97</b>  | <b>13,28</b>  | <b>13,69</b>  | <b>25,39</b>  | <b>43,02</b>   | <b>82,10</b>   |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>1521,71</b>   | <b>891,62</b> | <b>474,26</b> | <b>474,29</b> | <b>891,64</b> | <b>1521,73</b> | <b>2887,66</b> |

**Tabla 3- 36.** Balance de materia de la etapa de policondesnación y regeneración de N<sub>2</sub> IV.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |                |                |                |                |                |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                       | 112              | 113            | 114            | 115            | 116            | 117            |
| Agua                  | -                | -              | -              | -              | -              | -              |
| Aire                  | -                | -              | -              | -              | -              | -              |
| N <sub>2</sub>        | 28,00            | 52,85          | 59,17          | 59,17          | 59,17          | 59,17          |
| HTM                   | -                | -              | -              | -              | -              | -              |
| Polímero cristaliz.   | -                | -              | -              | -              | -              | -              |
| Impurezas             | 0,87             | 0,37           | -              | -              | -              | -              |
| PET                   | -                | -              | -              | -              | -              | -              |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | <b>0,87</b>      | <b>53,23</b>   | <b>59,17</b>   | <b>59,17</b>   | <b>59,17</b>   | <b>59,17</b>   |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | <b>1000,05</b>   | <b>1887,61</b> | <b>2113,30</b> | <b>2113,30</b> | <b>2113,30</b> | <b>2113,30</b> |

### 3.2.2.2 Cálculo de equipos

Mediante el uso del programa EES, programa de resolución de ecuaciones se calculan las temperaturas de la etapa



**Figura 3- 23.** Balance térmico de la etapa de reacción de polimerización y regeneración de N<sub>2</sub>.

En primer lugar, en el REACTOR 5 se introducen 20,38 toneladas/hora de polímero cristalizado a 180°C y 13,28 toneladas/hora de nitrógeno caliente a 210°C. El tiempo de reacción es de 20 minutos y la temperatura y la presión son de 200°C y 0,1 atm. Al igual que los demás reactores, el material del que está constituido es acero inoxidable.

El tiempo de carga y descarga del reactor es de 20 min, mientras que el tiempo empleado en alcanzar la temperatura de operación y el tiempo de enfriamiento del reactor es de 10 min, por lo que el tiempo de ciclo será de 50 min obteniéndose un volumen de reactor de 8300 m<sup>3</sup> (D<sub>reactor5</sub>= 23,7 m; H<sub>reactor5</sub>=27,65 m).

El Cooler tiene una temperatura máxima de trabajo de 120°C y admite una viscosidad máxima de 100 CST, está constituido por aluminio. COOLER SERIES CSA 6 0. Potencia máxima de 0,75kW. Fabricante Ciesse.

Por otro lado, el Intercambiador 8 se especifica de la misma forma que el Intercambiador 1 posicionado en la etapa de peletización, puesto que se utiliza aceite térmico a 350 °C para calentar la corriente de nitrógeno de 140 a 210°C. Este intercambiador necesita un caudal de aceite de 280 l/min, por lo tanto, mediante el uso de la Figura 3-12, se obtiene el intercambiador deseado Cessie que sería el CSA 8 con un gradiente de 1,65 kW/°C.

El Intercambiador 4 y el Intercambiador 5 son intercambiadores de carcasa y tubo en el que el fluido caliente es nitrógeno gaseoso y el fluido frío es polímero cristalizado. Siguiendo las recomendaciones de la Tabla 3-30, el fluido por el interior de los tubos es el nitrógeno debido a su alta presión y temperatura y el que va por la carcasa es el polímero, ya que es muy viscoso. El coeficiente global de transferencia [48] se encuentra entre 250-550 W/m<sup>2</sup>·°C.

**Tabla 3- 37.** Balance de energía del Intercambiador de la etapa de reacción.

| INT 4        | Corriente 93 | Corriente 94 | Corriente 106 | Corriente 109 |
|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| m (kg/h)     | 21225,39     | 20800,88     | 24965,26      | 24965,69      |
| T (K)        | 403,00       | 423,00       | 483,00        | 427,40        |
| Cp (kJ/kg·K) | 1,66         | 1,79         | 1,07          | 1,06          |

Mediante las ecuaciones de la Figura 3-19 y Figura 3-20 se obtiene la potencia del Intercambiador 4 siendo Q<sub>4</sub>=425,86kW, la DTLM<sub>4</sub> = 39,56 °C, el parámetro P = 0,695, R= 0,359 y F=0,97. Usando las Figuras 3-21 y 3-22 se obtiene  $\frac{\Delta t_c}{\Delta t_h} = 0,36$ ;  $K_c = \frac{550-250}{250} = 1,2$  y un  $F_c = 0,38$ . Obteniéndose una T<sub>c</sub>=175,53 °C; t<sub>c</sub>=137,6 °C; α=0,013 y U<sub>m</sub>=373,27 W/m<sup>2</sup>·°C.

Por lo tanto, el área necesaria por este intercambiador es de:

$$A_4 = \frac{Q_4}{F \cdot U \cdot DTLM_4} = \frac{425,86 \text{ kW}}{0,97 \cdot 0,373 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}} \cdot 39,56 \text{°C}} = 29,75 \text{ m}^2$$

**Tabla 3- 38.** Balance de energía del Intercambiador 5 de la etapa de reacción.

| INT 5        | Corriente 94 | Corriente 95 | Corriente 105 | Corriente 110 |
|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| m (kg/h)     | 20800,88     | 20384,87     | 42607,79      | 43023,81      |
| T (K)        | 423,00       | 453,00       | 483,00        | 445,50        |
| Cp (kJ/kg·K) | 1,79         | 1,90         | 1,07          | 1,06          |

Mediante las ecuaciones de la Figura 3-19 y Figura 3-20 se obtiene la potencia del Intercambiador 5 siendo  $Q_5=490\text{kW}$ , la  $DTLM_5 = 26,07\text{ }^\circ\text{C}$ , el parámetro  $P = 0,625$ ;  $R= 0,8$  y  $F=0,94$ . Usando las Figuras 3-21 y 3-22 se obtiene  $\frac{\Delta t_c}{\Delta t_h} = 0,8$ ;  $K_c = \frac{550-250}{250} = 1,2$  y un  $F_c = 0,43$ . Obteniéndose una  $T_c=188,625\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_c=162,9\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha=0,035$  y  $U_m=475,1\text{ W/m}^2\cdot\text{ }^\circ\text{C}$ .

Por lo tanto, el área necesaria por este intercambiador es de:

$$A_5 = \frac{Q_5}{F \cdot U \cdot DTLM_5} = \frac{490\text{ kW}}{0,94 \cdot 0,475 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}} \cdot 26,07\text{ }^\circ\text{C}} = 42,09\text{ m}^2$$

El Intercambiador 6 y el Intercambiador 7 son intercambiadores de carcasa y tubo en el que el fluido caliente es nitrógeno gaseoso y el fluido frío es nitrógeno con menor temperatura proveniente para el Intercambiador 7 de servicios y para el Intercambiador 6 de la Torre 2. Siguiendo las recomendaciones de la Tabla 3-30, el fluido por el interior de los tubos es el fluido caliente debido a su alta presión y temperatura y el que va por la carcasa es fluido frío, ya que se encuentra a menor temperatura. El coeficiente global de transferencia [48] se encuentra entre  $100\text{-}300\text{ W/m}^2\cdot\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Tabla 3- 39.** Balance de energía del Intercambiador 6 de la etapa de regeneración de nitrógeno.

| INT 6        | Corriente 102 | Corriente 104 | Corriente 114 | Corriente 117 |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| m (kg)       | 80852,46      | 80852,46      | 59172,45      | 59172,45      |
| T (K)        | 379,19        | 413,00        | 423,00        | 468,00        |
| Cp (kJ/kg·K) | 1,06          | 1,06          | 1,06          | 1,07          |

Mediante las ecuaciones de la Figura 3-19 y Figura 3-20 obtiene la potencia del Intercambiador 6 siendo  $Q_6=830,75\text{ kW}$ , la  $DTLM_6 = 49,19\text{ }^\circ\text{C}$ , el parámetro  $P = 0,507$ ;  $R= 1,33$  y  $F=0,92$ . Usando las Figuras 3-21 y 3-22 se obtiene  $\frac{\Delta t_c}{\Delta t_h} = 0,75$ ;  $K_c = \frac{300-100}{100} = 2$  y un  $F_c = 0,4$ . Obteniéndose una  $T_c=168\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_c=119,72\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha=0,031$  y  $U_m=249,67\text{ W/m}^2\cdot\text{ }^\circ\text{C}$ .

Por lo tanto, el área necesaria por este intercambiador es de:

$$A_6 = \frac{Q_6}{F \cdot U \cdot DTLM_6} = \frac{830,75\text{ kW}}{0,92 \cdot 0,249 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}} \cdot 49,19\text{ }^\circ\text{C}} = 73,72\text{ m}^2$$

**Tabla 3- 40.** Balance de energía del Intercambiador 7 de la etapa de regeneración de nitrógeno.

| INT 7        | Corriente 100B | Corriente Salida | Corriente 114 | Corriente 115 |
|--------------|----------------|------------------|---------------|---------------|
| m (kg)       | 21000,00       | 21000,00         | 59172,45      | 59172,45      |
| T (K)        | 293,00         | 348,00           | 423,00        | 350,00        |
| Cp (kJ/kg·K) | 1,05           | 1,07             | 1,06          | 1,06          |

Mediante las ecuaciones de la Figura 3-19 y Figura 3-20 obtiene la potencia del Intercambiador 7 siendo  $Q_7=373,53$  kW, la  $DTLM_7 = 53,27$  °C, el parámetro  $P = 0,562$ ;  $R= 1,327$  y  $F=0,85$ . Usando las Figuras 3-21 y 3-22 se obtiene  $\frac{\Delta t_c}{\Delta t_h} = 0,75$ ;  $K_c = \frac{300-100}{100} = 2$  y un  $F_c = 0,4$ . Obteniéndose una  $T_c=106,2$ °C;  $t_c=42$ °C;  $\alpha=0,015$  y  $U_m=196,3$  W/m<sup>2</sup>·°C.

Por lo tanto, el área necesaria por este intercambiador es de:

$$A_7 = \frac{Q_7}{F \cdot U \cdot DTLM_7} = \frac{1344,69 \text{ kW}}{0,85 \cdot 0,196 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 53,27^\circ\text{C}} = 151,51 \text{ m}^2$$

Finalmente, la Refrigeradora disminuye la temperatura de los pellets de PET de 200°C a 50°C mediante una corriente de nitrógeno gaseoso a 35°C, saliendo del equipo a 190°C. Este equipo requiere de una potencia máxima de 2600 kW, siendo su balance de energía el siguiente:

**Tabla 3- 41.** Balance de energía de la refrigeradora de la etapa de reacción.

| REFRIGERADORA | Corriente 96 | Corriente 97 | Corriente116 | Corriente117 |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| m (kg/h)      | 19977,17     | 19977,17     | 59172,45     | 59172,45     |
| T (K)         | 473          | 323          | 308          | 468          |
| Cp (kJ/kg·K)  | 1,9          | 1,28         | 1,05         | 1,07         |

Mientras que en el Condensador se introduce una corriente de nitrógeno a alta temperatura 167,9°C y otra de nitrógeno a baja temperatura 20°C, resultado una corriente de nitrógeno de 116,2°C. Este equipo necesitará de una potencia de 2300kW.

**Tabla 3- 42.** Balance de energía del condensador de la etapa de reacción.

| CONDENSADOR  | Corriente 113 | Corriente 100 | Corriente 101 |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| m (kg/h)     | 53226,92      | 28000         | 81226,92      |
| T (K)        | 440,91        | 293           | 389,19        |
| Cp (kJ/kg·K) | 1,06          | 1,05          | 1,06          |

### 3.2.3 ALMACENAMIENTO DE PRODUCTO FINAL

#### 3.2.3.1 Balances

La siguiente table, la Tabla 3-43, representa el balance de materia en la etapa de almacenamiento final (Figura 2-14).

**Tabla 3- 43.** Balance de materia de la etapa de almacenamiento de producto final.

| ELEMENTO              | CORRIENTES (t/h) |       |      |
|-----------------------|------------------|-------|------|
|                       | 97               | 98    | 99   |
| PET                   | 19,98            | 19,78 | 0,20 |
| <b>TOTAL (t/h)</b>    | 19,98            | 19,78 | 0,20 |
| <b>TOTAL (kmol/h)</b> | 0,86             | 0,85  | 0,01 |

#### 3.2.3.2 Cálculo de equipos

Como anteriormente se comentó, esta etapa está constituida únicamente por silos de producto final y por una tolva de análisis.

**Tabla 3- 44.** Especificaciones del silo de producto final y de la tolva de análisis.

| SILO 8                               |        | TOLVA 1                              |       |
|--------------------------------------|--------|--------------------------------------|-------|
| H (m)                                | 9,49   | H (m)                                | 3,72  |
| D (m)                                | 6,32   | D (m)                                | 2,48  |
| h <sub>cab</sub> (m)                 | 1,58   | h <sub>cab</sub> (m)                 | 0,62  |
| h <sub>tolva</sub> (m)               | 4,74   | h <sub>tolva</sub> (m)               | 1,86  |
| H <sub>tot</sub> (m)                 | 15,81  | H <sub>tot</sub> (m)                 | 6,20  |
| V <sub>cil</sub> (m <sup>3</sup> )   | 297,86 | V <sub>cil</sub> (m <sup>3</sup> )   | 17,97 |
| V <sub>cab</sub> (m <sup>3</sup> )   | 33,10  | V <sub>cab</sub> (m <sup>3</sup> )   | 2,00  |
| V <sub>tolva</sub> (m <sup>3</sup> ) | 49,64  | V <sub>tolva</sub> (m <sup>3</sup> ) | 2,99  |
| V <sub>silo</sub> (m <sup>3</sup> )  | 380,61 | V <sub>silo</sub> (m <sup>3</sup> )  | 22,96 |
| <b>n° equipos</b>                    | 6      | <b>n° equipos</b>                    | 1     |

Al final del proceso se tienen 6 silos de producto final de 380,61 m<sup>3</sup> cada uno y una tolva de análisis del producto de 22,96 m<sup>3</sup>.

# 4 MEDICIONES Y PRESUPUESTO

---

## 4.1 CRITERIO DE CÁLCULO DE COSTES

El cálculo del coste del sistema que lleva a cabo el proceso en estudio es fundamental para su correcta optimización económica. La evaluación económica se basa en el cálculo de parámetros influenciados por conceptos técnicos (costes iniciales, costes operación y costes totales) y económicos (inflación, tipos de interés).

La evaluación económica se puede realizar mediante el estudio del Plazo de recuperación de capital y la Tasa Interna de Rentabilidad:

- Plazo de Recuperación de capital: es el plazo de tiempo necesario para recuperar la inversión inicial. Es el número de años que hace que el Valor Presente Neto sea nulo.
- Tasa Interna de Rentabilidad: es el tipo de interés que tendría que tiene el dinero para que el VPN sea nulo.

El cálculo del Coste Inicial puede realizarse mediante el Método de Guthrie, este método consiste en evaluar el coste del Sistema a partir del coste de los equipos principales de la instalación. Estos costes excluyen los costes de tuberías y de instrumentación entre otros.

El Método de Guthrie consiste en evaluar el coste de cada componente en función del tamaño en función de su tamaño normal mediante la correlación:

$$C = C_0 \cdot \left(\frac{S}{S_0}\right)^\alpha$$

**Figura 4- 1.** Correlación de precios según el método de Guthrie.

Donde C es el coste del equipo, este se incrementa de forma no lineal con el tamaño (S) o capacidad de los equipos. Por otro lado, C<sub>0</sub> y S<sub>0</sub> son la capacidad y tamaño básico y α es siempre menor que uno y por lo general se encuentra entre 0,6 - 0,7.

Para un recipiente a presión, la capacidad depende del volumen mientras que el coste del peso del equipo (de la superficie de material necesaria). Para recipientes a presión cilíndricos se utiliza la correlación de la Figura 4-2, estando los parámetros de la misma recogidos en la Figura 4-3.

$$C = C_0 \cdot \left(\frac{L}{L_0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^\beta$$

**Figura 4- 2.** Correlación de precios para recipientes cilíndricos a presión.

| Equipment Type  | $C_0$ (\$) | $L_0$ (ft) | $D_0$ (ft) | $\alpha$ | $\beta$ | MF2/MF4/MF6/MF8/MF10     |
|---|------------|------------|------------|----------|---------|--------------------------|
| Vertical fabrication<br>$1 \leq D \leq 10$ ft, $4 \leq L \leq 100$ ft   | 1000       | 4.0        | 3.0        | 0.81     | 1.05    | 4.23/4.12/4.07/4.06/4.02 |
| Horizontal fabrication<br>$1 \leq D \leq 10$ ft, $4 \leq L \leq 100$ ft | 690        | 4.0        | 3.0        | 0.78     | 0.98    | 3.18/3.06/3.01/2.99/2.96 |
| Tray stacks<br>$2 \leq D \leq 10$ ft, $1 \leq L \leq 500$ ft            | 180        | 10.0       | 2.0        | 0.97     | 1.45    | 1.0/1.0/1.0/1.0/1.0      |

(Data from Guthrie, 1969)

**Figura 4-3.** Parámetros característicos para recipientes cilíndricos a presión, método de Guthrie.

A continuación, las Figura 4-4 y Figura 4-5 muestran los costes base de los equipos más usados en los procesos para realizar su respectiva correlación:

| Equipment Type  | $C_0$ (\$10 <sup>3</sup> ) | $S_0$               | Range(\$)                                | $\alpha$ | MF2/MF4/MF6/MF8/MF10     |
|---|----------------------------|---------------------|--|----------|--------------------------|
| Process furnaces<br>$S = \text{Absorbed duty (10}^6\text{Btu/hr)}$      | 100                        | 30                  | 10–300                                   | 0.83     | 2.27/2.19/2.16/2.15/2.13 |
| Direct fired heaters<br>$S = \text{Absorbed duty (10}^6\text{Btu/hr)}$  | 20                         | 5                   | 1–40                                     | 0.77     | 2.23/2.15/2.13/2.12/2.10 |
| Heat exchanger<br>Shell and tube, $S = \text{Area (ft}^2\text{)}$       | 5                          | 400                 | 100–10 <sup>4</sup>                      | 0.65     | 3.29/3.18/3.14/3.12/3.09 |
| Heat exchanger<br>Shell and tube, $S = \text{Area (ft}^2\text{)}$       | 0.3                        | 5.5                 | 2–100                                    | 0.024    | 1.83/1.83/1.83/1.83/1.83 |
| Air coolers<br>$S = [\text{Calculated area (ft}^2\text{)}]/15.5]$       | 3                          | 200                 | 100–10 <sup>4</sup>                      | 0.82     | 2.31/2.21/2.18/2.16/2.15 |
| Centrifugal pumps<br>$S = \text{C/H factor (gpm} \times \text{psi)}$    | 0.39                       | 10                  | 10–2 · 10 <sup>3</sup>                   | 0.17     | 3.38/3.28/3.24/3.23/3.20 |
|   | 0.65                       | 2 · 10 <sup>3</sup> | 2 · 10 <sup>3</sup> –2 · 10 <sup>4</sup> | 0.36     | 3.38/3.28/3.24/3.23/3.20 |
|   | 1.5                        | 2 · 10 <sup>4</sup> | 2 · 10 <sup>4</sup> –2 · 10 <sup>5</sup> | 0.64     | 3.38/3.28/3.24/3.23/3.20 |
| Compressors<br>$S = \text{brake horsepower}$                            | 23                         | 100                 | 30–10 <sup>4</sup>                       | 0.77     | 3.11/3.01/2.97/2.96/2.93 |
| Refrigeration<br>$S = \text{ton refrigeration (12,000 Btu/hr removed)}$ | 60                         | 200                 | 50–3000                                  | 0.70     | 1.42                     |

(Data from Guthrie, 1969)

**Figura 4-4.** Coste base de diferentes equipos de proceso, método de Guthrie.

#### STORAGE TANKS

|   |     |      |                   |                                      |
|---|-----|------|-------------------|--------------------------------------|
| Vertical steel field erected tanks. {1} | .68 | .017 | 1                 | 10 <sup>3</sup> ↔10 <sup>5</sup> gal |
| Carbon steel. {2}                       | .56 | 1.4  | 100               | 100↔10 <sup>5</sup> gal              |
| 304 ss or 30 psi cs (spherical). {2}    | .52 | 2.6  | 100               | 100↔10 <sup>5</sup> gal              |
| Large volume cs, floating roof. {2}     | .78 | 385  | 2x10 <sup>6</sup> | (2↔10)x10 <sup>6</sup> gal           |
| Generally: {1}                          |     |      |                   |                                      |
| Concrete \$\$.75-.90/gal                |     |      |                   |                                      |
| Fiberglass \$1.50/gal for 2000 gal size |     |      |                   |                                      |
| Pipe type \$1.00/gal                    |     |      |                   |                                      |

More comprehensive method in Corripo et al. (1984).

**Figura 4-5.** Coste base de diferentes tanques de almacenamiento, método de Guthrie.

Por otro lado, decir que los parámetros recogidos por las figuras anteriores están desactualizados al año 1969, por lo que se le aplica un factor de actualización, UF (Update Factor), a los precios para tener en cuenta la inflación.

$$UF = \frac{\text{Índice de coste actual}}{\text{Índice de coste base}}$$

**Figura 4- 6.** Actualización de los precios.

El índice de coste base (Chemical Engineering Plant Cost Index) de 1969 es de 115 y el más actualizado encontrado, de 2016 es de 541,7. Por lo tanto, el UF es de 4,71.

Finalmente, decir que el Coste de Operación es el coste de todos los consumos, de energía, de servicios, de materias primas que necesite el proceso anualmente. Mientras que el Coste Total es la suma del coste inicial de instalación y el coste de operación durante el ciclo de vida del Sistema.

## 4.1.1 Costes

### 4.1.1.1 Materias primas

El coste de las materias primas y de las materias primas auxiliares del proceso se observan en la Tabla 4-1, se supone un gasto en materia prima de alrededor de 15 millones de euros al año.

**Tabla 4- 1.** Precio de las materias primas y auxiliares del Sistema [62]

|                               |       | €/t | €/kg | t/h   | kg/h   | €/h             | €/año             |
|-------------------------------|-------|-----|------|-------|--------|-----------------|-------------------|
| <b>Materias primas</b>        | PTA   | 662 | -    | 15,13 | -      | 10017,07        | 4808195,5         |
|                               | EG    | 795 | -    | 24,55 | -      | 19519,46        | 9369340,51        |
| <b>Materia prima auxiliar</b> | DEG   | -   | 1,25 | -     | 508,72 | 635,91          | 305234,63         |
|                               | IPA   | 960 | -    | 0,80  | -      | 764,54          | 366979,46         |
|                               | Sb2O3 | -   | 30   | -     | 5,99   | 179,79          | 86301,37          |
|                               | H3PO4 | -   | 9,27 | -     | 0,40   | 3,70            | 1777,81           |
|                               | TiO2  | -   | 2,78 | -     | 59,93  | 166,61          | 79972,60          |
| <b>TOTAL</b>                  |       |     |      |       |        | <b>31287,09</b> | <b>15017801,9</b> |

### 4.1.1.2 Servicios

Los precios de los servicios auxiliares son: el precio del combustible Gasóleo tipo C [63], el precio de la electricidad es el precio neto de la electricidad para uso industrial de la Fuente Eurostat con fecha de 26-11-2016, el precio del agua de servicio [64] y el precio del nitrógeno gaseoso [65].

**Tabla 4- 2.** Precio de los servicios auxiliares del proceso

| Servicios       | €/m <sup>3</sup> | €/kW·h | t/h   | m <sup>3</sup> /h | kW·h | COSTE €/h      | COSTE €/año       |
|-----------------|------------------|--------|-------|-------------------|------|----------------|-------------------|
| Agua            | 0,44             | -      | 55,72 | 55,72             | -    | 24,28          | 13982,4           |
| Nitrógeno (gas) | 1,12             | -      | 70    | 4666,67           | -    | 5226,67        | 45785600,0        |
| Electricidad    | -                | 0,09   | -     | -                 | 0,04 | 2,06           | 18080,6           |
| Combustible     | 365              | 4,54   | 2,52  | 2,80              | -    | 1022,30        | 8955346,6         |
| <b>TOTAL</b>    |                  |        |       |                   |      | <b>6275,31</b> | <b>54773009,6</b> |

#### 4.1.1.3 Equipos

En general, para obtener el coste de los equipos del proceso se hace uso de las figuras del apartado anterior, las cuales muestran diferentes parámetros según la capacidad de los equipos para el uso del Método de Guthrie.

Para el coste de las bombas y los eyectores se ha utilizado el método de Guthrie en el que  $\alpha=0,46$ ;  $C_0=4300$ ;  $S_0=10$ ; estando el factor S en m<sup>3</sup>/min, mientras que para el coste de las soplantes  $\alpha=0,4$ ;  $C_0=9900$ ;  $S_0=0,1$  estando el factor S en m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 4- 3.** Costes de la maquinaria de impulsión del proceso.

| Maquinaria impulsión | nº equipos | Coste (€) | Coste total (€) |
|----------------------|------------|-----------|-----------------|
| Bomba 1              | 1          | 308,2     | 308,2           |
| Bomba 2              | 1          | 3332,3    | 3332,3          |
| Bomba 3              | 1          | 3708,2    | 3708,2          |
| Bomba 4              | 1          | 3570,8    | 3570,8          |
| Bomba 5              | 1          | 744,6     | 744,6           |
| Eyector 1            | 1          | 963,1     | 963,1           |
| Eyector 2            | 1          | 762,2     | 762,2           |
| Soplante 1           | 1          | 773,9     | 773,9           |
| Soplante 2           | 1          | 755,5     | 755,5           |

Para el coste de los reactores y el precristalizador y cristizador se ha utilizado el método de Guthrie para recipientes a presión en el que  $\alpha=0,81$ ;  $\beta=1,05$ ;  $C_0=1000$ ;  $L_0=4$ ;  $D_0=3$  estando el factor L y D en ft.

**Tabla 4- 4.** Coste de la maquinaria de reacción.

| <b>Maquinaria reactores</b> | <b>n° equipos</b> | <b>Coste (€)</b> | <b>Coste total (€)</b> |
|-----------------------------|-------------------|------------------|------------------------|
| Reactor 1                   | 1                 | 113068,4         | 113068,4               |
| Reactor 2                   | 1                 | 59217,5          | 59217,5                |
| Reactor 3                   | 1                 | 54337,3          | 54337,3                |
| Reactor 4                   | 1                 | 327098,4         | 327098,4               |
| Reactor 5                   | 1                 | 1059305,2        | 1059305,2              |
| Precristalizador            | 1                 | 46558,4          | 46558,4                |
| Cristalizador               | 1                 | 17488,5          | 17488,5                |

Para el coste de los silos, la tolva y el ciclón se ha utilizado el método de Guthrie para recipientes a presión en el que  $\alpha=0,97$ ;  $\beta=1,45$ ;  $C_0=180$ ;  $L_0=10$ ;  $D_0=2$  estando el factor L y D en ft.

**Tabla 4- 5.** Coste de la maquinaria de almacenamiento I.

| <b>Maquinaria almacenamiento I</b> | <b>n° equipos</b> | <b>Coste (€)</b> | <b>Coste total (€)</b> |
|------------------------------------|-------------------|------------------|------------------------|
| Silo 1                             | 6                 | 63079,5          | 378477,0               |
| Silo 2                             | 1                 | 24880,5          | 24880,5                |
| Silo 3                             | 1                 | 1338,2           | 1338,2                 |
| Silo 4                             | 1                 | 43,9             | 43,9                   |
| Silo 5                             | 1                 | 175,1            | 175,1                  |
| Silo 6                             | 1                 | 496,4            | 496,4                  |
| Silo 7                             | 1                 | 6278,3           | 6278,3                 |
| Silo 8                             | 6                 | 70143,5          | 420861,2               |
| Tolva 1                            | 1                 | 7284,2           | 7284,2                 |
| Ciclón                             | 1                 | 50000            | 50000                  |

Para el coste de los tanques de almacenamiento y los mezcladores se ha utilizado el método de Guthrie. Según la Figura 4-5, para el cálculo del coste del Tanque 1 los parámetros usados han sido  $\alpha=0,78$ ;  $C_0=385000$ ;  $S_0=2 \cdot 10^6$ ; estando el factor S en galones, mientras que para el coste de los demás equipos  $\alpha=0,78$ ;  $C_0=2600$ ;  $S_0=100$  estando el factor S en galones.

**Tabla 4- 6.** Coste de la maquinaria de almacenamiento II.

| <b>Maquinaria almacenamiento II</b> | <b>n° equipos</b> | <b>Coste (€)</b> | <b>Coste total (€)</b> |
|-------------------------------------|-------------------|------------------|------------------------|
| Tanque 1                            | 4                 | 62163,2          | 248652,8               |
| Tanque 2                            | 1                 | 196807,3         | 196807,3               |
| Tanque 3                            | 1                 | 81659,6          | 81659,6                |
| Mezclador                           | 3                 | 3418,7           | 10256,2                |

Para el coste de los intercambiadores y el equipo de condensación, cooler y refrigeradora se ha utilizado el método de Guthrie con los parámetros  $\alpha=0,65$ ;  $C_0=5000$ ;  $S_0=400$ , encontrándose S en pies para todos los equipos a excepción de los intercambiadores 2, 3 y 8 y la refrigeradora. Los intercambiadores 2 y 3 se han calculado con  $\alpha=0,024$ ;  $C_0=300$ ;  $S_0=5,5$  mientras que el intercambiador 8 y la refrigeradora con  $\alpha=0,55$ ;  $C_0=3000$ ;  $S_0=10$  encontrándose S en BTU/h.

**Tabla 4- 7.** Coste de la maquinaria de intercambio de calor.

| <b>Maquinaria exchange</b> | <b>n° equipos</b> | <b>Coste (€)</b> | <b>Coste total (€)</b> |
|----------------------------|-------------------|------------------|------------------------|
| Intercambiador 1           | 1                 | 33860,7          | 33860,7                |
| Intercambiador 2           | 1                 | 1428,7           | 1428,7                 |
| Intercambiador 3           | 1                 | 1414,9           | 1414,9                 |
| Intercambiador 4           | 1                 | 11305,6          | 11305,6                |
| Intercambiador 5           | 1                 | 16576,6          | 16576,6                |
| Intercambiador 6           | 1                 | 28446,5          | 28446,5                |
| Intercambiador 7           | 1                 | 16912,9          | 16912,9                |
| Intercambiador 8           | 1                 | 96576,2          | 96576,2                |
| Condensador                | 1                 | 35641,3          | 35641,3                |
| Cooler                     | 1                 | 90500,7          | 90500,7                |
| Refrigeradora              | 1                 | 144403,1         | 144403,1               |

Para el cálculo del coste de los equipos de la tabla 4-8 se han tenido en cuenta distintos criterios, para el filtro y el lavador se ha usado la correlación de Guthrie con los parámetros  $\alpha=0,46$ ;  $C_0=4300$ ;  $S_0=10$ ; estando el factor S en  $m^3/min$ . Para el cálculo del coste de la extrusora, la cortadora, la tamizadora  $\alpha=0,55$ ;  $C_0=3000$ ;  $S_0=10$  encontrándose S en BTU/h. Y, finalmente, el coste del scrubber, las torres y la caldera se ha estimado.

**Tabla 4- 8.** Coste de la maquinaria.

| Maquinaria Otros | nº equipos | Coste (€) | Coste total (€) |
|------------------|------------|-----------|-----------------|
| Alimentador 1    | 1          | 3000      | 3000            |
| Alimentador 2    | 1          | 1600      | 1600            |
| Filtro           | 1          | 3328,7    | 3328,7          |
| Extrusora        | 1          | 60937,3   | 60937,3         |
| Ducha            | 1          | 5395,1    | 5395,1          |
| Cortadora        | 1          | 73325,3   | 73325,3         |
| Secadora         | 1          | 147027,4  | 147027,4        |
| Tamizadora       | 1          | 10934,1   | 10934,1         |
| Scrubber         | 1          | 50000     | 50000           |
| Torre 1          | 1          | 50000     | 50000           |
| Torre 2          | 1          | 50000     | 50000           |
| Caldera          | 1          | 100000    | 100000          |

A continuación, se presenta el presupuesto de los equipos del proceso, resultando el mismo de 4,15 millones de euros.

**Tabla 4- 9.** Presupuesto general de los equipos del proceso.

| <b>PRESUPUESTO EQUIPOS</b>  |                    |
|-----------------------------|--------------------|
| Maquinaria impulsión        | 14918,9 €          |
| Maquinaria almacenamiento 1 | 889834,7 €         |
| Maquinaria almacenamiento 2 | 537375,9 €         |
| Maquinaria reactores        | 1677073,7 €        |
| Maquinaria exchange         | 477067,3 €         |
| Maquinaria Otros            | 555547,9 €         |
| <b>TOTAL</b>                | <b>4151818,3 €</b> |

#### 4.1.1.4 Presupuesto

El presupuesto general de la planta constaría de casi 74 millones de euros, siendo incluidos el presupuesto de todos los equipos, el presupuesto de la materia prima y el presupuesto de los servicios auxiliares.

**Tabla 4- 10.** Presupuesto general de la planta de producción de PET.

| <b>PRESUPUESTO GENERAL</b>  |                     |
|-----------------------------|---------------------|
| Presupuesto de equipos      | 4151818,3 €         |
| Presupuesto materias primas | 15017801,9 €        |
| Presupuesto servicios       | 54773009,6 €        |
| <b>TOTAL</b>                | <b>73942629,8 €</b> |

## 5 CONCLUSIONES

---

La planta de producción de polietileno tereftalato se determinó con una capacidad de 175.000 toneladas al año. Se utiliza como materia prima el ácido tereftálico y el etilenglicol y como aditivos: ácido isoftálico, dietilenglicol, ácido fosfórico, colorante y óxido de antimonio como catalizador.

El proceso se divide en dos fases, la fase fundida en la que el material se encuentra líquido viscoso y da lugar al precursor mediante las reacciones de esterificación, prepolimerización y polimerización. Y la fase sólida en la cual se realiza la cristalización del precursor y se lleva a cabo la reacción de policondensación para conseguir las especificaciones del polímero deseadas.

La producción de PET se encuentra en creciente demanda debido a la versatilidad del material, a su creciente aplicación para múltiples usos y a su coste relativamente barato, por lo que se considera que la inversión sería rentable y el proyecto sería viable.

## A1. CÁLCULO DEL PESO MOLECULAR

Mediante el uso de las siguientes ecuaciones y utilizando un software de resolución de ecuaciones como el EES se obtienen los pesos moleculares en función del índice de viscosidad del polímero.

$$IV = 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot Mn^{0,82}$$

**Figura A- 1.** Ecuación del cálculo del peso molecular en función del índice de viscosidad mediante el método de Mark-Houwink. [66].

El método de Mark-Houwink se basa en la norma ASTM D 2857: Standard Test Method for Dilute Solution Viscosity of Polymers, in: American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994; y en la norma ASTM D 4603: Standard Test Method for Determining Inherent Viscosity of Poly(Ethylene Terephthalate) (PET), in: American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.

El peso molecular del monómero de PET es 192,2 g/mol. [67]

Por lo tanto, para los diferentes índices de viscosidad se obtienen los siguientes pesos moleculares:

**Tabla A- 1.** Grado de polimerización. Siendo Mn el peso molecular promedio e IV el índice de viscosidad.

| POLÍMERO            | IV   | Mn<br>(g/mol) | Mn<br>(t/kmol) |
|---------------------|------|---------------|----------------|
| Monómero            | 0,02 | 254,24        | 0,25424        |
| Prepolímero         | 0,25 | 5635          | 5,635          |
| Polímero amorfo     | 0,6  | 16389         | 16,389         |
| Polímero cristalino | 0,6  | 16389         | 16,389         |
| PET                 | 0,8  | 23276         | 23,276         |

## A2. CÁLCULO DE CALORES ESPECÍFICOS DE LAS MATERIAS PRIMAS

A continuación, se presentan algunas formas de cálculo de calores específicos necesarios para la realización de los balances de energía del sistema.

- Para el cálculo del calor específico del etilenglicol se hace uso de la correlación siguiente [68]:

$$C_p = A + B \cdot T + C \cdot T^2$$

Figura A- 2. Cálculo del calor específico del EG donde para etilenglicol puro.

Donde  $A = 0,54467$ ;  $B = 1,1854E-3$ ;  $C = 0$ , encontrándose la  $T$  en grados centígrados.

- Para el cálculo del calor específico del dietilenglicol se hace uso de la correlación siguiente [69]:

$$C_p = A + B \cdot T$$

Figura A- 3. Cálculo del calor específico del DEG donde para dietilenglicol puro.

Donde  $A = 0,53375$ ;  $B = 8,1244E-4$ ;  $C = 0$ , encontrándose la  $T$  en grados centígrados.

- Para el cálculo del calor específico del PTA [70]
- Para el cálculo del calor específico del vapor de agua [71]

### A3. DIAGRAMA TERMODINÁMICO DEL NITRÓGENO

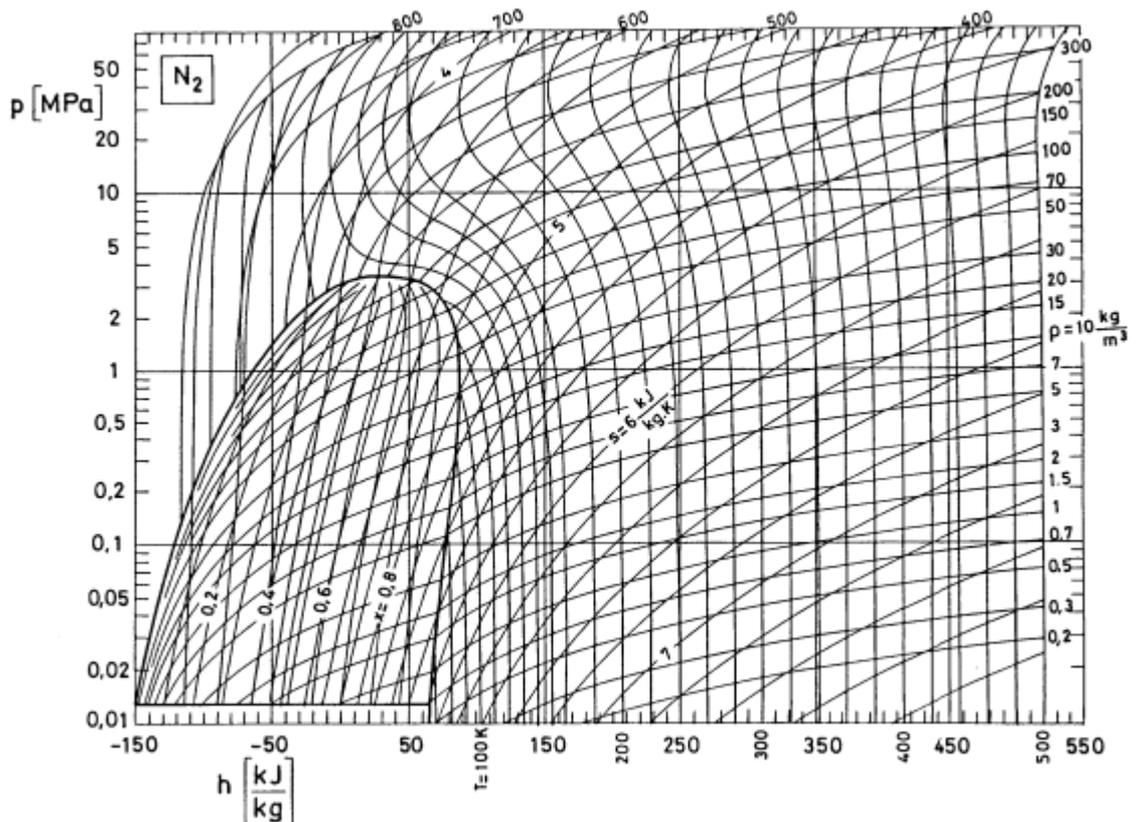


Figura A- 4. Diagrama termodinámico del nitrógeno.

## A4. HOJAS DE ESPECIFICACIÓN

### A4.1 RECIPIENTES

#### A4.1.1 Tanques

##### A4.1.1.1 Tanque de etilenglicol

**Tabla A- 2.** Hoja de especificación del tanque de etilenglicol

| TANQUE 1                      |                   | N° EQUIPO                           |            |
|-------------------------------|-------------------|-------------------------------------|------------|
|                               |                   | N° DOCUMENTO 1                      |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                  |            |
| Fluido                        | Líquido           | Capacidad (m <sup>3</sup> )         | 1450       |
| Temperatura (°C)              | 25                | Posición                            | Horizontal |
| Presión (atm)                 | 1                 | Tipo                                | Cilíndrico |
| Sólidos en suspensión         | No                | Diámetro exterior (m)               | 13,28      |
| Compuestos corrosivos         | No                | Altura (m)                          | 15,49      |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1116              | Espesor (mm)                        |            |
| Viscosidad (kg/m·s)           | 0,02              | Aislamiento                         | No         |
| Presión de vapor (Pa)         | 13,33             | Peso vacío/lleño (kg)               |            |
| Punto de inflamabilidad (°C)  | 116               |                                     |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                   |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración                       | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento                       | No         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                | -          |
| Tratamiento térmico           | No                | Válvula seguridad                   |            |
| Aislamiento                   | No                | Venteo                              | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa                                | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga                               | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector                           | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |                                     |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                   |            |
| N° serie                      |                   | Esp. Fabricante                     |            |
| Código                        |                   | Lista despieces                     |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |                                     |            |
|                               |                   |                                     |            |

A4.1.1.2 Tanque de dietilenglicol

**Tabla A- 3.** Hoja de especificación del tanque de dietilenglicol.

| <b>TANQUE 2</b>               |                   | <b>DESCRIPCIÓN</b>                  |            |
|-------------------------------|-------------------|-------------------------------------|------------|
|                               |                   | <b>N° EQUIPO</b>                    |            |
|                               |                   | <b>N° DOCUMENTO 2</b>               |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                  |            |
| Fluido                        | Líquido           | Capacidad (m <sup>3</sup> )         | 90         |
| Temperatura (°C)              | 25                | Posición                            | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 1                 | Tipo                                | Cilíndrico |
| Sólidos en suspensión         | No                | Diámetro exterior (m)               | 5,25       |
| Compuestos corrosivos         | No                | Altura (m)                          | 6,13       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1120              | Espesor (mm)                        |            |
| Viscosidad (kg/m·s)           | 0,04              | Aislamiento                         | No         |
| Presión de vapor (Pa)         | 0,3               | Peso vacío/lleño (kg)               |            |
| Punto de inflamabilidad (°C)  | 364               |                                     |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                   |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración                       | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento                       | No         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                | -          |
| Tratamiento térmico           | No                | Válvula seguridad                   |            |
| Aislamiento                   | No                | Venteo                              | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa                                | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga                               | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector                           | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |                                     |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                   |            |
| N° serie                      |                   | Esp. Fabricante                     |            |
| Código                        |                   | Lista despieces                     |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |                                     |            |
|                               |                   |                                     |            |

A4.1.1.3 Tanque de preparación de la pasta

**Tabla A- 4.** Hojas de especificaciones del tanque de preparación de la pasta.

| <b>TANQUE 3</b>               |                   | <b>DESCRIPCIÓN</b>                  |            |
|-------------------------------|-------------------|-------------------------------------|------------|
|                               |                   | <b>N° EQUIPO</b>                    |            |
|                               |                   | <b>N° DOCUMENTO 3</b>               |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                  |            |
| Fluido                        | Líquido           | Capacidad (m <sup>3</sup> )         | 16,87      |
| Temperatura (°C)              | 25                | Posición                            | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 1                 | Tipo                                | Cilíndrico |
| Sólidos en suspensión         | No                | Diámetro exterior (m)               | 2,45       |
| Compuestos corrosivos         | No                | Altura (m)                          | 4,89       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1360              | Espesor (mm)                        |            |
| Viscosidad (kg/m·s)           | 0,04              | Aislamiento                         | No         |
| Presión de vapor (Pa)         | 0,3               | Peso vacío/lleño (kg)               |            |
| Punto de inflamabilidad (°C)  | 364               |                                     |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                   |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración                       | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento                       | No         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                | -          |
| Tratamiento térmico           | No                | Válvula seguridad                   |            |
| Aislamiento                   | No                | Venteo                              | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa                                | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga                               | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector                           | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |                                     |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                   |            |
| N° serie                      |                   | Esp. Fabricante                     |            |
| Código                        |                   | Lista despieces                     |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |                                     |            |
|                               |                   |                                     |            |

A4.1.2 Silos

A4.1.2.1 Silo de PTA

**Tabla A- 5.** Hoja de especificación del silo de PTA. [72] [73]

|                               |                   |  |            |
|-------------------------------|-------------------|--|------------|
| <b>SILO 1</b>                 |                   | <b>DESCRIPCIÓN:</b> Silo de ácido tereftálico puro |            |
|                               |                   | <b>Nº EQUIPO</b>                                   |            |
|                               |                   | <b>Nº DOCUMENTO 3</b>                              |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                                 |            |
| Fluido                        | Sólido (polvo)    | Capacidad (m <sup>3</sup> )                        | 330        |
| Temperatura (°C)              | 25                | Posición   | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 1                 | Tipo   | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         | Sí                | Diámetro exterior (m)                              | 7,65       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1522              | Altura (m)   | 9,56       |
| Viscosidad (kg/m·s)           |                   | Espesor (mm)                                       |            |
| Presión de vapor (Pa)         | < 1               | Aislamiento  | No         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  | 260               | Peso vacío/lleño (kg)                              |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                                  |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración                                      | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento                                      | No         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                               | -          |
| Tratamiento térmico           | No                | Válvula seguridad                                  |            |
| Aislamiento                   | No                | Venteo   | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa   | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga  | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector  | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |  |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje                |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                                  |            |
| Nº serie                      |                   | Esp. Fabricante                                    |            |
| Código                        |                   | Lista despieces                                    |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |  |            |
|                               |                   |  |            |

A4.1.2.2 Silo de IPA

**Tabla A- 6.** Hoja de especificación del silo de IPA.[74]

|                               |                   |  |            |
|-------------------------------|-------------------|--|------------|
| <b>SILO 2</b>                 |                   | <b>DESCRIPCIÓN:</b> Silo de ácido isoftálico |            |
|                               |                   | <b>Nº EQUIPO</b>                             |            |
|                               |                   | <b>Nº DOCUMENTO 4</b>                        |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                           |            |
| Fluido                        | Sólido (polvo)    | Capacidad (m <sup>3</sup> )                  | 105        |
| Temperatura (°C)              | 25                | Posición                                     | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 1                 | Tipo   | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         | Sí                | Diámetro exterior (m)                        | 5,18       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1522              | Altura (m)                                   | 6,47       |
| Viscosidad (kg/m·s)           |                   | Espesor (mm)                                 |            |
| Presión de vapor (Pa)         | < 1               | Aislamiento                                  | No         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  |                   | Peso vacío/lleño (kg)                        |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                            |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración                                | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento                                | No         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                         | -          |
| Tratamiento térmico           | No                | Válvula seguridad                            |            |
| Aislamiento                   | No                | Venteo                                       | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa   | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga  | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector                                    | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |  |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje          |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                            |            |
| Nº serie                      |                   | Esp. Fabricante                              |            |
| Código                        |                   | Lista despieces                              |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |  |            |
|                               |                   |  |            |

A4.1.2.3 Silos de aditivos

**Tabla A- 7.** Hoja de especificaciones de silo de catalizador  $Sb_2O_3$

| <b>SILO 3</b>                 |                   | <b>DESCRIPCIÓN: Silo de <math>Sb_2O_3</math></b> |            |
|-------------------------------|-------------------|--|------------|
|                               |                   | <b>N° EQUIPO</b>                                 |            |
|                               |                   | <b>N° DOCUMENTO 5</b>                            |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                               |            |
| Fluido                        | Sólido (polvo)    | Capacidad (m <sup>3</sup> )                      | 0,28       |
| Temperatura (°C)              | 25                | Posición   | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 1                 | Tipo   | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         | Sí                | Diámetro exterior (m)                            | 0,68       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 5200              | Altura (m)                                       | 0,84       |
| Viscosidad (kg/m·s)           |                   | Espesor (mm)                                     |            |
| Presión de vapor (Pa)         | 130               | Aislamiento                                      | No         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  | 1425              | Peso vacío/lleño (kg)                            |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                                |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración                                    | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento                                    | No         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                             | -          |
| Tratamiento térmico           | No                | Válvula seguridad                                |            |
| Aislamiento                   | No                | Venteo   | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa   | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga  | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector  | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |  |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje              |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                                |            |
| N° serie                      |                   | Esp. Fabricante                                  |            |
| Código                        |                   | Lista despieces                                  |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |  |            |
|                               |                   |  |            |

**Tabla A- 8.** Hoja de especificaciones de silo de aditivo de fósforo (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)

|                               |                   |  |            |
|-------------------------------|-------------------|--|------------|
| <b>SILO 4</b>                 |                   | <b>DESCRIPCIÓN:</b> Silo de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> |            |
|                               |                   | <b>Nº EQUIPO</b>   |            |
|                               |                   | <b>Nº DOCUMENTO 6</b>                                      |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>   |            |
| Fluido                        | Sólido (polvo)    | Capacidad (m <sup>3</sup> )                                | 0,04       |
| Temperatura (°C)              | 25                | Posición   | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 1                 | Tipo   | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         | Sí                | Diámetro exterior (m)                                      | 0,38       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1800              | Altura (m)   | 0,48       |
| Viscosidad (kg/m·s)           |                   | Espesor (mm)   |            |
| Presión de vapor (Pa)         | 4                 | Aislamiento  | No         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  | 261               | Peso vacío/lleño (kg)                                      |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>  |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración  | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento  | No         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                                       | -          |
| Tratamiento térmico           | No                | Válvula seguridad  |            |
| Aislamiento                   | No                | Venteo   | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa   | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga  | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector  | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |  |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje                        |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas  |            |
| Nº serie                      |                   | Esp. Fabricante  |            |
| Código                        |                   | Lista despieces  |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |  |            |
|                               |                   |  |            |

**Tabla A- 9.** Hoja de especificaciones de silo de colorante (TiO<sub>2</sub>)

|                               |                   |  |            |
|-------------------------------|-------------------|--|------------|
| <b>SILO 5</b>                 |                   | <b>DESCRIPCIÓN:</b> Silo de colorante TiO <sub>2</sub> |            |
|                               |                   | <b>N° EQUIPO</b>                                       |            |
|                               |                   | <b>N° DOCUMENTO 7</b>                                  |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                                     |            |
| Fluido                        | Sólido (polvo)    | Capacidad (m <sup>3</sup> )                            | 2,90       |
| Temperatura (°C)              | 25                | Posición   | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 1                 | Tipo   | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         | Sí                | Diámetro exterior (m)                                  | 1,58       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 4200              | Altura (m)   | 1,97       |
| Viscosidad (kg/m·s)           |                   | Espesor (mm)   |            |
| Presión de vapor (Pa)         |                   | Aislamiento  | No         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  | 2500              | Peso vacío/lleño (kg)                                  |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                                      |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración  | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento  | No         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                                   | -          |
| Tratamiento térmico           | No                | Válvula seguridad                                      |            |
| Aislamiento                   | No                | Venteo   | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa   | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga  | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector  | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |  |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje                    |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                                      |            |
| N° serie                      |                   | Esp. Fabricante  |            |
| Código                        |                   | Lista despieces  |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |  |            |
|                               |                   |  |            |

A4.1.3 Mezcladores

A4.1.3.1 Mezclador de catalizador y EG

**Tabla A- 10.** Hoja de especificaciones de mezclador de Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + EG

|                               |                   |  |            |
|-------------------------------|-------------------|--|------------|
| <b>MEZCLADOR 1</b>            |                   | <b>DESCRIPCIÓN:</b> Mezclador de Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + EG |            |
|                               |                   | <b>Nº EQUIPO</b>   |            |
|                               |                   | <b>Nº DOCUMENTO 8</b>  |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>   |            |
| Fluido                        | Líquido           | Capacidad (l)  | 37,75      |
| Temperatura (°C)              | 25                | Posición   | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 1                 | Tipo   | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         |                   | Diámetro exterior (m)  | 0,45       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1116              | Altura (m)   | 0,6        |
| Viscosidad (kg/m·s)           | 0,02              | Espesor (mm)   |            |
| Presión de vapor (Pa)         | 13,33             | Aislamiento  | No         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  | 116               | Peso vacío/lleño (kg)  |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>  |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración  | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento  | No         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig   | -          |
| Tratamiento térmico           | No                | Válvula seguridad  |            |
| Aislamiento                   | No                | Venteo   | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa   | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga  | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector  | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |  |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje                                  |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas  |            |
| Nº serie                      |                   | Esp. Fabricante  |            |
| Código                        |                   | Lista despieces  |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |  |            |
|                               |                   |  |            |

A4.1.3.2 Mezclador de ácido fosfórico y EG

**Tabla A- 11.** Hoja de especificaciones de mezclador de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + EG

|                               |                   |   |            |
|-------------------------------|-------------------|---|------------|
| <b>MEZCLADOR 2</b>            |                   | <b>DESCRIPCIÓN:</b> Silo de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> + EG |            |
|                               |                   | <b>N° EQUIPO</b>  |            |
|                               |                   | <b>N° DOCUMENTO 9</b>   |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>  |            |
| Fluido                        | Sólido (polvo)    | Capacidad (l)   | 0,80       |
| Temperatura (°C)              | 25                | Posición  | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 1                 | Tipo  | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         |                   | Diámetro exterior (m)   | 0,2        |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1116              | Altura (m)  | 0,27       |
| Viscosidad (kg/m·s)           | 0,02              | Espesor (mm)  |            |
| Presión de vapor (Pa)         | 13,33             | Aislamiento   | No         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  | 116               | Peso vacío/lleño (kg)   |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>   |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración   | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento   | No         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig  | -          |
| Tratamiento térmico           | No                | Válvula seguridad   |            |
| Aislamiento                   | No                | Venteo  | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa  | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga   | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector   | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |   |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje                             |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas   |            |
| N° serie                      |                   | Esp. Fabricante   |            |
| Código                        |                   | Lista despieces   |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |   |            |
|                               |                   |   |            |

A4.1.3.3 Mezclador de colorante y EG

**Tabla A- 12.** Hoja de especificaciones de mezclador de TiO<sub>2</sub> + EG

|                               |                   |  |            |
|-------------------------------|-------------------|--|------------|
| <b>MEZCLADOR 3</b>            |                   | <b>DESCRIPCIÓN: Silo de TiO<sub>2</sub> + EG</b> |            |
|                               |                   | <b>Nº EQUIPO</b>                                 |            |
|                               |                   | <b>Nº DOCUMENTO 10</b>                           |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                               |            |
| Fluido                        | Sólido (polvo)    | Capacidad (l)                                    | 40,90      |
| Temperatura (°C)              | 25                | Posición   | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 1                 | Tipo   | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         |                   | Diámetro exterior (m)                            | 0,45       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1116              | Altura (m)                                       | 0,6        |
| Viscosidad (kg/m·s)           | 0,02              | Espesor (mm)                                     |            |
| Presión de vapor (Pa)         | 13,33             | Aislamiento                                      | No         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  | 116               | Peso vacío/lleño (kg)                            |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                                |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración                                    | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento                                    | No         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                             | -          |
| Tratamiento térmico           | No                | Válvula seguridad                                |            |
| Aislamiento                   | No                | Venteo   | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa   | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga  | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector  | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |  |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje              |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                                |            |
| Nº serie                      |                   | Esp. Fabricante                                  |            |
| Código                        |                   | Lista despieces                                  |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |  |            |
|                               |                   |  |            |

## A4.2 REACTORES

### A4.2.1 Reactores de esterificación

**Tabla A- 13.** Hoja de especificaciones del primer reactor de esterificación

| <b>REACTOR 1</b>              |                   | <b>DESCRIPCIÓN: Reactor de esterificación I</b> |            |
|-------------------------------|-------------------|---|------------|
|                               |                   | <b>N° EQUIPO</b>                                |            |
|                               |                   | <b>N° DOCUMENTO 11</b>                          |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                              |            |
| Fluido                        | Líquido/vapor     | Capacidad (m <sup>3</sup> )                     | 143,99     |
| Temperatura (°C)              | 260               | Posición  | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 1,1               | Tipo  | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         | No                | Diámetro exterior (m)                           | 5,00       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1275              | Altura (m)                                      | 10,00      |
| Viscosidad (kg/m·s)           |                   | Espesor (mm)                                    |            |
| Presión de vapor (Pa)         |                   | Aislamiento                                     | Sí         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  |                   | Peso vacío/lleño (kg)                           |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                               |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración                                   | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento                                   | Sí         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                            | -          |
| Tratamiento térmico           | Sí                | Válvula seguridad                               |            |
| Aislamiento                   | Sí                | Venteo  | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa  | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga   | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector                                       | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |   |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje             |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                               |            |
| N° serie                      |                   | Esp. Fabricante                                 |            |
| Código                        |                   | Lista despieces                                 |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |   |            |
|                               |                   |   |            |

**Tabla A- 14.** Hoja de especificaciones del segundo reactor de esterificación

| <b>REACTOR 2</b>              |                   | <b>DESCRIPCIÓN: Reactor de esterificación II</b> |            |
|-------------------------------|-------------------|--|------------|
|                               |                   | <b>Nº EQUIPO</b>                                 |            |
|                               |                   | <b>Nº DOCUMENTO 12</b>                           |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                               |            |
| Fluido                        | Líquido/vapor     | Capacidad (m <sup>3</sup> )                      | 50,81      |
| Temperatura (°C)              | 265               | Posición   | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 0,4               | Tipo   | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         |                   | Diámetro exterior (m)                            | 3,53       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1280              | Altura (m)                                       | 7,07       |
| Viscosidad (kg/m·s)           |                   | Espesor (mm)                                     |            |
| Presión de vapor (Pa)         | < 1               | Aislamiento                                      | Sí         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  |                   | Peso vacío/lleño (kg)                            |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                                |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración                                    | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento                                    | Sí         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                             | -          |
| Tratamiento térmico           | Sí                | Válvula seguridad                                |            |
| Aislamiento                   | Sí                | Venteo   | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa   | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga  | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector  | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |  |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje              |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                                |            |
| Nº serie                      |                   | Esp. Fabricante                                  |            |
| Código                        |                   | Lista despieces                                  |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |  |            |
|                               |                   |  |            |

A4.2.2 Reactor de prepolimerización

**Tabla A- 15.** Hoja de especificaciones del reactor de prepolimerización.

| <b>REACTOR 3</b>              |                   | <b>DESCRIPCIÓN: Reactor de prepolimerización</b> |            |
|-------------------------------|-------------------|--|------------|
|                               |                   | <b>N° EQUIPO</b>                                 |            |
|                               |                   | <b>N° DOCUMENTO 13</b>                           |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                               |            |
| Fluido                        | Líquido/vapor     | Capacidad (m <sup>3</sup> )                      | 69,5       |
| Temperatura (°C)              | 285               | Posición   | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 0,04              | Tipo   | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         |                   | Diámetro exterior (m)                            | 4,80       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1295              | Altura (m)                                       | 5,60       |
| Viscosidad (kg/m·s)           |                   | Espesor (mm)                                     |            |
| Presión de vapor (Pa)         |                   | Aislamiento                                      | Sí         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  |                   | Peso vacío/lleño (kg)                            |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                                |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración                                    | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento                                    | Sí         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                             | -          |
| Tratamiento térmico           | Sí                | Válvula seguridad                                |            |
| Aislamiento                   | Sí                | Venteo   | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa   | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga  | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector  | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |  |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje              |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                                |            |
| N° serie                      |                   | Esp. Fabricante                                  |            |
| Código                        |                   | Lista despieces                                  |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |  |            |
|                               |                   |  |            |

A4.2.3 Reactor de polimerización

**Tabla A- 16.** Hoja de especificaciones del reactor de polimerización.

| <b>REACTOR 4</b>              |                   | <b>DESCRIPCIÓN: Reactor de polimerización</b> |            |
|-------------------------------|-------------------|---|------------|
|                               |                   | <b>Nº EQUIPO</b>                              |            |
|                               |                   | <b>Nº DOCUMENTO 14</b>                        |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                            |            |
| Fluido                        | Líquido/vapor     | Capacidad (m <sup>3</sup> )                   | 1256,87    |
| Temperatura (°C)              | 290               | Posición                                      | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 0,001             | Tipo  | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         |                   | Diámetro exterior (m)                         | 12,60      |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 1300              | Altura (m)                                    | 14,70      |
| Viscosidad (kg/m·s)           |                   | Espesor (mm)                                  |            |
| Presión de vapor (Pa)         |                   | Aislamiento                                   | Sí         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  |                   | Peso vacío/lleño (kg)                         |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                             |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración                                 | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento                                 | Sí         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                          | -          |
| Tratamiento térmico           | Sí                | Válvula seguridad                             |            |
| Aislamiento                   | Sí                | Venteo  | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa  | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga   | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector                                     | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |   |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje           |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                             |            |
| Nº serie                      |                   | Esp. Fabricante                               |            |
| Código                        |                   | Lista despieces                               |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |   |            |
|                               |                   |   |            |

A4.2.4 Reactor de policondensación

**Tabla A- 17.** Hoja de especificaciones del reactor de policondensación.

|                               |                   |   |            |
|-------------------------------|-------------------|---|------------|
| <b>REACTOR 5</b>              |                   | <b>DESCRIPCIÓN:</b> Reactor de policondensación |            |
|                               |                   | <b>Nº EQUIPO</b>                                |            |
|                               |                   | <b>Nº DOCUMENTO 15</b>                          |            |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>     |                   | <b>DIMENSIONES</b>                              |            |
| Fluido                        | Líquido/vapor     | Capacidad (m <sup>3</sup> )                     | 8300       |
| Temperatura (°C)              | 200               | Posición  | Vertical   |
| Presión (atm)                 | 0,1               | Tipo  | Cilíndrico |
| Compuestos corrosivos         |                   | Diámetro exterior (m)                           | 23,7       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | 3000              | Altura (m)                                      | 27,65      |
| Viscosidad (kg/m·s)           |                   | Espesor (mm)                                    |            |
| Presión de vapor (Pa)         |                   | Aislamiento                                     | Sí         |
| Punto de inflamabilidad (°C)  |                   | Peso vacío/lleño (kg)                           |            |
| <b>DATOS CONSTRUCTIVOS</b>    |                   | <b>ACCESORIOS</b>                               |            |
| Presión de prueba (Pa)        | 1·10 <sup>5</sup> | Refrigeración                                   | No         |
| Fondo                         | Tolva             | Calentamiento                                   | Sí         |
| Sobrespesor por corrosión     | No                | Fluido calent/refrig                            | -          |
| Tratamiento térmico           | Sí                | Válvula seguridad                               |            |
| Aislamiento                   | Sí                | Venteo  | No         |
| Pintura                       | No                | Tapa  | No         |
| Material constructivo         | Acero inoxidable  | Purga   | Sí         |
| Recubrimiento interno         | No                | Deflector                                       | No         |
| <b>DATOS FABRICANTE</b>       |                   |   |            |
| Fabricante                    |                   | Instrucciones/Mantenimiento/Montaje             |            |
| Modelo                        |                   | Planos o esquemas                               |            |
| Nº serie                      |                   | Esp. Fabricante                                 |            |
| Código                        |                   | Lista despieces                                 |            |
| <b>NOTAS</b>                  |                   |   |            |
|                               |                   |   |            |

### A4.3 BOMBAS

#### A3.2.2 Bomba de preparación de la pasta

**Tabla A- 18.** Hoja de especificación de la bomba de preparación de la pasta.

| <b>BOMBA 2</b>   |                     | <b>Ítem nº</b>   | <b>Área</b>        |
|--|---------------------|------------------|--------------------|
| <b>Planta:</b> Producción de PET   |                     | <b>Proyecto</b>  | <b>Fecha</b>       |
| <b>Ubicación:</b> Entre el Tanque 3 y el Reactor 1                                     |                     | <b>Hoja:</b> 1/1 |                    |
| <b>Denominación:</b> Bomba de desplazamiento positivo, rotativa de tornillo helioidal. |                     |                  | <b>Cantidad:</b> 1 |
| <b>CONDICIONES DE OPERACIÓN</b>  |                     |                  |                    |
| <b>Fluido</b>  | Pasta               |                  |                    |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)   | 17                  |                  |                    |
| Temperatura de trabajo (°C)  | 25                  |                  |                    |
| Temperatura de diseño (°C)   | 25                  |                  |                    |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )  |                     |                  |                    |
| Viscosidad (cP)  |                     |                  |                    |
| Carga total (m)  |                     |                  |                    |
| Presión aspiración (Pa)  | 1·10 <sup>5</sup>   |                  |                    |
| Presión impulsión (Pa)   | 1,1·10 <sup>5</sup> |                  |                    |
| NPSH disponible  | 14 m                |                  |                    |
| Potencia (kW)  | 556                 |                  |                    |
| Velocidad máxima de giro rodete (rpm)  | 300                 |                  |                    |

### A3.2.3 Bomba de prepolimerización

**Tabla A- 19.** Hoja de especificación de la bomba de prepolimerización.

| <b>BOMBA 3</b>   | <b>Ítem n°</b>       | <b>Área</b>        |
|--|----------------------|--------------------|
| <b>Planta:</b> Producción de PET   | <b>Proyecto</b>      | <b>Fecha</b>       |
| <b>Ubicación:</b> Entre el Reactor 3 y el Reactor 4                                      | <b>Hoja:</b> 1/1     |                    |
| <b>Denominación:</b> Bomba de desplazamiento positivo, rotativa de piñones o engranajes. |                      | <b>Cantidad:</b> 1 |
| <b>CONDICIONES DE OPERACIÓN</b>  |                      |                    |
| Fluido   | Prepolímero          |                    |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)   | 8,1                  |                    |
| Temperatura de trabajo (°C)  | 25                   |                    |
| Temperatura de diseño (°C)   | 25                   |                    |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )  | 3000                 |                    |
| Viscosidad (dl/g)  | 0,25                 |                    |
| Carga total (m)  |                      |                    |
| Presión aspiración (Pa)  | 0,04·10 <sup>5</sup> |                    |
| Presión impulsión (Pa)   | 0,01·10 <sup>5</sup> |                    |
| NPSH disponible  | 11,8 m               |                    |
| Velocidad máxima de giro rodete (rpm)  | 400                  |                    |
| Potencia (kW)  | 1080                 |                    |

### A3.2.4 Bomba de polímero

**Tabla A- 20.** Hoja de especificación de la bomba de polímero.

| <b>BOMBA 4</b>   | <b>Ítem n°</b>       | <b>Área</b>        |
|--|----------------------|--------------------|
| <b>Planta:</b> Producción de PET   | <b>Proyecto</b>      | <b>Fecha</b>       |
| <b>Ubicación:</b> Entre el Reactor 4 y el Filtro 1                                       | <b>Hoja:</b> 1/1     |                    |
| <b>Denominación:</b> Bomba de desplazamiento positivo, rotativa de piñones o engranajes. |                      | <b>Cantidad:</b> 1 |
| <b>CONDICIONES DE OPERACIÓN</b>  |                      |                    |
| Fluido   | Polímero amorfo      |                    |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)   | 8                    |                    |
| Temperatura de trabajo (°C)  | 25                   |                    |
| Temperatura de diseño (°C)   | 25                   |                    |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )  | 3000                 |                    |
| Viscosidad (dl/g)  | 0,6                  |                    |
| Carga total (m)  |                      |                    |
| Presión aspiración (Pa)  | 0,01·10 <sup>5</sup> |                    |
| Presión impulsión (Pa)   | 1·10 <sup>5</sup>    |                    |
| NPSH disponible  | 5,1 m                |                    |
| Velocidad máxima de giro rodete (rpm)  | 400                  |                    |
| Potencia (kW)  | 373                  |                    |

A3.2.5 Bomba de regeneración de EG

**Tabla A- 21.** Hoja de especificación de la bomba de regeneración de EG.

| <b>BOMBA 5</b>   | <b>Ítem n°</b>      | <b>Área</b>        |
|--|---------------------|--------------------|
| <b>Planta:</b> Producción de PET                       | <b>Proyecto</b>     | <b>Fecha</b>       |
| <b>Ubicación:</b> Entre el Scrubber y el Reactor 2     | <b>Hoja:</b> 1/1    |                    |
| <b>Denominación:</b> Bomba de desplazamiento positivo. |                     | <b>Cantidad:</b> 1 |
| <b>CONDICIONES DE OPERACIÓN</b>                        |                     |                    |
| Fluido   | Etilenglicol        |                    |
| Caudal (m <sup>3</sup> /h)                             | 0,6                 |                    |
| Temperatura de trabajo (°C)                            | 170                 |                    |
| Temperatura de diseño (°C)                             |                     |                    |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )                          | 11160               |                    |
| Viscosidad (dl/g)                                      |                     |                    |
| Carga total (m)  |                     |                    |
| Presión aspiración (Pa)                                | 0,8·10 <sup>5</sup> |                    |
| Presión impulsión (Pa)                                 | 1,1·10 <sup>5</sup> |                    |
| NPSH disponible  | 4,7 m               |                    |
| Velocidad máxima de giro rodete (rpm)                  | 300                 |                    |
| Potencia (kW)  | 10,7                |                    |

## A4.4. INTERCAMBIADORES DE CALOR

### A4.4.1 Intercambiador de calor 1: aceite térmico-aire

Tabla A- 22. Hoja de especificaciones del intercambiador de calor 1.

| INTERCAMBIADOR DE CALOR 1            |                         |          |                      |                                      |
|--------------------------------------|-------------------------|----------|----------------------|--------------------------------------|
| Nombre                               | Intercambiador 1- CSA 8 |          |                      |                                      |
| Proceso                              | Aceite térmico-aire     |          |                      |                                      |
| Tamaño (mm)                          |                         | Tipo     |                      | Conectado                            |
| Superficie (m <sup>2</sup> )         |                         | Carcasa  | Sí                   | Superficie carcasa (m <sup>2</sup> ) |
| COMPORTAMIENTO DE UNA UNIDAD         |                         |          |                      |                                      |
| Colocación del fluido                |                         | Carcasa  | Tubos                |                                      |
| Fluido                               |                         | Aire     | Aceite térmico       |                                      |
| Caudal (kg/s)                        |                         | 6,91     | 3,22                 |                                      |
| Vapor (kg/s)                         |                         | 6,91     | -                    |                                      |
| Líquido (kg/s)                       |                         | -        | 3,22                 |                                      |
| No condensable (kg/h)                |                         | -        | -                    |                                      |
| Temperatura in (°C)                  |                         | 20       | 300                  |                                      |
| Temperatura out (°C)                 |                         | 180      | 200                  |                                      |
| Punto de burbuja                     |                         |          | 24-239               |                                      |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )        |                         |          | 817-913              |                                      |
| Viscosidad (mPa·s)                   |                         |          | 0,221-0,395          |                                      |
| Peso molecular                       |                         | 28       | 166                  |                                      |
| Calor específico (kJ/kg·K)           |                         | 1,007    | 2,314                |                                      |
| Conductividad térmica (W/(m·K))      |                         | -        | 0,096-0,114          |                                      |
| Presión (bar)                        |                         |          |                      |                                      |
| Velocidad (m/s)                      |                         |          |                      |                                      |
| Caída de presión (bar)               |                         |          |                      |                                      |
| Fouling resist (m <sup>2</sup> ·K/W) |                         |          |                      |                                      |
| Calor intercambiado (kW)             |                         |          |                      |                                      |
| Ratio de transferencia               | Sucio                   |          | Limpio               |                                      |
| CONSTRUCCIÓN DE UNA CARCASA          |                         |          |                      |                                      |
|                                      |                         | Carcasa  | Tubos                |                                      |
| Presión de diseño (bar)              |                         |          |                      |                                      |
| Temperatura de diseño (°C)           |                         |          |                      |                                      |
| Corrosión (mm)                       |                         |          |                      |                                      |
| Conexiones                           | In                      |          |                      |                                      |
| Tamaño                               | out                     |          |                      |                                      |
| Nominal                              | intermediate            |          |                      |                                      |
| Tubo No.                             | OD                      | Tks-Avg  | Largo                | Pitch                                |
| Tipo de tubo                         |                         | Material | Pattern              |                                      |
| Carcasa                              | ID                      | OD       | cobertura de carcasa |                                      |

A4.4.2 Intercambiador de calor 2: vapor-aire

**Tabla A- 23.** Hoja de especificación del intercambiador 2.

| <b>INTERCAMBIADOR DE CALOR 2</b>     |                           |             |                                      |       |
|--------------------------------------|---------------------------|-------------|--------------------------------------|-------|
| Nombre                               | Intercambiador 2          |             |                                      |       |
| Proceso                              | Intercambiador vapor-aire |             |                                      |       |
| Tamaño (mm)                          |                           | Tipo        | Conectado                            |       |
| Superficie (m <sup>2</sup> )         | 11,14                     | Carcasa     | Superficie carcasa (m <sup>2</sup> ) |       |
| <b>COMPORTAMIENTO DE UNA UNIDAD</b>  |                           |             |                                      |       |
| Colocación del fluido                |                           | Carcasa     | Tubos                                |       |
| Fluido                               |                           | Aire        | Vapor                                |       |
| Caudal (kg/s)                        |                           | 0,64        | 5                                    |       |
| Vapor (kg/s)                         |                           | 0,64        | 5                                    |       |
| Líquido (kg/s)                       |                           | -           | -                                    |       |
| No condensable (kg/h)                |                           | -           | -                                    |       |
| Temperatura in (°C)                  |                           | 20          | 179,9                                |       |
| Temperatura out (°C)                 |                           | 170         | 160                                  |       |
| Punto de burbuja                     |                           |             |                                      |       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )        |                           | 0,7905-1,19 |                                      |       |
| Viscosidad                           |                           |             |                                      |       |
| Peso molecular                       |                           | 28          |                                      |       |
| Calor específico (kJ/kg·K)           |                           | 1,019-1,026 | -                                    |       |
| Entalpía (kJ/kg)                     |                           | -           | 2758,1-2778,1                        |       |
| Conductividad térmica (W/(m·K))      |                           | -           | -                                    |       |
| Presión (bar)                        |                           |             |                                      |       |
| Velocidad (m/s)                      |                           |             |                                      |       |
| Caída de presión (bar)               |                           |             |                                      |       |
| Fouling resist (m <sup>2</sup> ·K/W) |                           |             |                                      |       |
| Calor intercambiado (kW)             | 100                       |             |                                      |       |
| Ratio de transferencia               | Sucio                     |             | Limpio                               |       |
| <b>CONSTRUCCIÓN DE UNA CARCASA</b>   |                           |             |                                      |       |
|                                      |                           | Carcasa     | Tubos                                |       |
| Presión de diseño (bar)              |                           |             |                                      |       |
| Temperatura de diseño (°C)           |                           |             |                                      |       |
| Corrosión (mm)                       |                           |             |                                      |       |
| Conexiones                           | In                        |             |                                      |       |
| Tamaño                               | out                       |             |                                      |       |
| Nominal                              | intermediate              |             |                                      |       |
| Tubo No.                             | OD                        | Tks-Avg     | Largo                                | Pitch |
| Tipo de tubo                         |                           | Material    | Pattern                              |       |
| Carcasa                              | ID                        | OD          | cobertura de carcasa                 |       |

A4.4.3 Intercambiador de calor 3: vapor-aire

**Tabla A- 24.** Hoja de especificaiónes del intercambiadr 3.

| <b>INTERCAMBIADOR DE CALOR 3</b>     |                                    |               |    |                                      |
|--------------------------------------|------------------------------------|---------------|----|--------------------------------------|
| Nombre                               | Intercambiador 3                   |               |    |                                      |
| Proceso                              | Intercambiador de calor aire-vapor |               |    |                                      |
| Tamaño (mm)                          |                                    | Tipo          |    | Conectado                            |
| Superficie (m <sup>2</sup> )         | 7,43                               | Carcasa       | Sí | Superficie carcasa (m <sup>2</sup> ) |
| <b>COMPORTAMIENTO DE UNA UNIDAD</b>  |                                    |               |    |                                      |
| Colocación del fluido                | Carcasa                            | Tubos         |    |                                      |
| Fluido                               | Aire                               | Vapor         |    |                                      |
| Caudal (kg/s)                        | 0,43                               | 3,33          |    |                                      |
| Vapor (kg/s)                         | 0,43                               | 3,33          |    |                                      |
| Líquido (kg/s)                       | -                                  | -             |    |                                      |
| No condensable (kg/h)                | -                                  | -             |    |                                      |
| Temperatura in (°C)                  | 20                                 | 179,9         |    |                                      |
| Temperatura out (°C)                 | 170                                | 160           |    |                                      |
| Punto de burbuja                     |                                    |               |    |                                      |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )        | 0,7905-1,19                        |               |    |                                      |
| Viscosidad                           |                                    |               |    |                                      |
| Peso molecular                       | 28                                 |               |    |                                      |
| Calor específico (kJ/kg·K)           | 1,019-1,026                        | -             |    |                                      |
| Conductividad térmica (W/(m·K)       |                                    | 2758,1-2778,1 |    |                                      |
| Presión (bar)                        | -                                  | -             |    |                                      |
| Velocidad (m/s)                      |                                    |               |    |                                      |
| Caída de presión (bar)               |                                    |               |    |                                      |
| Fouling resist (m <sup>2</sup> ·K/W) |                                    |               |    |                                      |
| Calor intercambiado (kW)             | 66,67                              |               |    |                                      |
| Ratio de transferencia               | Sucio                              | Limpio        |    |                                      |
| <b>CONSTRUCCIÓN DE UNA CARCASA</b>   |                                    |               |    |                                      |
|                                      | Carcasa                            | Tubos         |    |                                      |
| Presión de diseño (bar)              |                                    |               |    |                                      |
| Temperatura de diseño (°C)           |                                    |               |    |                                      |
| Corrosión (mm)                       |                                    |               |    |                                      |
| Conexiones                           | In                                 |               |    |                                      |
| Tamaño                               | out                                |               |    |                                      |
| Nominal                              | intermediate                       |               |    |                                      |
| Tubo No.                             | OD                                 | Tks-Avg       |    | Largo                                |
| Tipo de tubo                         |                                    | Material      |    | Pattern                              |
| Carcasa                              | ID                                 | OD            |    | cobertura de carcasa                 |

A4.4.4 Intercambiador de calor 4: nitrógeno-polímero

**Tabla A- 25.** Hoja de especificaciones del intercambiador 4.

| <b>INTERCAMBIADOR DE CALOR 4</b>     |  |           |        |                                      |       |
|--------------------------------------|--|-----------|--------|--------------------------------------|-------|
| Nombre                               | Intercambiador 4                                 |           |        |                                      |       |
| Proceso                              | Intercambiador de calor N <sub>2</sub> -polímero |           |        |                                      |       |
| Tamaño (mm)                          |  | Tipo      |        | Conectado                            |       |
| Superficie (m <sup>2</sup> )         | 29,75  | Carcasa   | Sí     | Superficie carcasa (m <sup>2</sup> ) |       |
| <b>COMPORTAMIENTO DE UNA UNIDAD</b>  |  |           |        |                                      |       |
| Colocación del fluido                |  | Carcasa   |        | Tubos                                |       |
| Fluido                               |  | Polímero  |        | Nitrógeno                            |       |
| Caudal (kg/s)                        |  | 5,9       |        | 6,93                                 |       |
| Vapor (kg/s)                         |  | -         |        | 6,93                                 |       |
| Líquido (kg/s)                       |  | 5,9       |        | -                                    |       |
| No condensable (kg/h)                |  | -         |        | -                                    |       |
| Temperatura in (°C)                  |  | 130       |        | 210                                  |       |
| Temperatura out (°C)                 |  | 150       |        | 154,4                                |       |
| Punto de burbuja                     |  |           |        |                                      |       |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )        |  |           |        |                                      |       |
| Viscosidad                           |  |           |        |                                      |       |
| Peso molecular                       |  |           |        |                                      |       |
| Calor específico (kJ/kg·K)           |  | 1,66-1,79 |        | 1,06-1,07                            |       |
| Conductividad térmica (W/(m·K))      |  | -         |        | -                                    |       |
| Presión (bar)                        |  | -         |        | -                                    |       |
| Velocidad (m/s)                      |  |           |        |                                      |       |
| Caída de presión (bar)               |  |           |        |                                      |       |
| Fouling resist (m <sup>2</sup> ·K/W) |  |           |        |                                      |       |
| Calor intercambiado (kW)             | 425,86   |           |        |                                      |       |
| Ratio de transferencia               | Sucio  |           | Limpio |                                      |       |
| <b>CONSTRUCCIÓN DE UNA CARCASA</b>   |  |           |        |                                      |       |
|                                      |  | Carcasa   |        | Tubos                                |       |
| Presión de diseño (bar)              |  |           |        |                                      |       |
| Temperatura de diseño (°C)           |  |           |        |                                      |       |
| Corrosión (mm)                       |  |           |        |                                      |       |
| Conexiones                           | In   |           |        |                                      |       |
| Tamaño                               | out  |           |        |                                      |       |
| Nominal                              | intermediate                                     |           |        |                                      |       |
| Tubo No.                             | OD   | Tks-Avg   |        | Largo                                | Pitch |
| Tipo de tubo                         |  | Material  |        | Pattern                              |       |
| Carcasa                              | ID   | OD        |        | cobertura de carcasa                 |       |

A4.4.5 Intercambiador de calor 5: nitrógeno-polímero

**Tabla A- 26.** Hoja de especificaciones del intercambiador 5.

| <b>INTERCAMBIADOR DE CALOR 5</b>     |  |           |    |                                      |
|--------------------------------------|--|-----------|----|--------------------------------------|
| Nombre                               | Intercambiador 5                                 |           |    |                                      |
| Proceso                              | Intercambiador de calor N <sub>2</sub> -polímero |           |    |                                      |
| Tamaño (mm)                          |  | Tipo      |    | Conectado                            |
| Superficie (m <sup>2</sup> )         | 42,09  | Carcasa   | Sí | Superficie carcasa (m <sup>2</sup> ) |
| <b>COMPORTAMIENTO DE UNA UNIDAD</b>  |  |           |    |                                      |
| Colocación del fluido                | Carcasa  | Tubos     |    |                                      |
| Fluido                               | Polímero   | Nitrógeno |    |                                      |
| Caudal (kg/s)                        | 5,78   | 11,9      |    |                                      |
| Vapor (kg/s)                         | -  | 11,9      |    |                                      |
| Líquido (kg/s)                       | 5,78   | -         |    |                                      |
| No condensable (kg/h)                | -  | -         |    |                                      |
| Temperatura in (°C)                  | 150  | 210       |    |                                      |
| Temperatura out (°C)                 | 180  | 172,5     |    |                                      |
| Punto de burbuja                     |  |           |    |                                      |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )        |  |           |    |                                      |
| Viscosidad                           |  |           |    |                                      |
| Peso molecular                       |  |           |    |                                      |
| Calor específico (kJ/kg·K)           | 1,79-1,9   | 1,06-1,07 |    |                                      |
| Conductividad térmica (W/(m·K))      | -  | -         |    |                                      |
| Presión (bar)                        | -  | -         |    |                                      |
| Velocidad (m/s)                      |  |           |    |                                      |
| Caída de presión (bar)               |  |           |    |                                      |
| Fouling resist (m <sup>2</sup> ·K/W) |  |           |    |                                      |
| Calor intercambiado (kW)             | 490  |           |    |                                      |
| Ratio de transferencia               | Sucio  | Limpio    |    |                                      |
| <b>CONSTRUCCIÓN DE UNA CARCASA</b>   |  |           |    |                                      |
|                                      | Carcasa  | Tubos     |    |                                      |
| Presión de diseño (bar)              |  |           |    |                                      |
| Temperatura de diseño (°C)           |  |           |    |                                      |
| Corrosión (mm)                       |  |           |    |                                      |
| Conexiones                           | In   |           |    |                                      |
| Tamaño                               | out  |           |    |                                      |
| Nominal                              | intermediate                                     |           |    |                                      |
| Tubo No.                             | OD   | Tks-Avg   |    | Largo                                |
| Tipo de tubo                         |  | Material  |    | Pattern                              |
| Carcasa                              | ID   | OD        |    | cobertura de carcasa                 |

A4.4.6 Intercambiador de calor 6: nitrógeno-nitrógeno

**Tabla A- 27.** Hoja de especificaciones del intercambiador 6.

| <b>INTERCAMBIADOR DE CALOR 6</b>     |  |          |                |                                      |
|--------------------------------------|--|----------|----------------|--------------------------------------|
| Nombre                               | Intercambiador 6                                       |          |                |                                      |
| Proceso                              | Intercambiador de calor N <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> |          |                |                                      |
| Tamaño (mm)                          |  | Tipo     |                | Conectado                            |
| Superficie (m <sup>2</sup> )         | 73,72  | Carcasa  | Sí             | Superficie carcasa (m <sup>2</sup> ) |
| <b>COMPORTAMIENTO DE UNA UNIDAD</b>  |  |          |                |                                      |
| Colocación del fluido                | Carcasa  |          | Tubos          |                                      |
| Fluido                               | N <sub>2</sub>   |          | N <sub>2</sub> |                                      |
| Caudal (kg/s)                        | 22,45  |          | 16,43          |                                      |
| Vapor (kg/s)                         | 22,45  |          | 16,43          |                                      |
| Líquido (kg/s)                       | -  |          | -              |                                      |
| No condensable (kg/h)                | -  |          | -              |                                      |
| Temperatura in (°C)                  | 106,19   |          | 140            |                                      |
| Temperatura out (°C)                 | 195  |          | 150            |                                      |
| Punto de burbuja                     |  |          |                |                                      |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )        |  |          |                |                                      |
| Viscosidad                           |  |          |                |                                      |
| Peso molecular                       |  |          |                |                                      |
| Calor específico (kJ/kg·K)           | 1,06-1,07  |          | 1,06-1,07      |                                      |
| Conductividad térmica (W/(m·K))      | -  |          | -              |                                      |
| Presión (bar)                        | -  |          | -              |                                      |
| Velocidad (m/s)                      |  |          |                |                                      |
| Caída de presión (bar)               |  |          |                |                                      |
| Fouling resist (m <sup>2</sup> ·K/W) |  |          |                |                                      |
| Calor intercambiado (kW)             | 830,75   |          |                |                                      |
| Ratio de transferencia               | Sucio  |          | Limpio         |                                      |
| <b>CONSTRUCCIÓN DE UNA CARCASA</b>   |  |          |                |                                      |
|                                      | Carcasa  |          | Tubos          |                                      |
| Presión de diseño (bar)              |  |          |                |                                      |
| Temperatura de diseño (°C)           |  |          |                |                                      |
| Corrosión (mm)                       |  |          |                |                                      |
| Conexiones                           | In   |          |                |                                      |
| Tamaño                               | out  |          |                |                                      |
| Nominal                              | intermediate   |          |                |                                      |
| Tubo No.                             | OD   | Tks-Avg  |                | Largo                                |
| Tipo de tubo                         |  | Material |                | Pattern                              |
| Carcasa                              | ID   | OD       |                | cobertura de carcasa                 |

A4.4.7 Intercambiador de calor 7: nitrógeno-nitrógeno

Tabla A- 28. Hoja de especificaciones del intercambiador 7.

| <b>INTERCAMBIADOR DE CALOR 7</b>     |  |                |        |                                      |
|--------------------------------------|--|----------------|--------|--------------------------------------|
| Nombre                               | Intercambiador 7                                       |                |        |                                      |
| Proceso                              | Intercambiador de calor N <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> |                |        |                                      |
| Tamaño (mm)                          |  | Tipo           |        | Conectado                            |
| Superficie (m <sup>2</sup> )         | 151,51   | Carcasa        | Sí     | Superficie carcasa (m <sup>2</sup> ) |
| <b>COMPORTAMIENTO DE UNA UNIDAD</b>  |  |                |        |                                      |
| Colocación del fluido                |  | Carcasa        |        | Tubos                                |
| Fluido                               |  | N <sub>2</sub> |        | N <sub>2</sub>                       |
| Caudal (kg/s)                        |  | 5,83           |        | 16,43                                |
| Vapor (kg/s)                         |  | 5,83           |        | 16,43                                |
| Líquido (kg/s)                       |  | -              |        | -                                    |
| No condensable (kg/h)                |  | -              |        | -                                    |
| Temperatura in (°C)                  |  | 20             |        | 75                                   |
| Temperatura out (°C)                 |  | 150            |        | 77                                   |
| Punto de burbuja                     |  |                |        |                                      |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )        |  |                |        |                                      |
| Viscosidad                           |  |                |        |                                      |
| Peso molecular                       |  |                |        |                                      |
| Calor específico (kJ/kg·K)           |  | 1,05-1,06      |        | 1,06-1,07                            |
| Conductividad térmica (W/(m·K))      |  | -              |        | -                                    |
| Presión (bar)                        |  | -              |        | -                                    |
| Velocidad (m/s)                      |  |                |        |                                      |
| Caída de presión (bar)               |  |                |        |                                      |
| Fouling resist (m <sup>2</sup> ·K/W) |  |                |        |                                      |
| Calor intercambiado (kW)             | 1344,69  |                |        |                                      |
| Ratio de transferencia               | Sucio  |                | Limpio |                                      |
| <b>CONSTRUCCIÓN DE UNA CARCASA</b>   |  |                |        |                                      |
|                                      |  | Carcasa        |        | Tubos                                |
| Presión de diseño (bar)              |  |                |        |                                      |
| Temperatura de diseño (°C)           |  |                |        |                                      |
| Corrosión (mm)                       |  |                |        |                                      |
| Conexiones                           | In   |                |        |                                      |
| Tamaño                               | out  |                |        |                                      |
| Nominal                              | intermediate   |                |        |                                      |
| Tubo No.                             | OD   | Tks-Avg        |        | Largo                                |
| Tipo de tubo                         |  | Material       |        | Pattern                              |
| Carcasa                              | ID   | OD             |        | cobertura de carcasa                 |
|                                      |  |                |        | Pitch                                |

A4.4.8 Intercambiador de calor 8: nitrógeno-aceite térmico

**Tabla A- 29.** Hoja de especificaciones del intercambiador 8.

| <b>INTERCAMBIADOR DE CALOR 8</b>     |  |                |    |                                      |
|--------------------------------------|--|----------------|----|--------------------------------------|
| Nombre                               | Intercambiador 8                                       |                |    |                                      |
| Proceso                              | Intercambiador de calor N <sub>2</sub> -aceite térmico |                |    |                                      |
| Tamaño (mm)                          |  | Tipo           |    | Conectado                            |
| Superficie (m <sup>2</sup> )         |  | Carcasa        | Sí | Superficie carcasa (m <sup>2</sup> ) |
| <b>COMPORTAMIENTO DE UNA UNIDAD</b>  |  |                |    |                                      |
| Colocación del fluido                |  | Carcasa        |    | Tubos                                |
| Fluido                               |  | N <sub>2</sub> |    | Aceite térmico                       |
| Caudal (kg/s)                        |  | 22,46          |    | 4,47                                 |
| Vapor (kg/s)                         |  | 22,46          |    | -                                    |
| Líquido (kg/s)                       |  | -              |    | -                                    |
| No condensable (kg/h)                |  | -              |    | 4,47                                 |
| Temperatura in (°C)                  |  | 140            |    | 210                                  |
| Temperatura out (°C)                 |  | 350            |    | 250                                  |
| Punto de burbuja                     |  |                |    |                                      |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )        |  |                |    |                                      |
| Viscosidad                           |  |                |    |                                      |
| Peso molecular                       |  |                |    |                                      |
| Calor específico (kJ/kg·K)           |  | 1,07-1,08      |    | 2,18-2,45                            |
| Conductividad térmica (W/(m·K))      |  | -              |    | -                                    |
| Presión (bar)                        |  | -              |    | -                                    |
| Velocidad (m/s)                      |  |                |    |                                      |
| Caída de presión (bar)               |  |                |    |                                      |
| Fouling resist (m <sup>2</sup> ·K/W) |  |                |    |                                      |
| Calor intercambiado (kW)             |  | 577,5          |    |                                      |
| Ratio de transferencia               |  | Sucio          |    | Limpio                               |
| <b>CONSTRUCCIÓN DE UNA CARCASA</b>   |  |                |    |                                      |
|                                      |  | Carcasa        |    | Tubos                                |
| Presión de diseño (bar)              |  |                |    |                                      |
| Temperatura de diseño (°C)           |  |                |    |                                      |
| Corrosión (mm)                       |  |                |    |                                      |
| Conexiones                           | In   |                |    |                                      |
| Tamaño                               | out  |                |    |                                      |
| Nominal                              | intermediate   |                |    |                                      |
| Tubo No.                             | OD   | Tks-Avg        |    | Largo                                |
| Tipo de tubo                         |  | Material       |    | Pattern                              |
| Carcasa                              | ID   | OD             |    | cobertura de carcasa                 |
|                                      |  |                |    | Pitch                                |

## A1. Comparación de precios entre termoplásticos

El mercado europeo de los plásticos rebasó en total la cifra de 53 millones de toneladas en 2014. En los próximos ocho años se espera que los ingresos aumenten una media de 2,9 % al año. Así pues, en 2022 se situarán entorno a los 104 000 millones de euros.

El informe [75] abarca todos los plásticos relevantes en productos estándar desde el polietileno, el polipropileno y el policloruro de vinilo (PVC) hasta los plásticos empleados en ingeniería, como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), los fluoropolímeros y los bioplásticos. No obstante, no se incluyen las fibras sintéticas, las pinturas y los adhesivos.

A su vez, el informe destaca que Alemania es el mayor productor de plásticos de Europa, con una cuota de mercado del 24 %. El segundo mayor productor de plásticos es Bélgica, seguida de Francia, Rusia, Holanda y España.

En 2014, los envases flexibles y rígidos y el sector de la construcción representaron las áreas de aplicación de plásticos más importantes. Estos abarcaron alrededor del 70 % de la demanda total de plásticos en Europa. Sin embargo, otros mercados de ventas han acumulado las cifras más altas de crecimiento, con más de un 2 % por año, como son las industrias del transporte y la electricidad y la electrónica.

Respecto a los envases de tipo rígido, el material más usado fue el PET, seguido del PP y el HDPE. En 2014 el sector de la construcción consumió más de 5,5 millones de toneladas de PVC. El HDPE fue el segundo material más empleado, seguido del poliestireno y el poliestireno expandido (EPS).

La producción de todas estas resinas depende del precio del petróleo, del precio de la poliolefina y de la demanda. Además, el déficit de propileno normalmente coincide con las paradas programadas de crackers y un aumento de la demanda.

A continuación, se muestra en la Figura A-1 la fluctuación del precio de los diferentes materiales durante el período 2012-15 precios del mes de diciembre.

**Tabla A- 30.** Comparación de precios de resinas.

|                                   | €/Tm.             | €/Tm.             | €/Tm.            | €/Tm.            |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
|                                   | <b>21-25 dic.</b> | <b>14-18 dic.</b> | <b>7-11 dic.</b> | <b>30-4 dic.</b> |
| <b>PEBD film</b>                  | 1.420-1.480       | 1.420-1.480       | 1.420-1.480      | 1.410-1.450      |
| <b>PEBD inyección</b>             | 1.430-1.480       | 1.430-1.480       | 1.430-1.480      | 1.420-1.450      |
| <b>PEBDL rotomoldeo</b>           | 1.360-1.420       | 1.360-1.420       | 1.360-1.420      | 1.350-1.390      |
| <b>PEBDL buteno</b>               | 1.430-1.480       | 1.430-1.480       | 1.430-1.480      | 1.430-1.480      |
| <b>PEBDL octeno</b>               | 1.520-1.560       | 1.520-1.560       | 1.520-1.560      | 1.500-1.560      |
| <b>PEAD film</b>                  | 1.470-1.540       | 1.470-1.540       | 1.470-1.540      | 1.470-1.540      |
| <b>PEAD soplado</b>               | 1.470-1.540       | 1.470-1.540       | 1.470-1.540      | 1.470-1.540      |
| <b>PEAD inyección</b>             | 1.480-1.560       | 1.480-1.560       | 1.480-1.560      | 1.480-1.560      |
| <b>PP homopolímero rafia</b>      | 1.100-1.190       | 1.100-1.190       | 1.100-1.190      | 1.100-1.190      |
| <b>PP homop., term. Extrusión</b> | 1.160-1.260       | 1.160-1.260       | 1.160-1.260      | 1.160-1.260      |
| <b>PP homopolímero inyección</b>  | 1.220-1.280       | 1.220-1.280       | 1.220-1.280      | 1.230-1.300      |
| <b>PP copolímero bloque</b>       | 1.240-1.320       | 1.240-1.320       | 1.240-1.320      | 1.240-1.320      |
| <b>PP copolímero random</b>       | 1.280-1.350       | 1.280-1.350       | 1.280-1.350      | 1.280-1.350      |
| <b>PS cristal (uso general)</b>   | 1.230-1.260       | 1.220-1.270       | 1.230-1.260      | 1.240-1.290      |
| <b>PS alto impacto</b>            | 1.320-1.350       | 1.310-1.360       | 1.320-1.350      | 1.330-1.380      |
| <b>PVC suspensión</b>             | 800-850           | 810-850           | 810-860          | 810-860          |
| <b>PET</b>                        | 980-1.060         | 990-1.060         | 990-1.060        | 990-1.060        |

## A2. Clasificación de plásticos/Identificación y nomenclatura

Los plásticos se clasifican mediante un sistema de símbolos desarrollado en 1988 por la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI). Con este sistema se puede identificar el contenido de resina de un recipiente o envase de plástico.

La codificación consiste en diferenciar los seis tipos de resinas más comunes llamados commodities, teniendo una séptima categoría para todos los otros tipos que no estén dentro de los códigos 1 al 6, llamados plásticos especiales y de ingeniería.

Las categorías son:

- i. Tereftalato de polietileno (PETE o PET)
- ii. Polietileno de alta densidad (HDPE)
- iii. Cloruro de polivinilo (PVC o vinilo)
- iv. Polietileno de baja densidad (LDPE)
- v. Polipropileno (PP)
- vi. Poliestireno (PS)
- vii. Otros, incluyendo materiales elaborados con más de una de las resinas anteriores.

| Símbolo  | Tipo de Plástico  | Propiedades   | Usos Comunes  |
|--|---|---|---|
| <br>PET   | PET PolietilenoTereftalato<br>(Polyethylene Terephthalate)          | Contacto alimentario, resistencia física, propiedades térmicas, propiedades barreras, ligereza y resistencia química.   | Bebidas, refrescos y agua, envases para alimentos (aderezos, mermeladas, jaleas, cremas, farmacéuticos, etc.)                                     |
| <br>HDPE  | HDPE Polietileno de alta densidad<br>(High Density Polyethylene)    | Poco flexible, resistente a químicos, opaco, fácil de pigmentar, fabricar y manejar. Se suaviza a los 75°C  | Algunas bolsas para supermercado, bolsas para congelar, envases para leche, helados, jugos, shampoo, químicos y detergentes, cubetas, tapas, etc. |
| <br>PVC   | PVC Policloruro de vinilo<br>(Plasticised Polyvinyl Chloride PCV-P) | Es duro, resistente, puede ser claro, puede ser utilizado con solventes, se suaviza a los 80°C. Flexible, claro, elástico, puede ser utilizado con solventes. | Envases para plomería, tuberías, "blister packs", envases en general, mangueras, suelas para zapatos, cables, correas para reloj.                 |
| <br>LDPE  | LDPE Polietileno de baja densidad<br>(Low density Polyethylene)     | Suave, flexible, translucido, se suaviza a los 70°C, se raya fácilmente.  | Película para empaque, bolsas para basura, envases para laboratorio.  |
| <br>PP    | PP Polipropileno<br>(Polypropylene)                                 | Difícil pero aún flexible, se suaviza a los 140°C, translucido, soporta solventes, versátil.  | Bolsas para frituras, popotes, equipo para jardinería, cajas para alimentos, cintas para empaçar, envases para uso veterinario y farmacéutico.    |
| <br>PS    | PS Poliestireno<br>(Polystyrene)                                    | Claro, rígido, opaco, se rompe con facilidad, se suaviza a los 95°C. Afectado por grasas y solventes.   | Cajas para discos compactos, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, envases cosméticos.   |
| <br>PS-E  | PS-E Poliestireno Expandido<br>(Expanded Polystyrene)               | Esponjoso, ligero, absorbe energía, mantiene temperaturas   | Tazas para bebida calientes, charolas de comida para llevar, envases de hielo seco, empaques para proteger mercancía frágil                       |
| <br>OTHER | OTHER Otros<br>(SAN, ABS, PC, Nylon )                               | Incluye de muchas otras resinas y materiales. Sus propiedades dependen de la combinación de los plásticos.  | Auto partes, hieleras, electrónicos, piezas para empaques.  |

Figura A- 5. Clasificación de los plásticos. [76]

### A3. Proceso con DMT

El proceso de producción de PET mediante DMT como materia prima es parecido al que se realiza con PTA, a excepción de que en las reacciones en lugar de tener agua como producto se tiene metanol.

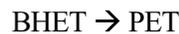
El proceso con DMT es más antiguo y menos utilizado en la actualidad ya que al obtener metanol como subproducto genera más cantidad de emisiones dañinas de compuestos orgánicos volátiles.

El proceso comienza con la reacción de transesterificación, catalizada normalmente con  $\text{TiO}_2$  y usando compuestos metálicos como aditivos:



**Figura A- 6.** Reacción de transesterificación de la producción con DMT.

Seguidamente, se realiza la reacción de policondensación con la cual se transforma el monómero en PET. Para que la reacción ocurra es indispensable la adición de DMI (dimetil isoftalato) y catalizadores como el antimonio.



**Figura A- 7.** Reacción de policondensación de la producción con DMT.

A continuación, se explica el proceso a través de las diversas etapas que lo conforman:

- **Etapas de mezcla:** los reactivos se llevan a un tanque en el cual se realiza una agitación del dimetil tereftalato (DMT) con el glicol a una temperatura de 150 °C.
- **Etapas de reacción 1:** la mezcla homogenizada se carga al primer reactor y se realiza la primera adición de los catalizadores, generándose el BHTE. Al finalizar el proceso se agrega el segundo catalizador,  $\text{TiO}_2$  y se realiza la eliminación del metanol, subproducto del proceso.
- **Etapas de reacción 2:** la mezcla se filtra y se pasa al segundo reactor, donde se efectúa la policondensación a alta temperatura y vacío.
- **Etapas de extrusión:** cuando se obtiene la viscosidad deseada se lleva el producto fundido a un proceso de extrusión, el cual se enfría y solidifica por contacto directo con agua.
- **Etapas de corte y granulación:** el polímero extruído se lleva a una cortadora de cuchillas donde se realiza el corte y la granulación del producto, con lo que se obtiene el producto en forma de pellets.
- **Etapas de poscondensación:** el producto resultante posee una baja viscosidad por lo que se hace necesario un proceso de poscondensación a fin de obtener la viscosidad relativa requerida.
- **Etapas de envasado y almacenamiento.**

### A4. Diagrama de flujo global del proceso de producción de PET

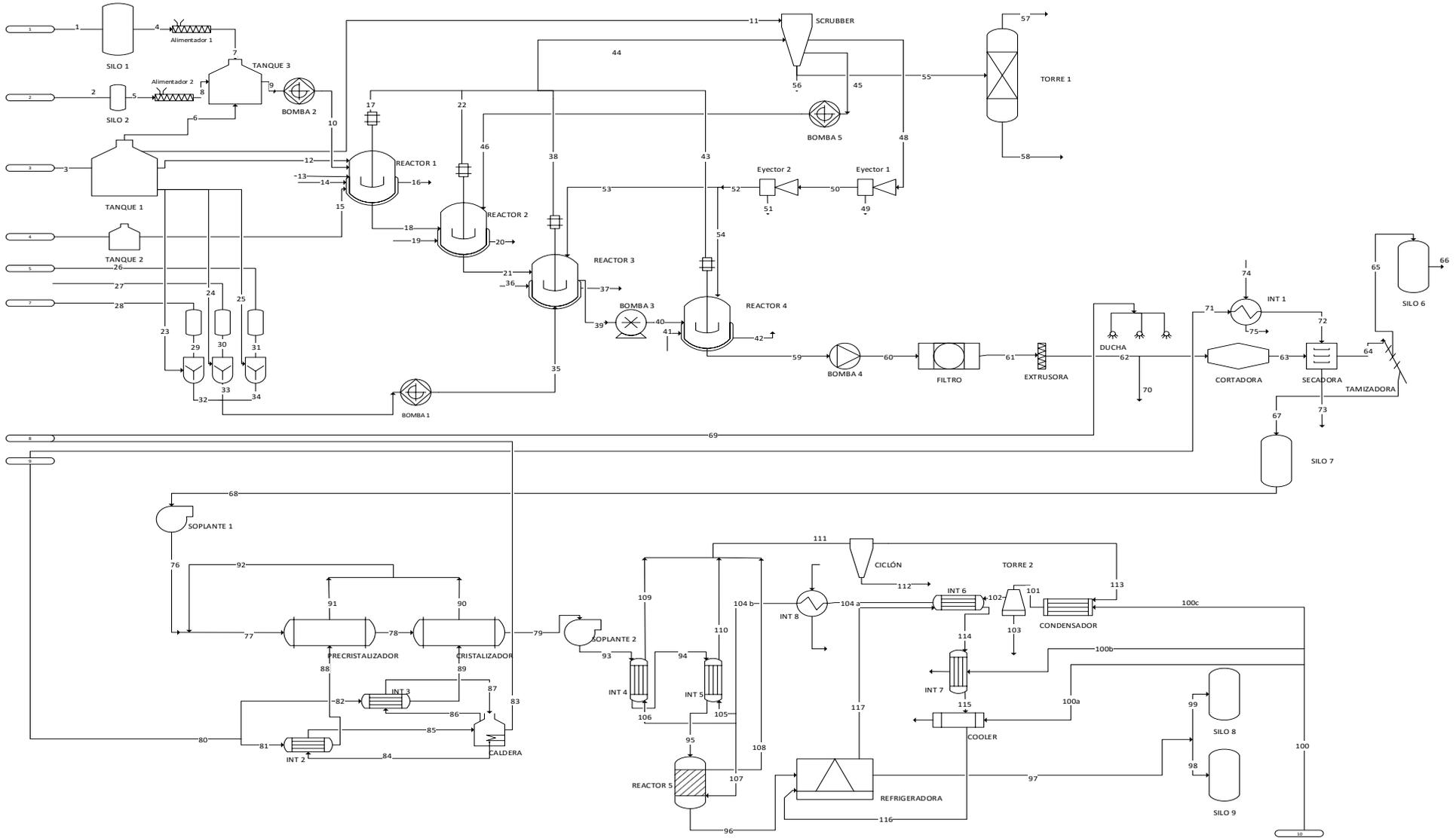


Figura A- 8. Diagrama de flujo completo del proceso.

# REFERENCIAS

---

- [1] QuimiNet (2005): Todo lo que quería saber del PET.  
<http://www.quiminet.com/articulos/todo-lo-que-queria-saber-del-pet-2806.htm> (5-04-16)
- [2] M. Sc. Silvio Ospina y Dr. C. Q. Juan Diego Sierra (2009): Adelantos en la caracterización térmica de polímeros. [http://www.plastico.com/temas/Adelantos-en-la-caracterizacion-termica-de-polimeros+3071677#prettyPhoto\[gallery2\]/0/](http://www.plastico.com/temas/Adelantos-en-la-caracterizacion-termica-de-polimeros+3071677#prettyPhoto[gallery2]/0/) (5-04-16)
- [3] Juan Carlos Cañadas Lorenzo, Universidad politécnica de Cataluña (2009): Estudio del efecto de la cristalización fría y del envejecimiento físico en las relajaciones de los polímeros mediante la técnica de corrientes estimuladas térmicamente.
- [4] KAYAVLON: PET Chips For Bottle Grade.  
[http://www.kayavlon.com/pet\\_bottle.htm](http://www.kayavlon.com/pet_bottle.htm) (5-04-16)
- [5] KAYAVLON: PET Chips For Textile Grade.  
[http://www.kayavlon.com/pet\\_textile.htm](http://www.kayavlon.com/pet_textile.htm) (5-04-16)
- [6] Markets and Markets: PET Resin Market by Application (Bottles, Films, Food Packaging, and Others), & PBT Resin Market by Application (Automotive, Electrical & Electronics, Consumer Appliances, and Others) - Global Trends & Forecasts to 2019.  
<http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/pet-pbt-resin.asp> (6-04-16)
- [7] Smithers Pira (2014): Demand for PET Packaging Material to reach \$60 billion.  
[http://www.smitherspira.com/news/2014/april/demand-for-pet-packaging-material-in-2019#ctl00\\_ctl00\\_cphBody\\_cphSideContent\\_pphSideContent\\_lt\\_wpzSideContentA\\_WebPartZone\\_WebPartZone\\_zone\\_FeaturedNewsletterWidget\\_ucFeaturedNewsletter\\_ucComponentStyleView\\_pnlFormCompressed](http://www.smitherspira.com/news/2014/april/demand-for-pet-packaging-material-in-2019#ctl00_ctl00_cphBody_cphSideContent_pphSideContent_lt_wpzSideContentA_WebPartZone_WebPartZone_zone_FeaturedNewsletterWidget_ucFeaturedNewsletter_ucComponentStyleView_pnlFormCompressed) (6-04-16)
- [8] Chemie.de (2014): Polyethylene Terephthalate (PET) Global Market to 2020 - Increasing Demand from Carbonated Soft Drinks, Food and Beer Packaging in BRIC Nations Driving Growth. <http://www.chemie.de/marktstudien/10877/polyethylene-terephthalate-pet-global-market-to-2020-increasing-demand-from-carbonated-soft-drinks-food-and-beer-packaging-in-bric-nations-driving-growth.html> (6-04-16)
- [9] IHS Markit (2015): Polyethylene Terephthalate (PET) Solid-State Resins.  
<https://www.ih.com/products/polyethylene-terephthalate-resins-chemical-economics-handbook.html> (6-04-16)
- [10] Merchant Research & Consulting ITD (2017): Polyethylene Terephthalate (PET): 2017 World Market Outlook and Forecast up to 2021. <https://mcgroup.co.uk/researches/polyethylene-terephthalate-pet> (15-01-17)
- [11] PLASTICKER (2015): Raw Materials & Prices.  
[http://plasticker.de/preise/preise\\_monat\\_single\\_en.php](http://plasticker.de/preise/preise_monat_single_en.php) (17-02-17)
- [12] Recycleinme.org (2014): PET Resin Price.  
<http://www.recycleinme.com/scrapresources/detailedprice.aspx?psect=2&cat=Resin+Prices&subcat=PET&from=09%2f9%2f2014&to=5%2f8%2f2016> (17-02-17)
- [13] ESI.UVA (2015): Usos y aplicaciones del PET.  
<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/pet/usosyaplicaciones.html> (17-02-17)

- [14] Brendan Daly (2014): European polyethylene terephthalate producers eye price recovery after dismal. <http://www.platts.com/es/news-feature/2014/petrochemicals/europe-2014-outlook/polyethylene-terephthalate> (17-02-17)
- [15] MundoPlast (2016): Indorama completa la compra de los negocios de PET de CEPSA en España. <http://www.mundoplast.com/noticia/indorama-completa-compra-los-negocios-pet-cepsa-espana/83746> (17-02-17)
- [16] ICIS (2016): Europe PET Report. <http://www.icis.com/contact/europe-pet-report/?cmpid=EMP|CHEM|CHIPT-2016-GLOBAL-petglobal&sfid=701w0000001Aq05> (22-4-2016).
- [17] TRANSPARENCY MARKET RESEARCH (2017): Global Polyethylene Terephthalate Market: Production Volume to Cross 34,077 Kilo Tons Mark by 2024. <http://www.transparencymarketresearch.com/pressrelease/pet-polyethylene-terephthalate-and-pet-packaging-market.htm> (14-3-2017)
- [18] Plastics News (2016): PET prices drop another 3 cents. <http://www.plasticsnews.com/article/20160211/NEWS/160219939/pet-prices-drop-another-3-cents> (2-11-2016)
- [19] PlasteMart (2016): Polyethylene terephthalate prices expected to continue firming in May. [http://www.plastemart.com/plastic-facts-information.asp?news\\_id=28829&news=Polyethylene-terephthalate-prices-expected-to-continue-firming-in-May](http://www.plastemart.com/plastic-facts-information.asp?news_id=28829&news=Polyethylene-terephthalate-prices-expected-to-continue-firming-in-May) (29-4-2016)
- [20] ICIS (2016): Indicative Chemical Prices A-Z. <http://www.icis.com/chemicals/channel-info-chemicals-a-z/> (22-4-16)
- [21] Plastics News (2016): Current Resin Pricing. <http://www.plasticsnews.com/resin/commodity-thermoplastics/current-pricing> (21-1-16)
- [22] Plastics News (2016): Historical Resin Pricing. <http://www.plasticsnews.com/resin/recycled-plastics/historical-pricing?grade=1340702|Vol2> (21-1-16)
- [23] Observatorio Plástico (2016): [http://www.observatorioplastico.com/detalle\\_noticia.php?no\\_id=535098&seccion=actualidad&id\\_categoria=8055](http://www.observatorioplastico.com/detalle_noticia.php?no_id=535098&seccion=actualidad&id_categoria=8055) (21-1-16)
- [24] Maria de Lourdes L. Moraes; Joel C. Rubim; Rene R. Realpozo; Marina F. M. Tavares (2004): Analysis of impurities in crude and highly-purified terephthalic acid. [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-50532004000300010](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-50532004000300010) (21-8-16)
- [25] Escuela de ingenieros industriales, Universidad de Valladolid (2013): Del Petróleo al PET. [http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/del\\_petroleo\\_al\\_pet.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/del_petroleo_al_pet.htm) (28-8-16)
- [26] Tecnología de los plásticos (2011): PET. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/05/pet.html> (28-8-16)

- [27] Textos científicos (2015): Producción de PET. <http://www.textoscientificos.com/polimeros/pet/produccion-pet> (28-8-16)
- [28] Curso de petroquímica en el campo de Gibraltar, Artenius San Roque (2008). Fabricación de PET. <http://actividades.uca.es/compromisoambiental/e06/archivo05> (28-8-16)
- [29] KenPlas (2015): PET Preform/Bottle Project. <http://www.kenplas.com/project/pet/ACETALDEHIDO> (18-9-16)
- [30] Gity Mir Mohamad Sadeghi (2011): From PET Waste to Novel Polyurethanes. [https://www.researchgate.net/figure/221929081\\_fig1\\_Fig-1-a-Chemical-Reaction-between-ethylene-glycol-and-terephthalic-acid-yields-BHET](https://www.researchgate.net/figure/221929081_fig1_Fig-1-a-Chemical-Reaction-between-ethylene-glycol-and-terephthalic-acid-yields-BHET) (18-9-16)
- [31] Ben Duh (2001): Reaction kinetics for solid-state polymerization of poly(ethylene terephthalate). <http://0-onlinelibrary.wiley.com.fama.us.es/doi/10.1002/app.1607/full> (18-9-16)
- [32] Reda Zein (2010): PET Production. [https://www.researchgate.net/publication/265112530\\_PET\\_Production](https://www.researchgate.net/publication/265112530_PET_Production) (18-9-16)
- [33] B. L. Deopura, R. Alagirusamy, M. Joshi and B. Gupta (2009): Polyesters and Polyamides. <https://books.google.es/books?id=VgmkAgAAQBAJ&pg=PA13&lpg=PA13&dq=porque+pta+y+no+dm&source=bl&ots=GBNXJOSrpb&sig=fhwB6iD3hC5iDrATPPV5I20Kstw&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiF0ZamuqPNAhWDVxQKHReSD7QQ6AEISDAG#v=onepage&q=porque%20pta%20y%20no%20dm&f=false> (18-9-16)
- [34] Guizhov Provincial Metals & Minerals I/E Co ltd (2016): Antimony trioxide/antimony metal- Jiefu Corporation export center. [http://es.antimony-gz.com/Antimony-trioxide-masterbatch-PE80-PE-90\\_p18.html](http://es.antimony-gz.com/Antimony-trioxide-masterbatch-PE80-PE-90_p18.html) (21-10-16)
- [35] Spanish Alibaba (2016): <https://spanish.alibaba.com/product-gs/germanium-for-polymerization-catalyst-99-999-zone-refined-germanium-ingot-60125040948.html> (21-10-16)
- [36] Mario A. Cobos-Peralta, Miguel A. Mata-Espinosa, Marcos Pérez-Sato, David Hernández-Sánchez, Ronald Ferrera (2014): Cerrato Ground Polyethylene Terephthalate bottles and its function as fiber substitute in diet for lambs. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v45n1/v45n1a4.pdf> (21-10-16)
- [37] <http://www.plastico.com/documenta/imagenes/110556/ILIP-lanzara-linea-de-empaques-para-comida-en-PET-reciclado-GR.jpg> (21-10-16)
- [38] <http://joshmarketing.com/plastiglass/wp-content/uploads/2013/02/Nueva-imagen1.jpg> (21-10-16)
- [39] [http://img.alibab.com/img/pb/075/430/283/283430075\\_438.jpg](http://img.alibab.com/img/pb/075/430/283/283430075_438.jpg) (21-10-16)
- [40] El PET- PET Secundaria 2 blogspot (2011). <http://petsecundaria2.blogspot.com.es/2011/12/el-pet.html> (21-10-16)

- [41] <http://www.dforceblog.com/wp-content/uploads/2009/08/pet-tela-300x300.jpg> (21-10-16)
- [42] [http://i00.i.aliimg.com/photo/v0/107861764/PP\\_PET\\_PVC\\_SYNTHETIC\\_BRISTLE.jpg](http://i00.i.aliimg.com/photo/v0/107861764/PP_PET_PVC_SYNTHETIC_BRISTLE.jpg) (21-10-16)
- [43] <http://www.plasticos-mecanizables.com/imatges/mecanizacion.jpg> (21-10-16)
- [44] Colors SA (2015): Pigmentos para plásticos. <http://www.gc-colors.es/pigmentos/pigmentos-para-plasticos.htm> (21-10-16)
- [45] UPV (2016): Aditivos para polímeros. [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15\\_8.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_8.html) (21-10-16)
- [46] Zahir Bashir, Munif Al-Munif, Mummaneni Venkateswara Rao, Suresh Padmanabhan (2011): Process for making Polyethylene Terephthalate. <https://www.google.com/patents/WO2011020619A1?cl=en&dq=polyethylene+terephthalate+process+technology&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiauary4Z3NAhUBvRoKHW-xAI0Q6AEIHDAA> (21-10-16)
- [47] Rocío González Falcón- David Velázquez Alonso. Tablas y Gráficos. Tecnología Energética. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS. UNIVERSIDAD DE SEVILLA.
- [48] Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Valladolid: Síntesis química del PET. [http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/sintesis\\_quimica.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/sintesis_quimica.htm) (21-10-16)
- [49] KenPlas (2009): Plastics projects- PET preform/ bottle Project. <http://www.kenplas.com/project/pet/> (5-11-16)
- [50] E. Torrella (2014): La combustión. <http://www.upv.es/entidades/DTRA/infoweb/dtra/info/U0675360.pdf> (5-11-16)
- [51] pfernandezdiez.es (2015): III. Calor y Trabajo. <http://files.pfernandezdiez.es/Termodinamica/PDFs/03Termod.pdf> (5-11-16)
- [52] DISEÑO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO- Universidad de Granada. [http://www.ugr.es/~aulavirtualpfc/q/descargas/documentos/Disenio\\_Tanques\\_Almacenamiento.pdf](http://www.ugr.es/~aulavirtualpfc/q/descargas/documentos/Disenio_Tanques_Almacenamiento.pdf) (5-11-16)
- [53] CEPESA Química (2008): Planta de Guadarranque. <http://actividades.uca.es/compromisoambiental/e06/e06> (5-11-16)
- [54] SHARPLEX (2007): Filtros de discos neumáticos. Fuente: <http://www.sharplex.com/spanish/pneumatic-disc-filters.htm> (5-11-16)
- [55] Asunt Machinery (2010): Automatic PP PE PET Plastic Rope Machine. <http://www.petextrusionmachine.com/china->

[automatic\\_pp\\_pe\\_pet\\_plastic\\_rope\\_machine\\_nylon\\_monofilament\\_1\\_3\\_strand\\_twist\\_rope-7566388.html](http://www.automatich.com/automatic_pp_pe_pet_plastic_rope_machine_nylon_monofilament_1_3_strand_twist_rope-7566388.html) (5-11-16)

[56] COPERION (2010): Underwater Pelletizer UG.  
<http://www.coperion.com/en/compounding-extrusion/machines-systems/pelletizers/ug-underwater-pelletizer/> (5-11-16)

[57] SANMETAL S.A (2010): Termoplástico.  
<http://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/arnite-pet/10> (5-11-16)

[58] WELEX (2014): PE PP PET Vibración del tamiz con automáticas de almacenamiento por aire. [http://es.made-in-china.com/co\\_longshi-machinery/product\\_PE-PP-Pet-Vibration-Sieve-with-Automatical-Storage-by-Air\\_eohyougsg.html](http://es.made-in-china.com/co_longshi-machinery/product_PE-PP-Pet-Vibration-Sieve-with-Automatical-Storage-by-Air_eohyougsg.html) (5-11-16)

[59] DP Chile. Equipos industriales (2014): Scrubber Ciclónico Multietapas Vortex Vertical 222. <http://www.dpchileindustrial.cl/catalogos/Scrubbers/index.html#/0> (5-11-16)

[60] AR (2013): Eyectores de vacío.  
<http://www.diprax.es/down/B305%20Eyectores%20de%20vacio.pdf> (15-11-16)

[61] SCHUTZ, Energy Systems. (2015). Depósitos y accesorios – Gasoil, Agua potable, Depuración de aguas residuales. (5-11-16)

[62] QuimiNet (2012): Índice industrial de productos, maquinaria y servicios.  
<http://www.quiminet.com/diccionario/1-24471.htm> (15-11-16)

[63] Instituto de diversificación y ahorro de la energía (IDAE). (2016). Informe de Precios energéticos: Combustibles y Carburantes. Madrid: Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

[64] Precio agua servicio.

[65] Precio nitrógeno.

[66] Shady Farah (2015): Molecular weight determination of Polyethylene Terephthalate.  
[https://www.researchgate.net/publication/281343994\\_Molecular\\_Weight\\_Determination\\_of\\_Polyethylene\\_Terephthalate](https://www.researchgate.net/publication/281343994_Molecular_Weight_Determination_of_Polyethylene_Terephthalate) (15-11-16)

[67] POLYMER PROCESSING (2014): Poly(ethylene terephthalate).  
<http://www.polymerprocessing.com/polymers/PET.html> (15-11-16)

[68] Meglobal (2015): Ethylene Glycol- Product Guide.  
[http://www.meglobal.biz/media/product\\_guides/MEGlobal\\_MEG.pdf](http://www.meglobal.biz/media/product_guides/MEGlobal_MEG.pdf) (15-11-16)

[69] Meglobal (2015): Diethylene Glycol- Product Guide.  
[http://www.meglobal.biz/media/product\\_guides/MEGlobal\\_DEG.pdf](http://www.meglobal.biz/media/product_guides/MEGlobal_DEG.pdf) (15-11-16)

[70] National Institute of Standards and technology (2015): Terephthalic Acid.  
<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C100210&Mask=2> (15-11-16)

[71] The Engineering Toolbox (2016): Water Vapor- Specific Heat.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-d\\_979.html](http://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-d_979.html) (15-11-16)

[72] INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO (2013): Fichas internacionales de seguridad química- Ácido tereftálico.  
<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/301a400/nspn0330.pdf> (15-11-16)

[73] ALFA AESAR (2015): Ácido Tereftálico- Ficha de datos de seguridad.  
<https://www.alfa.com/es/content/msds/Spanish/I04139.pdf> (15-11-16)

[74] INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO (2013): Ácido Isoftálico- Fichas internacionales de seguridad química.  
<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/401a500/nspn0500.pdf> (15-11-16)

[75] AIMPLAS- Instituto Tecnológico del Plástico (2015): El mercado europeo de los plásticos sigue creciendo. <http://www.aimplas.es/blog/el-mercado-europeo-de-los-plasticos-sigue-creciendo> (15-11-16)

[76] AITAS- Instituto tecnológico (2016): Código de los plásticos.  
<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/03/codigos-de-los-plasticos.html> (15-11-16)

# GLOSARIO

---

ISO: International Organization for Standardization

UNE: Una Norma Española

PET: Polietileno de tereftalato

CAGR: Tasa de crecimiento anual compuesta

UV: Ultravioleta

CSD: Refrescos carbonatados

IHS: Information Handling Services

PIB: Producto interior bruto

OCDE: Organización para el Crecimiento y Desarrollo Económicos

ICIS: Independent Chemical Information Service

PTA: Ácido tereftálico

EG: Etilenglicol

DMT: Dimetiltereftalato

MEG: Monoetilenglicol

DEG: Dietilenglicol

AA: Acetaldehído

IPA: Ácido isoftálico

BHET: Bis-hidroxietil tereftalato

LCI: Inventario del Ciclo de vida Local

HDPE: High Density PolyEthylene

ATH: Alúmina Tri-Hidratada

SSP: Solid State Polymerization

IPT: Invista Performance Technologies

MTR: Melt to Resin

ppm: partes por millón

GP: Grado de Polimerización

CV: Caballo de Vapor

NPSH: Net Positive Suction Head

ASTM: American Society for Testing Materials

IV: Viscosidad Intrínseca

T<sub>g</sub>: Temperatura de transición vítrea

T<sub>m</sub>: Temperatura de fusión

MDSC: Calorimetría Diferencial de Barrido Modulado

\$/mt FD NWE: Dólares por millón de tonelada entregado gratis en North West Europe (\$/million tonnes Free Delivered in North West Europe)

