



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

**Estudio de viabilidad para mejorar la eficiencia  
energética de una planta de reciclaje de  
neumáticos**

Autora

**Ainhoa Sancho Cubero**

Director/es

**Jesús Sergio Artal Sevil**  
**Eva Francés Pérez**

Universidad de Zaragoza / Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2016

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. AINHOA SANCHO CUBERO

con nº de DNI 76922536W en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) **Grado** . (Título del Trabajo)

## Estudio de viabilidad para mejorar la eficiencia energética de una planta de reciclaje de neumáticos

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 21 de abril de 2016

Ains Sanchez

Edo: AINHOA SANCHO CUBERO



# Estudio de viabilidad para mejorar la eficiencia energética de una planta de reciclaje de neumáticos

## RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado se ha basado en la integración de varias técnicas de optimización energética en una planta real que se dedica al tratamiento y reciclaje de neumáticos fuera de uso.

Se ha realizado un estudio de viabilidad de técnicas que mejoren la eficiencia de la planta. Se ha calculado proporcionar un ahorro energético y evitar el almacenamiento masivo de neumáticos, y por consiguiente reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, demostrando que la opción o las opciones elegidas han sido las técnicas más favorables medioambientalmente.

El desarrollo de este trabajo se ha basado en el estudio comparativo de 10 técnicas de optimización energética, valorando sus condiciones de operación, emisiones, costes..., así como determinar cuáles se ajustan mejor para realizar una mejora en el caso de una planta real de reciclaje de neumáticos.

Por último, de entre las diez técnicas estudiadas, se ha llegado a la conclusión que algunas de ellas mejoran la productividad de la planta de reciclaje de neumáticos, entre ellas:

- Compensación de la Potencia Reactiva: tras la instalación de un banco de condensadores se obtiene una compensación de la energía reactiva. Con esta tecnología se consigue un ahorro energético y un ahorro económico.
- Instalación iluminación LED: si se realiza el cambio de iluminación tradicional por iluminación LED se consigue un ahorro energético del 50%. Aunque esta sustitución supone una alta inversión económica inicial, se amortiza en un corto plazo de tiempo.
- Cogeneración: si se utilizan los neumáticos como combustibles en la cogeneración de residuos, se obtiene una gran cantidad de energía debido a su alto poder calorífico superior (PCS). De esta manera, la planta se puede beneficiar de la energía que se produce.
- Pirólisis: un proceso de transformación muy eficiente ya que entre el 85 y el 90% del material de entrada es transformado en otros productos con gran valor añadido, como son los aditivos para combustibles líquidos y el negro de carbón.



# INDICE

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUCCIÓN .....  | 6  |
| 2     | OBJETIVOS Y ALCANCE.....  | 10 |
| 3     | DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE NEUMÁTICOS ..... | 11 |
| 3.1   | PROCEDIMIENTOS E INSTALACIONES ELÉCTRICAS.....                    | 11 |
| 3.2   | GESTIÓN ANUAL DE RESIDUOS Y PRODUCTOS.....                        | 12 |
| 4     | TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA.....                          | 14 |
| 4.1   | OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA .....                                   | 14 |
| 4.1.1 | COMPENSACIÓN DE LA ENERGÍA REACTIVA.....                          | 14 |
| 4.1.2 | SUSTITUCIÓN DE ILUMINACIÓN TRADICIONAL POR LED.....               | 16 |
| 4.1.3 | AISLAMIENTO TÉRMICO.....  | 17 |
| 4.1.4 | INSTALACIÓN PLACAS SOLARES .....                                  | 17 |
| 4.2   | TRATAMIENTOS DEL NEUMÁTICO .....                                  | 18 |
| 4.2.1 | COGENERACIÓN .....  | 18 |
| 4.2.2 | RECAUCHUTADO .....  | 19 |
| 4.2.3 | TRATAMIENTO TERMOQUÍMICOS.....                                    | 20 |
| 4.2.4 | TECNOLOGÍAS DE REGENERACIÓN .....                                 | 24 |
| 4.2.5 | AISLAMIENTO TÉRMICO.....  | 24 |
| 4.3   | RESUMEN DE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA.....               | 25 |
| 5     | RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LAS TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN .....      | 27 |
| 5.1   | COMPENSACIÓN REACTIVA .....                                       | 27 |
| 5.2   | ILUMINACIÓN LED.....  | 30 |
| 5.3   | COGENERACIÓN DE RESIDUOS.....                                     | 32 |
| 5.4   | NEUMÁTICOS RECAUCHUTADOS .....                                    | 33 |
| 5.5   | PIRÓLISIS.....  | 36 |
| 5.6   | INSTALACIONES PLACAS FOTOVOLTAICAS.....                           | 37 |
| 6     | CONCLUSIONES .....  | 42 |
| 7     | DEFINICIONES.....   | 43 |
| 8     | BIBLIOGRAFÍA .....  | 44 |
| 9     | ANEXOS .....  | 46 |



## INDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Almacenamiento de los NFU .....   | 7  |
| Figura 2. Valorización material neumáticos .....  | 9  |
| Figura 3. Valorización energética neumáticos .....  | 9  |
| Figura 4. Esquema de una planta de reciclado de neumáticos fuera de uso (29).....                             | 11 |
| Figura 5. Fotografías de la planta visitada.....  | 11 |
| Figura 6. Gestión anual de residuos y productos en el año 2014 (8).....                                       | 13 |
| Figura 7. Datos obtenidos de las salidas de los residuos en el año 2014.....                                  | 13 |
| Figura 8. Triángulo de potencias .....  | 15 |
| Figura 9. Planta Pirólisis .....  | 21 |
| Figura 10. Consumo eléctrico de la planta de reciclaje en el año 2014.....                                    | 27 |
| Figura 11. Gráfica comparativa ahorro económico de productos LED .....  | 31 |
| Figura 12. Información técnica de un neumático .....  | 34 |
| Figura 13. Datos de planta de pirólisis para un flujo de 2 – 10 toneladas al día.....                         | 36 |
| Figura 14. Simulación instalaciones solares fotovoltaicas en la planta con el programa Calculationsolar ..... | 38 |
| Figura 15. Informe pre-dimensionado instalación fotovoltaica conectada a red.....                             | 39 |

## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Composición típica porcentual por componentes de un neumático fuera de uso (18) .....       | 6  |
| Tabla 2. Situación actual de la generación de NFU en España (10, 33).....                            | 8  |
| Tabla 3. Gestión anual de neumáticos fuera de uso en España en el año 2014 (10, 32).....             | 9  |
| Tabla 4. Gestión anual de residuos y productos de la planta visitada (8) .....                       | 12 |
| Tabla 5. Ejemplos iluminación tradicional vs LED.....  | 16 |
| Tabla 6. Poder calorífico superior (PCS) y uso de algunos combustibles.....                          | 18 |
| Tabla 7. Análisis de las cenizas de un neumático (13) .....  | 23 |
| Tabla 8. Tabla comparativa de las diferentes técnicas de optimización energética .....               | 25 |
| Tabla 9. Consumo eléctrico anual en la planta de reciclado de neumáticos (2014) .....                | 28 |
| Tabla 10. Amortización en Iluminación LED .....  | 31 |
| Tabla 11. Combustibles más utilizados (14) .....   | 32 |
| Tabla 12. Tabla resumen coste anual de combustibles .....  | 33 |
| Tabla 13. Resumen del ahorro energético en la producción de neumáticos de camión y turismo (32)..... | 34 |
| Tabla 14. Comparativa de neumáticos recauchutados y nuevos (15, 25).....                             | 34 |
| Tabla 15. Venta de los hidrocarburos más comunes en el mercado .....                                 | 37 |
| Tabla 16. Ahorros de energía y ahorros económicos tras la instalación de paneles solares.....        | 40 |
| Tabla 17. Amortización en placas fotovoltaicas .....   | 40 |



## 1 INTRODUCCIÓN

Un neumático es un elemento que permite desplazarse a un vehículo de forma suave. Se constituye principalmente de una cubierta de aire constituida de caucho. La cubierta soporta al vehículo y su carga. Su inventor fue el norteamericano Charles Goodyear quién descubrió, accidentalmente en 1880, el proceso de vulcanización que consiste en dar al caucho resistencia y solidez (27).

El neumático es una estructura tubular compleja en la que se utilizan hasta 200 compuestos químicos diferentes. Principalmente está formado por tres productos: caucho (natural y sintético), un encordado de acero y fibra textil. La combinación del caucho natural y del caucho sintético proporciona que los cauchos naturales den elasticidad y los cauchos sintéticos una estabilidad térmica. Además, el proceso de vulcanizado al cual se someten los neumáticos, es un entrelazamiento de cadenas de polímeros (compuestos químicos de alto peso molecular). Los principales polímeros son, el poliisopreno sintético, el polibutadieno y el más común que es el estierobutadieno. En este proceso el material pasa de ser termoplástico a ser un elastómero (5).

Como se observa en la Tabla 1, a parte de los productos más conocidos como son el caucho, el acero y los refuerzos textiles, se agregan otros materiales para mejorar las propiedades del neumático (27), tales como:

- **Suavizantes:** aumentan la trabajabilidad del caucho antes de la vulcanización, óxido de zinc y de magnesio (activadores), que son mezclados para reducir el tiempo de vulcanización de varias horas a pocos minutos.
- **Antioxidantes:** Proporcionan el alargamiento de la vida al caucho evitando que se degrade con la acción del oxígeno y del ozono.
- **Negro de humo:** Se obtiene por combustión incompleta de gases naturales, que entrega mayor resistencia y tenacidad a la tracción, a la torsión y al desgaste.

Tabla 1. Composición típica porcentual por componentes de un neumático fuera de uso (18)

| Componente                  | Turismos (%) | Vehículos pesados (%) | Función                         |
|-----------------------------|--------------|-----------------------|---------------------------------|
| Caucho y elastómeros        | 48,0         | 45,0                  | Estructural-Deformación         |
| Negro de humo               | 22,0         | 22,0                  | Mejora de propiedades físicas   |
| Refuerzos metálicos (Acero) | 15,0         | 25,0                  | Formación esqueleto estructural |
| Refuerzos textiles          | 5,0          | 0,0                   | Formación esqueleto estructural |
| Óxido de zinc               | 1,2          | 2,1                   | Catalizador                     |
| Azufre                      | 1,0          | 1,0                   | Agente vulcanizante             |
| Aditivos y otros            | 10,0         | 9,0                   |                                 |

Cada año alrededor de 1,5 millones de neumáticos son vendidos a lo largo del mundo, con lo que significa que muchos de ellos se convierten en neumáticos fuera de uso (NFU).

Los NFU son aquellos neumáticos que se han convertido en residuos, es decir, que su poseedor haya desecharlo o tenga la intención u obligación de desechar. Este tipo de neumáticos son residuos catalogados (Código LER 16.01.03) por la Orden MAM/304/2002 y el Reglamento (UE) Nº 1357/2014 de la comisión de 18 de diciembre de 2014, por la que se publican las



operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. Su gestión está regulada por la ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

Estos neumáticos usados se encuentran actualmente entre una de las fuentes de residuos más problemáticas para el medio ambiente, debido al gran volumen producido y su durabilidad.

Durante las últimas décadas, la Unión Europea creó unas leyes para reducir y regular el efecto negativo sobre el medio ambiente mediante la legislación europea sobre eliminación de residuos a vertedero (6, 28), como la Directiva 1999/31/CE, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos.

Dentro de España, también se ha desarrollado legislación específica como:

- Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso.
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero
- Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por el que se modifican los Anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre.

El ámbito de aplicación del Real Decreto 1619/2005 incluye todos los neumáticos puestos en el mercado nacional de reposición (21), salvo los siguientes:

- los neumáticos de bicicleta.
- los neumáticos cuyo diámetro exterior sea superior a 1.400 milímetros.



Figura 1. Almacenamiento de los NFU

En la Tabla 2 se observa la variación del número de neumáticos que son gestionados y que se trasladan a las distintas plantas de tratamiento situadas en las comunidades autónomas dentro del territorio español. En dicha tabla se resume las cantidades de toneladas de neumáticos gestionados en determinados años posteriores a la implantación del nuevo Real Decreto 1619/2005 (que prohíbe el depósito de neumáticos en vertedero). Dentro de esta gran cantidad de neumáticos, y tal como se observará a lo largo del trabajo, hay toneladas que quedan sin tratar y esto provoca un masivo almacenamiento que puede tener consecuencias medioambientales negativas, de ahí que se deben buscar nuevas alternativas (21).



Tabla 2. Situación actual de la generación de NFU en España (10, 33)

| NFU generados (t)          | 2007    | 2011    | 2013    |
|----------------------------|---------|---------|---------|
| Andalucía                  | 41.770  | 36.038  | 31.922  |
| Aragón                     | 11.318  | 9.896   | 8.549   |
| Canarias                   | 11.812  | 10.458  | 9.937   |
| Cantabria                  | 3.367   | 2.961   | 2.933   |
| Castilla – La Mancha       | 16.834  | 13.547  | 12.030  |
| Castilla y León            | 22.571  | 20.197  | 17.408  |
| Cataluña                   | 35.018  | 29.348  | 28.956  |
| Ceuta                      | 78      | 61      | 33      |
| Melilla                    | 315     | 172     | 290     |
| Comunidad de Madrid        | 27.775  | 23.345  | 21.157  |
| Comunidad Foral de Navarra | 4.446   | 4.141   | 4.041   |
| Comunidad Valenciana       | 26.245  | 21.687  | 20.745  |
| Extremadura                | 8.732   | 7.285   | 6.265   |
| Galicia                    | 22.104  | 18.548  | 16.873  |
| Islas Baleares             | 4.461   | 3.928   | 3.929   |
| La Rioja                   | 2.128   | 1.692   | 1.519   |
| País Vasco                 | 12.899  | 11.173  | 11.432  |
| Principado de Asturias     | 7.268   | 6.746   | 6.274   |
| Región de Murcia           | 9.728   | 7.849   | 6.979   |
| Total                      | 268.783 | 229.082 | 211.271 |

La recogida de estos residuos tiene como objetivo posibilitar el reciclaje de calidad de los materiales y componentes que los conforman, hecho que resulta óptimo al ahorro de energía, de emisiones y de materias primas (22), consiguiendo los siguientes beneficios:

- Producir nuevos productos, con materias primas procedentes de los neumáticos fuera de uso.
- Utilización en la industria y en las obras públicas del polvo de caucho para mezclas bituminosas de pavimentos de carreteras o el granulado de caucho para la fabricación de pavimentos resistentes al desgaste, etc.
- Evitar los daños ambientales asociados a su depósito en vertederos, práctica prohibida explícitamente en el RD 1619/2005 de vertido de residuos, fundamentalmente debido a la dificultad de ser compactados, ocupando un gran volumen en los vertederos, a que su forma permite anidar vectores biológicos (roedores, insectos, etc.) y a ser combustibles, con una gran tenacidad en el incendio lo que hace muy difícil la extinción.

Las mismas características que hacen que el residuo de un neumático fuera de uso sea un problema medioambiental, también hacen que sea uno de los residuos más reutilizados, ya que principalmente un neumático se separa en goma (60%), textil (20%) y acero (20%). Los materiales que se obtienen como resultado del reciclado del neumático tienen muchos beneficios como la flexibilidad, fuerza y que son buenos combustibles (27).

Tal como se ve en la Tabla 3, se comprueba las diferentes cantidades NFU que se gestionan en España. Más del 50% del material que se recibe se lleva a valorización del material que consiste en reutilizar o reciclar y las diferentes aplicaciones de los neumáticos que se explican en el

Anexo IV. En menor medida, los NFU se destinan para la valorización energética, siendo una técnica más beneficiosa para el medio ambiente.

Tabla 3. Gestión anual de neumáticos fuera de uso en España en el año 2014 (10, 33)

| Destino                             |                                   | Peso (t)  | %      |  |         |
|-------------------------------------|-----------------------------------|---|--------|--|---------|
| Valorización material               | Preparación para la reutilización | 23.464  | 13,4   |  |         |
|                                     | Reciclaje                         | Separación y granulación (t)                            | 58.282 |  |         |
|                                     |                                   | Obra civil (t)  | 908    |  |         |
| Valorización energética             |                                   | Reciclado del acero y SiO <sub>2</sub> (t)              | 21.539 |  |         |
| Combustible sólido alternativo (t)  |                                   | 44.880  |        |  |         |
| Generación de energía eléctrica (t) |                                   | 2.690   |        |  |         |
|                                     |                                   | TOTAL TONELADAS VALORIZADAS                             |        |  | 151.763 |
|                                     |                                   | TOTAL TONELADAS RECEPCIONADAS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO |        |  | 175.000 |
|                                     |                                   |   |        |  | 86,7    |
|                                     |                                   |   |        |  | 100     |

Dentro de las operaciones de tratamiento, la práctica habitual en España es la valorización material como se observa en la Figura 2 y en menor medida la valorización energética como en la Figura 3. El porcentaje más elevado dentro de la valorización material es con diferencia, el uso en la separación y granulación del neumático, ya que luego tiene mayor salida en el mercado. Dentro de la valorización energética se usa en un elevado porcentaje el neumático como combustible sólido alternativo, sobre todo en industrias cementeras, siendo esto un problema medioambiental debido a las emisiones de contaminantes a la atmósfera. En un menor porcentaje se observa el uso de los NFU como generación de energía eléctrica. A medida que la sociedad se vaya concienciando de los beneficios de la eficiencia energética, el porcentaje de generación de energía eléctrica irá en aumento (9, 32).

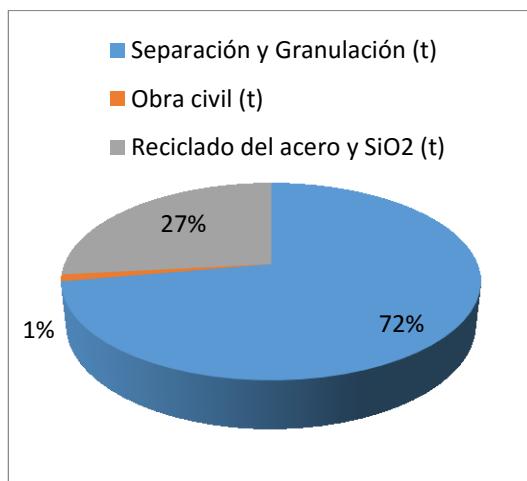


Figura 2. Valorización material neumáticos

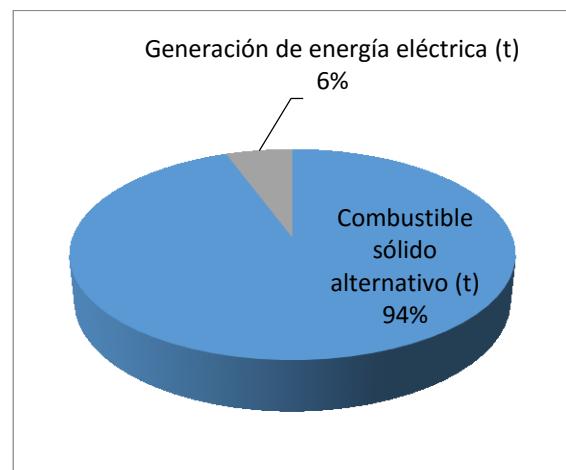


Figura 3. Valorización energética neumáticos



## 2 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de este trabajo es la realización de un estudio de viabilidad orientado a mejorar los problemas energéticos de una planta real de reciclaje de neumáticos. Para ello, se necesita realizar un análisis de todas las deficiencias de la planta existentes tras la visita a la planta de tratamiento de neumáticos usados.

Para la consecución de tal objetivo se realizarán los siguientes procedimientos: Primero, se investigará sobre diferentes técnicas para mejorar la eficiencia energética de la planta, entre ellas se encuentran la cogeneración, el recauchutado, la pirólisis, gasificación e incineración...

Posteriormente, se evaluarán los beneficios e inconvenientes que se podrían desarrollar al implementar estas tecnologías y sus costes de amortización y posibles problemas medioambientales que podrían surgir en un futuro utilizando estas técnicas en la planta real. Dentro de los beneficios, se tendrá en cuenta la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y la amortización en todos los casos que sea posible. Por último, se obtendrán conclusiones de toda la información estudiada y se verá si es viable.

### 3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE NEUMÁTICOS

La planta de reciclaje de neumáticos que se ha estudiado, consta de una superficie de 4.000 m<sup>2</sup>, con tecnología punta, donde se almacenan los neumáticos fuera de uso de la Comunidad Autónoma de Aragón. En su pleno rendimiento, puede reciclar la cantidad de 30.000 toneladas de neumáticos al día. (Más información acerca de la planta de reciclaje se puede consultar en el Anexo III).

#### 3.1 PROCEDIMIENTOS E INSTALACIONES ELÉCTRICAS

El objetivo de la planta es reducir el tamaño de los neumáticos, gracias a una combinación de máquinas, para obtener los diferentes materiales de salida y así obtener el máximo aprovechamiento del reciclado de estos neumáticos. En la Figura 4 se pueden observar las diferentes etapas del proceso del reciclado de un NFU:

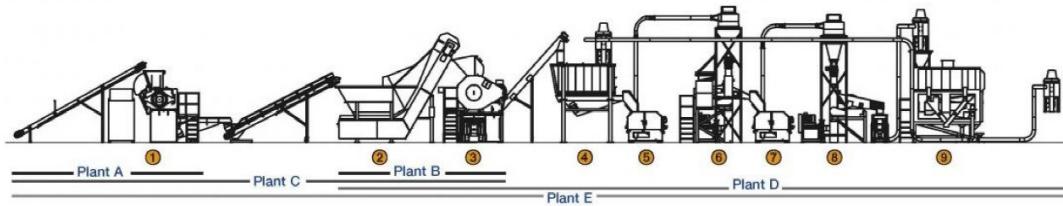


Figura 4. Esquema de una planta de reciclado de neumáticos fuera de uso (29)

Como se observa en la Figura 4, un neumático pasa por diferentes máquinas como el "Super Choper", "Rasper", granuladores finos, clasificadores, aspiradores, etc... (Ver Anexo III.2) hasta obtener los productos finales. Toda esta serie de máquinas consumen una gran cantidad de energía y emiten emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, por lo tanto se debe tener especial control y sólo se produce bajo pedido, teniendo un mínimo de stock. Esto por otro lado, implica que haya una elevada variabilidad en el consumo de energía eléctrica. En cambio la recepción de los neumáticos es más o menos continua, y este almacenamiento masivo es el que provoca la mayor contaminación a la atmósfera si no se tiene cuidado. Por ello se deben buscar soluciones y alternativas para la producción de estos productos (3).



Figura 5. Fotografías de la planta visitada



Como se puede observar en la Figura 5, la planta visitada posee una serie de máquinas para el proceso de reciclado de neumáticos que coincide bastante con el esquema de la Figura 4. Despues de procesar todo el neumático se obtienen como productos finales el caucho granulado, el "chip", el textil y el acero. (Ver Anexo III.2)

### 3.2 GESTIÓN ANUAL DE RESIDUOS Y PRODUCTOS

Durante el año 2014, la planta visitada ha gestionado las cantidades de residuos y productos que se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4. Gestión anual de residuos y productos de la planta visitada (8)

| TIPO DE GESTIÓN | RESIDUO/ PRODUCTO | CÓDIGO LER | MATERIAL                | TONELADAS |
|-----------------|-------------------|------------|-------------------------|-----------|
| ENTRADA         | RESIDUO           | 160103     | Neumáticos fuera de uso | 4.927,321 |
| SALIDA          | RESIDUO           | 191202     | Metales ferreos         | 1.573,720 |
| SALIDA          | RESIDUO           | 191208     | Textil                  | 1.767,010 |
| SALIDA          | PRODUCTO          | -          | Caucho                  | 3.419,680 |
| SALIDA          | PRODUCTO          | -          | Chip                    | 27,760    |
| ALMACENAMIENTO  | RESIDUO           | 160103     | Neumáticos fuera de uso | 6.930,179 |

Como se observa en la Tabla 4, la empresa recibe una gran cantidad de neumáticos fuera de uso anualmente (4.927,321 toneladas). Este tipo de residuos se almacenan en una solera impermeable, para evitar que se produzcan lixiviados al terreno. Tras esa recepción de neumáticos, se produce la transformación de esos neumáticos almacenados. Estos se convierten en residuos y en productos. Los productos obtenidos tras el procesado de los NFU durante el 2014 en la planta visitada fueron el caucho y el "chip", siendo el caucho el más solicitado, ya que como se puede ver en el Anexo IV, existen muchas aplicaciones para el mismo. Los residuos del año 2014 han sido fundamentalmente, los metales ferreos, que se almacenan en contenedores abiertos, y el textil que se va guardando en contenedores cerrados. Una vez que se llenan los contenedores, los residuos se trasladan al vertedero.

Como dato a destacar de la gestión anual de residuos y productos, es la cantidad de NFU almacenada en la campa exterior (6.930,179 toneladas). Desde que se implantó el Real Decreto 1619/2005, todos los neumáticos fuera de uso fueron trasladados a este tipo de plantas de reciclado y hasta que se van obteniendo salidas a los productos obtenidos del reciclaje de los neumáticos, éstos se quedan sin procesar.

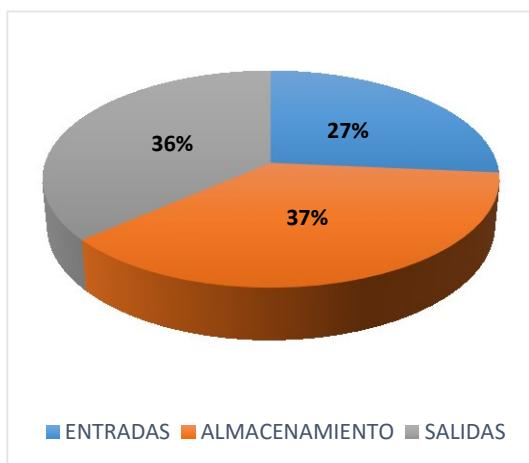


Figura 6. Gestión anual de residuos y productos en el año 2014 (8)

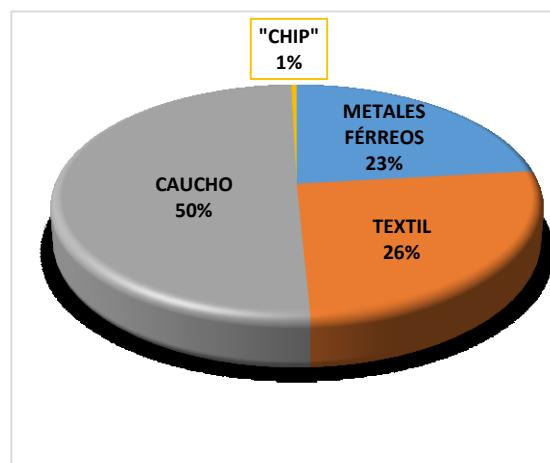


Figura 7. Datos obtenidos de las salidas de los residuos en el año 2014

Tal y como se ve en las Figuras 6 y 7 en el año 2014 aproximadamente se ha producido la misma cantidad que se ha almacenado. Comparando las gráficas obtenidas, el caucho es el producto que ha obtenido mayor salida (un 50%). Coincide con los datos generales de gestión anual de neumáticos fuera de uso en España que se ven en la Tabla 3.



## 4 TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA

El sector industrial, tradicionalmente, ha sido el mayor consumidor de energía en España (el sector del transporte es el mayor consumidor de energía en España con el 43%, segundo el sector industrial 27% año 2015). Es el responsable del 31% del consumo de energía de nuestro país. El principal objetivo de este sector es mejorar la eficiencia en los procesos de producción, lo que contribuye al aumento de la competitividad y a la reducción de emisiones contaminantes (14). A continuación se muestran las diferentes técnicas de optimización energética. Se clasifican en dos grupos, por un lado, las técnicas de optimización de la planta, y por otro lado, las técnicas del tratamiento de los neumáticos:

- Optimización de la planta:
  - Compensación de la energía reactiva
  - Sustitución de iluminación
  - Aislamiento térmico
  - Placas solares
- Tratamiento de los neumáticos:
  - Cogeneración de residuos
  - Recauchutado
  - Tratamientos termoquímicos (pirólisis, gasificación, incineración)
  - Tecnologías de regeneración

Los conceptos y definiciones de las variables utilizadas en las diferentes técnicas se muestran en el capítulo 7 de esta memoria.

### 4.1 OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA

#### 4.1.1 COMPENSACIÓN DE LA ENERGÍA REACTIVA

El factor de potencia es la relación que existe entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S) de una instalación y viene dado por las ecuaciones (1) y (2). Esta relación sirve para comprobar la capacidad de una carga para absorber energía activa.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tan \varphi)^2}} \quad (1)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2)$$

Los valores pueden oscilar entre 0 y 1.

Un factor de potencia igual a 1 tiene como resultado un consumo de energía reactiva cero (resistencia pura). Un factor de potencia menor que 1 tendrá como resultado un consumo de energía reactiva que aumentará a medida que alcance 0 (inductancia pura). Por lo tanto, cuanto más se aleje el factor de potencia de la unidad, mayor será el valor de capacidad a introducir sobre la instalación (mediante la incorporación de condensadores o banco de condensadores) con objeto de compensar la energía reactiva y mejorar el factor de potencia (1, 17).

La potencia reactiva (Q) es la consumida por los motores, transformadores y todos los dispositivos o aparatos eléctricos que poseen algún tipo de bobina para crear un campo electromagnético. Un sistema eléctrico consume tanto potencia activa como potencia reactiva, y la eficiencia de su trabajo depende del factor de potencia, como se ve en la Figura 8.

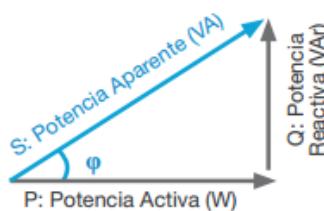


Figura 8. Triángulo de potencias

La potencia reactiva (Q) que se necesita para la compensación de la energía, se calcula a partir de la potencia activa (P) y el  $\cos \varphi$  que se mide en la instalación tal y como se ve en la ecuación (3). Mediante esta ecuación se puede conocer lo que consume la planta de energía reactiva.

$$Q = \sqrt{\left(\frac{P}{\cos \varphi}\right)^2 - P^2} \quad (3)$$

#### PROBLEMAS OCASIONADOS POR LA ENERGÍA REACTIVA

- Incremento de las pérdidas en los conductores
- Sobre carga de transformadores y generadores
- Aumento de la caída de tensión

#### BENEFICIOS DE COMPENSAR LA ENERGÍA REACTIVA

- Disminución de las pérdidas por efecto Joule
- Disminución de la caída de tensión en las líneas de distribución
- Aumento de la capacidad de la red eléctrica
- Ahorro económico

La compensación de la energía reactiva se realiza mediante la instalación en la red eléctrica de baterías de condensadores, los cuales generan cargas capacitivas que contrarrestan las pérdidas reactivas de la instalación.

Para la elección correcta del tipo de batería de condensadores más adecuado para la instalación, es necesario calcular la capacidad del condensador (C) mediante la ecuación (4),



que está relacionado con la potencia activa (P), la energía del condensador (U), la frecuencia (f) y la relación entre la tangente medida ( $\varphi_1$ ) y la tangente deseada ( $\varphi_2$ ).

$$C = \frac{P}{2\pi f U^2} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (4)$$

#### 4.1.2 SUSTITUCIÓN DE ILUMINACIÓN TRADICIONAL POR LED

Los tubos LED ("light-emitting diode") están indicados para todo tipo de lugares que necesitan una alta iluminación con un gran ahorro energético. Los productos LED son más caros que los productos tradicionales, pero al mismo tiempo son extremadamente eficientes energéticamente. (Ver Anexo V.2). Tal como se observa en la Tabla 5, se realiza una comparativa de características técnicas de la iluminación actual frente a las características técnicas iluminación LED (12, 24).

Tabla 5. Ejemplos iluminación tradicional vs LED

| Fluorescente tradicional   | Fluorescente Tubo LED   |                          |
|--|---|--------------------------|
| <br>BaleStocks | Potencia: 58 W  | Potencia: 9 W            |
|  | Lúmenes: 5.200  | Lúmenes: 1.800           |
|  | Tiempo de vida: 8.000 h   | Tiempo de vida: 30.000 h |
|  | Precio: 2,89 €  | Precio: 13,26 €          |
| Bombillas techo  | Campanas industriales LED   |                          |
| Potencia: 1000 W   |  | Potencia: 200 W          |
| Lúmenes: 58.500  |   | Lúmenes: 18.000          |
| Tiempo de vida: 12.000 h   |   | Tiempo de vida: 50.000 h |
| Precio: 152 €  |   | Precio: 300 €            |

Resalta en la Tabla 5, que la iluminación LED tiene una mayor intensidad luminosa por lumen, y que aunque resulten más caros inicialmente, se consume menos potencia y se alarga el tiempo de vida, por lo que a largo plazo salen más rentables.

$$\left[ 1 - \left( \frac{W \text{ iluminación LED}}{W \text{ iluminación tradicional}} \right) \right] \times 100 \quad (5)$$

En la ecuación (5) se muestra una fórmula donde se calcula el ahorro de potencia al instalar iluminación LED en vez de iluminación tradicional de tal manera que:

- W iluminación LED: potencia en W que consume una iluminación LED
- W iluminación tradicional: potencia en W que consume una iluminación tradicional



#### 4.1.3 AISLAMIENTO TÉRMICO

El aislamiento térmico es la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor por conducción. Este tipo de técnica es importante para garantizar la seguridad, reducir las pérdidas energéticas (calor-frío) y para aumentar la sostenibilidad de los procesos. Se expresa en  $\text{m}^2/\text{K W}$ . Poseen diferentes características:

- Optimizando el aislamiento se reducen los costes de instalación proporcionando el máximo ahorro de energía durante la vida útil de la instalación.
- Se reducen los impactos en el medioambiente optimizando la eficiencia de aislamiento para maximizar el potencial de ahorro de  $\text{CO}_2$
- El uso de materiales y sistemas innovadores de aislamiento, tales como los sistemas de baja emisividad, ayudan a proporcionar el máximo ahorro de energía potencial a la vez que mejoran la protección del medio ambiente en el equipo industrial.

Al realizar la visita a la planta de reciclaje de neumáticos para comprobar todas las deficiencias energéticas que existían, se comentó que a la planta ya se la había realizado un aislamiento térmico para ahorrar energía. Por lo tanto, esta técnica no se ha desarrollado más ni se han realizado cálculos de amortización.

Por otro lado, una de las aplicaciones de los neumáticos triturados es el aislamiento térmico. Actualmente, se está sustituyendo la fibra de vidrio que se utiliza en el aislamiento térmico por fibra de neumático triturado (véase apartado 4.2.5)

#### 4.1.4 INSTALACIÓN PLACAS SOLARES

Los paneles fotovoltaicos o también llamados placas solares tienen la función de convertir la energía solar en electricidad. A continuación se muestran las ventajas y desventajas de esta técnica.

Ventajas:

- Producción de energía limpia y renovable
- Mantenimiento mínimo
- Ahorro energía

Desventajas:

- Al principio son caros.
- Dependen del clima, sobre todo los paneles fotovoltaicos
- Para que los paneles solares funcionen con eficiencia necesitan cubrir bastante espacio.



## 4.2 TRATAMIENTOS DEL NEUMÁTICO

### 4.2.1 COGENERACIÓN

La cogeneración es una técnica de gran eficacia que consiste en la producción combinada de calor y electricidad a partir de la combustión en un grupo motor o turbina acoplados a un alternador. El calor generado puede tener diferentes usos (procesos industriales, calefacción, producción de frío mediante máquina de absorción, etc). Además del calor de los gases de escape (400 °C) existen otras fuentes de calor recuperables dentro del sistema de cogeneración: las camisas de los cilindros, el aceite de lubricación y los "intercoolers" a partir de los cuales se puede obtener agua caliente entre 40 y 90°C (14). (Ver Anexo V.3)

En cogeneración, se utiliza como materia prima, residuos, lo que puede ser favorable tanto económicamente como medioambientalmente, porque se transforma un residuo (que lleva asociado un coste de gestión) en energía (que implica un ingreso económico); y ambientalmente, porque es una vía de reducir la cantidad de residuos generados. Uno de los requisitos más importante es que los residuos puedan ser combustibles o transformarlos en un combustible. Por otro lado, deberán tener una demanda de energía térmica y energía eléctrica (2, 13). En la Tabla 6 se muestra un resumen de los combustibles alternativos más comunes y sus características.

Tabla 6. Poder calorífico superior (PCS) y uso de algunos combustibles.

| COMBUSTIBLE      | PCS<br>(MJ/kg) | RENDIMIENTO<br>(%) | USO                         |
|------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|
| Maderas          | 19,0           | 81,2               | Agua caliente               |
| Papel            | 19,0           | -                  | Calderas                    |
| Neumático        | 36,5           | 80,0               | Calderas                    |
| Caucho           | 42,0           | -                  | Calderas                    |
| Carbón de madera | 33,7           | 63,6               | Calderas                    |
| Gasóleo          | 43,1           | 100                | Calderas                    |
| Gas natural      | 44,0           | 100                | Agua caliente, calefacción  |
| Pellets          | 20,9           | 86,0               | Calefacción y agua caliente |
| Coque            | 33,7           | -                  | Generación de energía       |

Conociendo los diferentes rendimientos y PCS que aparecen en la Tabla 6, se puede calcular la cantidad necesaria de energía que se debe suministrar a la caldera. A partir de las ecuaciones (6) y (7), es posible determinar la cantidad de material combustible necesario para obtener la energía de producción de 100 kWh en una hora, como base de cálculo. En la ecuación (6) se muestra el rendimiento de la energía (n), y en la ecuación (7) se calcula la masa necesaria (m) en kg.

$$n = \frac{E_{util}}{E_{suministrada}} \quad (6)$$



$$m = \frac{E_{combustible}}{PCS} \quad (7)$$

De esta forma, los residuos de neumáticos una vez tratados, pueden convertirse también en energía eléctrica utilizable en la propia planta de reciclaje o conducirse a otras instalaciones distribuidoras. Los residuos se introducen en una caldera donde se realiza su combustión. El calor liberado provoca que el agua existente en la caldera se convierta en vapor de alta temperatura y alta presión que se conduce hasta una turbina. Al expandirse mueve la turbina y el generador acoplado a ella produce la electricidad (22), que tendrá que ser transformada posteriormente para su uso directo.

En cuanto a las emisiones, los motores de combustión generan mayor cantidad tanto de monóxido de carbono como de óxidos de nitrógeno.

Mediante un proceso de cogeneración se puede reducir la cantidad de residuo generado a la vez que se produce energía eléctrica. Esta energía puede ser utilizada para el autoabastecimiento, o por el contrario generar beneficios económicos mediante su venta a la red de distribución. Por otro lado, la energía térmica puede ser utilizada dentro del propio proceso para reducir, por ejemplo, la humedad del residuo final mediante técnicas de evaporación-concentración. Tanto por la reducción de la cantidad de residuo como por la producción de energía, el proceso de cogeneración es completamente viable económico y el periodo de retorno de la inversión suele ser relativamente corto.

#### 4.2.2 RECAUCHUTADO

El recauchutado del neumático usado es un proceso que permite reutilizar la carcasa del neumático, al colocar una nueva banda de rodadura, siempre que conserve las cualidades que garanticen su uso, como si fuera uno nuevo. En la actualidad se encuentran en marcha los reglamentos de homologación de recauchutado, que permiten certificar la calidad de las instalaciones y los procesos productivos de las unidades que fabrican los neumáticos recauchutados, con controles y ensayos sobre el producto similares a los exigidos para la homologación de los neumáticos nuevos.

El recauchutado permite alargar la vida de los neumáticos en una media de dos ciclos y disminuye la necesidad de fabricar nuevos. A través de la producción y uso de neumáticos recauchutados pueden alcanzarse ahorros de entre un 40 y un 70% en el consumo de energía y materias primas, así como en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Finalmente, también tiene una repercusión directa en la economía de los usuarios ya que el precio de un neumático recauchutado oscila entre 60 € y 90€ (12).

#### VENTAJAS:

- Reducción de los costes. Son más baratos que un neumático nuevo
- Los neumáticos para camiones utilizados de manera óptima pueden recauchutarse hasta dos o tres veces.
- El proceso de recauchutado aprovecha recursos y es menos contaminante que la producción de neumáticos nuevos.



- Los neumáticos recauchutados son más resistentes al “aquaplaning” que los neumáticos viejos.
- Es totalmente falso que estallen (el recauchutado es integral) o que esas ruedas no pueden ser equilibradas.

#### DESVENTAJAS:

- Aguantan menos kilómetros que los neumáticos nuevos
- Algunas propiedades del neumático (volumen, adherencia, precisión de la conducción) pueden ser peores que las de un neumático nuevo si el proceso de recauchutado no se realiza correctamente.
- Deben elegirse de marcas y fabricantes conocidos, que trabajen con buenos materiales y seleccionen cuidadosamente las cubiertas a utilizar (con inspecciones visuales y radiográficas)
- No deberían excederse de carga y velocidad
- Inversión inicial elevada en maquinaria especializada para recauchutar cumpliendo la normativa europea.
- En el caso de los neumáticos de turismos solo se pueden recauchutar una vez.

#### 4.2.3 TRATAMIENTO TERMOQUÍMICOS

Los tratamientos termoquímicos son aquellos que producen cambios en la estructura del material mediante reacciones químicas. Estos tratamientos requieren el uso de operaciones de calentamiento y enfriamiento, bajo condiciones controladas de temperatura. Las principales técnicas en este tipo de tratamientos son la pirólisis, gasificación e incineración. A continuación se desarrollan estas técnicas para el caso de estudio de la planta de neumáticos.

##### 4.2.3.1 PIRÓLISIS

La pirólisis es un proceso mediante el cual el material orgánico de los residuos reacciona de manera endotérmica. El material orgánico de los subproductos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmósfera en ausencia de oxígeno, y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua.

La pirólisis trabaja a presión atmosférica (o ligero vacío) y a una temperatura típica comprendida entre 400 y 600 °C. Se trata por lo tanto de condiciones suaves comparadas con las de los procesos de combustión que estarían cercanas a los 950°C o incluso 1000°C.

En este sistema se someten a los materiales de residuos de neumáticos a un calentamiento en un medio en el que no existe oxígeno. Las altas temperaturas y la ausencia de oxígeno tienen el efecto de destruir los enlaces químicos. Aparecen entonces cadenas de hidrocarburos. Es la forma de obtener, de nuevo, los compuestos originales del neumático, por lo que es el método que consigue la recuperación total de dichos componentes.

En el proceso de pirólisis de los neumáticos usados, se transforma el caucho granulado para obtener tres productos (gas, líquido y sólido) que poseen valor comercial (4):



- Fracción gaseosa: compuesta principalmente por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos ligeros (metano, etano, etileno, propano, propileno, butano, isobutano, etc.) Esta fracción presenta un elevado poder calorífico con un valor aproximado de 55 MJ/Nm<sup>3</sup>, suficiente para aportar la energía necesaria al proceso. De esta manera, el gas se podría usar en la propia planta.
- Fracción líquida: Se trata de una mezcla de hidrocarburos. Es de naturaleza principalmente nafténica y aromática. Este producto posee un punto de ebullición que lo sitúa como una fracción compuesta aproximadamente por un 70% de gasoil y un 30% de gasolina, mostrando unas propiedades intermedias entre ambos productos. Posee un poder calorífico entre 40 MJ/kg y 42 MJ/kg, por lo que podría ser utilizado como combustible en calderas.
- Fracción sólida carbonosa o negro de carbón pirolítico: se trata de la materia orgánica no transformada en productos líquidos y gaseosos, junto a los componentes inorgánicos que se añaden al caucho, fundamentalmente óxidos de silicio y de zinc. En esta fracción se concentra además el negro de carbón añadido previamente en la producción del caucho.

A partir de esta tecnología se obtienen tres posibles fuentes de ingresos:

- Las ventas de energía.
- La venta de otros productos.
- Descuentos en las facturas eléctricas.

Esta planta no sólo será capaz de absorber gran parte del caucho procedente de neumáticos usados que habitualmente se utiliza en la producción de granulado y polvo de caucho, sino que también podrá procesar aquel material que, sin sus características fisicoquímicas, ya no es útil en procesos de valorización material debido a su cristalización y pérdida de propiedades. (Ver Anexo V.5.1)



Figura 9. Planta Pirólisis



### Ventajas:

- Se genera una fracción líquida fácil de manejar, transportar y almacenar.
- Reducción de emisiones a la atmósfera al ser un proceso cerrado.
- Admite como combustible material residual de otros procesos
- No genera gases contaminantes como óxidos de nitrógeno y azufre, los que se producen en la combustión
- Todos los productos o subproductos generados pueden ser reutilizados.
- El proceso es autosuficiente con respecto a la energía.

### Desventajas:

- Requiere alta inversión para la instalación
- La alimentación requiere pretratamiento para que se introduzca material homogéneo y con humedad adecuada que no afecte al rendimiento
- El residuo carbonoso ("char") tiene PCI bajo
- Operaciones de mantenimiento para las cenizas
- Costes altos hornos pirolíticos

#### 4.2.3.2 GASIFICACIÓN

La gasificación es un proceso termoquímico de descomposición de la materia orgánica en un ambiente caracterizado por un déficit de aire respecto al estequiométrico necesario para realizar la combustión completa de la misma. Es un proceso que trabaja a una temperatura aproximada de 600°C donde el combustible sólido reacciona con un agente gasificante (aire, oxígeno o vapor de agua). Este proceso separa los diferentes componentes de los NFU como el negro de humo, acero y aceites. Además durante el tratamiento se libera una importante masa de gas, útil para la alimentación de los generadores de energía eléctrica (31).

En el tratamiento de NFU mediante gasificación se obtienen 2 fases:

- Una fase sólida:
  - Mezcla de negro de carbono (25% en peso del total de NFU) y acero (12% en peso del total de NFU) en aprox. Un 37% en peso del total de los productos del proceso.
  - Los dos componentes de la fase sólida se separan fácilmente con un tropel rotatorio de tamizado.
- Una fase gaseosa en un 63%
  - El gas generado de la fase gaseosa, sale de los gasógenos a una temperatura superior a 350°C y contiene 2 fases separables.
    - Fase gaseosa no condensable: formada por una amplia gama de gases de gasificación (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, hidrocarburos tipo C1, C2, C3, C4,...). Representa, de media, un 38% en peso del total de NFU tratados en el proceso, empleados como valorización energética en motores de gas adaptados al respecto.
    - Fase gaseosa condensable: constituida por todo el espectro de alquitranes, aceites medianos y ligeros, etc. Constituye un 25% del



peso total de los NFU tratados. Los aceites condensados se pueden valorizar energéticamente como sustitutivo de un combustible ligero o emplear en aplicaciones industriales específicas.

#### 4.2.3.3 INCINERACIÓN

Proceso por el que se produce la combustión de los materiales orgánicos de los neumáticos a altas temperaturas en hornos con materiales refractarios de alta calidad.

Desde el punto de vista positivo, los neumáticos desechados se pueden vender como combustible en hornos cementeros (7, 16), ya que la producción de óxidos de nitrógeno y dióxidos de azufre es menor en relación a los carbonos que se utilizan normalmente en la fabricación del cemento. Se han realizado diferentes estudios que demuestran que no existen complicaciones operacionales adicionales a las condiciones de trabajo en el proceso de incineración, siempre y cuando se vayan controlando las emisiones producidas por la incineración de este tipo de residuos de tal manera que cumpla la normativa de emisiones. Además, genera calor que puede ser usado como energía, ya que se trata de un proceso exotérmico.

Desde el punto de vista negativo, es un proceso costoso y además presenta el inconveniente de la diferente velocidad de combustión de los diferentes componentes y la necesidad de depuración de los gases por lo que no resulta fácil de controlar.

Con este método, los productos contaminantes que se producen en la combustión son perjudiciales para la salud humana, entre ellos el monóxido de carbono, xileno, hollín, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, óxidos de zinc, benceno, fenoles, dióxido de azufre, óxidos de plomo, tolueno. Además el hollín contiene cantidades importantes de hidrocarburos aromáticos poli cíclicos, altamente cancerígenos (6). En la Tabla 7, se muestra un análisis de las cenizas tras la incineración de un neumático.

Tabla 7. Análisis de las cenizas de un neumático (13)

| COMPUESTO                                       | %     |
|---|-------|
| Dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ )           | 22,00 |
| Dióxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) | 9,09  |
| Óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )     | 1,45  |
| Óxido de calcio ( $\text{CaO}$ )                | 10,61 |
| Dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ )           | 2,57  |
| Óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ )              | 1,35  |
| Óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ )        | 1,10  |
| Óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ )       | 0,92  |
| Óxido de azufre VI ( $\text{SO}_3$ )            | 15,68 |
| Óxido de fósforo V ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )   | 1,03  |
| Óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ )                  | 34,50 |



#### 4.2.4 TECNOLOGÍAS DE REGENERACIÓN

Esta técnica se basa en la desvulcanización, una ruptura selectiva de los enlaces químicos entrecruzados del azufre en el caucho vulcanizado, de forma que se produce la despolimerización de la cadena principal, la ruptura de los enlaces químicos entrecruzados de carbono, y por lo tanto, las prestaciones mecánicas del caucho disminuyen comparadas con las prestaciones iniciales. En este proceso, el caucho pasa de ser un material termoplástico a ser un elastómero. El negro de humo, formado por partículas muy pequeñas de carbono, aumenta la tenacidad y la resistencia a la tracción, a la torsión y al desgaste (19). Dentro de estas tecnologías de regeneración se encuentran la desvulcanización, recuperación del caucho, etc. Este tipo de procesos se desestima estudiarlo en profundidad.

#### 4.2.5 AISLAMIENTO TÉRMICO

Los NFU pueden ser valorizados como materia prima para elaborar elementos basados en matriz de cemento. Se puede considerar que los neumáticos troceados presentan una capacidad de aislamiento térmico 8 veces superior a la de un suelo. La utilización de rellenos de NFU en terraplenes de carreteras proporciona una protección eficaz frente a la penetración de la helada en el suelo subyacente. El problema de la pérdida de capacidad portante de los suelos durante el deshielo primaveral es un factor primordial de diseño de carreteras de zonas frías (3, 5, 11).

La parte más atractiva de este producto es su esencia sostenible, debido a que se obtiene de forma natural después del proceso de trituración del neumático. Además, mantiene la temperatura constante en interior de una edificación, lo que reduce hasta en un 50% el consumo energético que generan sistemas de ventilación artificial. Por ejemplo, un muro de un metro de largo por un metro de ancho requeriría 10 kilos de esta fibra, lo que equivale a 50 neumáticos fuera de uso (5).

Este tipo de material en aplicaciones no estructurales presenta beneficios tanto medioambientales como económicos. Al tratarse de un residuo, se obtiene un subproducto con valor añadido y puede proporcionar un ahorro energético debido a su baja conductividad térmica cuando es empleado en diversas tipologías constructivas como aislante térmico (11).

Existen diferentes aplicaciones de los NFU como aislante térmico, como por ejemplo:

- Aislantes para viviendas
- Componente del cemento Portland



#### 4.3 RESUMEN DE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA

Tabla 8. Tabla comparativa de las diferentes técnicas de optimización energética

|                           | TECNOLOGIA                                  | CARACTERÍSTICAS  | VENTAJAS   | DESVENTAJAS   |
|---------------------------|---|--|--|---|
| Optimización de la planta | Compensación reactiva<br>(Ver Anexo V.1)    | Optimiza el factor de potencia de una instalación eléctrica. Produce una proporción variable de la energía reactiva que consume.   | Ahorro energético y económico.<br>Mejora de la potencia en sus instalaciones.<br>Disminuye las pérdidas de energía   | Inversión en la instalación de los condensadores  |
|                           | Instalación LED<br>(Ver Anexo V.2)          | Se trata de un dispositivo sólido, semiconductor y que emite una radiación óptica cuando lo excita una corriente eléctrica. Es decir, se consigue iluminación al aplicar tensión y mover los electrones dentro del material semiconductor. | Ahorro entre un 20 % y un 30 % de energía respecto a los equipos convencionales.<br>No necesita mantenimiento.<br>No contaminan el medio ambiente.               | El coste de los productos LED   |
|                           | Aislamiento térmico                         | Capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor por conducción.  | Garantizar seguridad, reducir pérdidas energéticas.  | Se liberan productos químicos nocivos en el aire.   |
|                           | Placas Solares                              | Convertir la energía solar en electricidad   | Energía limpia y renovable   | Dependen del clima, inversión inicial   |
| Tratamiento neumáticos    | Cogeneración de residuos<br>(Ver Anexo V.3) | Producción simultánea de electricidad y energía térmica a partir de la energía primaria contenida en un combustible  | Ahorro energía primaria, lo cual conlleva un menor impacto ambiental.<br>Posible reducción en los costes energéticos entre el 20 y 30% de la factura energética. | Alta inversión en los equipos.<br>Método poco preciso.  |
|                           | Recauchutado<br>(Ver Anexo V.4)             | Reconstrucción de la carcasa del neumático y recuperación del neumático.   | Reducción de costes<br>Menos contaminante que la producción de neumáticos nuevos<br>Resistencia al "aquaplaning" que los neumáticos viejos.                      | Menos kilómetros que los neumáticos nuevos.<br>Algunas propiedades pueden ser peores (volumen, adherencia,...)<br>No deberían excederse de carga y velocidad. |



| TECNOLOGIA                             |                             | CARACTERÍSTICAS  | VENTAJAS  | DESVENTAJAS  |
|--|-----------------------------|--|---|--|
| Procesos termoquímicos (Ver Anexo V.5) | Pirólisis                   | Calentamiento del granulado de NFU a temperatura moderada en ausencia de oxígeno   | Descomposición de los componentes del neumático. Gases con elevado poder calorífico. Negro de carbono para fabricación de nuevos elementos. Negro pirolítico para coloración y absorbente luz UV. | Problemática con la aplicación de los aceites condensables obtenidos. Características de los productos depende de las condiciones del proceso. Importante un ajuste de los parámetros. |
|  | Gasificación                | Descomposición de la materia orgánica en un ambiente caracterizado por un déficit de aire para realizar la combustión.               | Destrucción limpia de residuos peligrosos<br>Producción de escoria metálica limpia. No tiene emisiones tóxicas  | Inversión muy costosa al principio<br>Necesita mantenimiento ocasional   |
|  | Incineración                | Combustión de los materiales orgánicos de los neumáticos a altas temperaturas en hornos con materiales refractarios de alta calidad. | Utilizar NFU en vez de otro tipo de combustibles resulta ser muy ventajosa para el medio ambiente.  | Necesidad de incineradoras apropiadas. Una quema insuficiente del material de desecho produce hollín, que en general requiere una mayor combustión y temperatura de llama elevada.     |
|  | Tecnologías de regeneración | Recuperación de caucho vulcanizado.  | Reutilización de caucho de los NFU para fabricar otros elementos.   | Caucho obtenido con propiedades físicas inferiores al original.  |
|  | Aislamiento térmico         | Proceso de valorización de los NFU como materia prima para elaborar otros elementos.   | Protección eficaz del material ante bajas temperaturas.<br>Baja conductividad térmica.  | Se utilizan pequeños porcentajes de aditivo de NFU.  |

## 5 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LAS TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN

### 5.1 COMPENSACIÓN REACTIVA

La planta tiene una potencia instalada de 1,8 MW para poder tener la posibilidad de obtener un alto rendimiento productivo en las épocas de elevada demanda de productos.

En la Figura 10 se observa una gráfica de consumo eléctrico de la planta durante el año 2014, donde se aprecia que la energía consumida durante dicho año data de un total de 2.500 MWh. Se notan unos picos irregulares en el consumo eléctrico de la planta, ya que la planta produce bajo pedido. Esta es una de las razones por las cuales se buscan alternativas para reducir el almacenamiento de neumáticos que se encuentran en la campa y buscar alternativas que den salida a estos residuos y además se note una mejora medioambiental y energética.

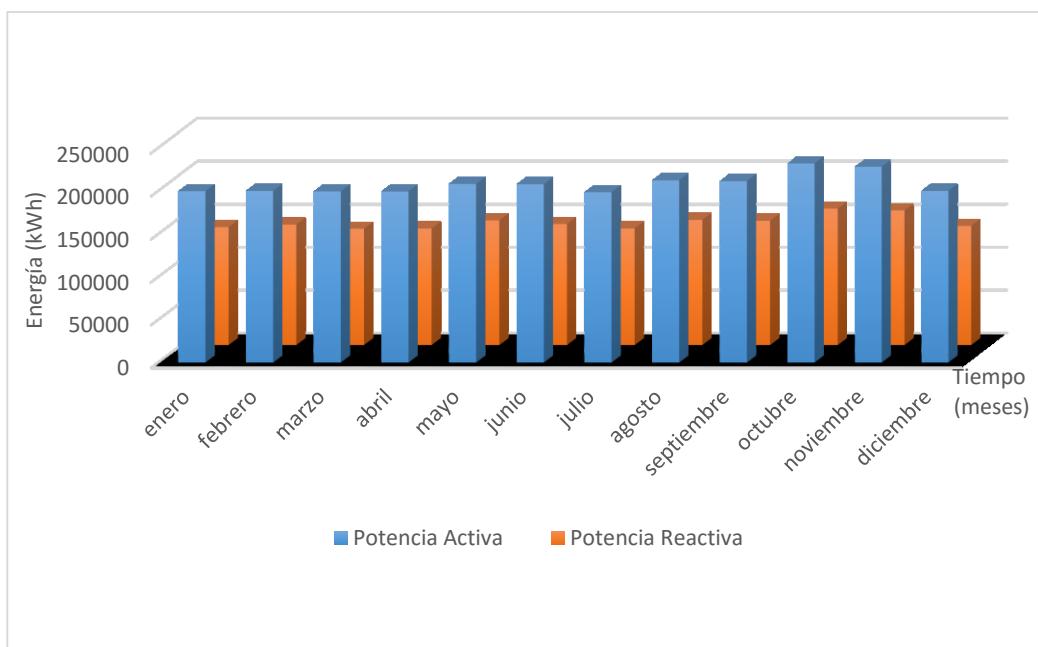


Figura 10. Consumo eléctrico de la planta de reciclaje en el año 2014

En la Tabla 9 se muestran las condiciones de suministro y consumo energético de la planta durante el mismo periodo de tiempo. A partir de los datos facilitados de la empresa (energía activa y energía reactiva) se calculan el factor de potencia mediante la ecuación (2); y los valores medios ponderados.



Tabla 9. Consumo eléctrico anual en la planta de reciclado de neumáticos (2014)

| PERIODO DE CONSUMO<br>2014 | ENERGÍA<br>ACTIVA<br>(kWh) | ENERGÍA<br>REACTIVA<br>(kVArh) | FACTOR DE<br>POTENCIA<br>(cos φ) |
|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| ENERO                      | 199.918                    | 137.777                        | 0,8234                           |
| FEBRERO                    | 200.228                    | 140.644                        | 0,8183                           |
| MARZO                      | 199.639                    | 135.872                        | 0,8267                           |
| ABRIL                      | 199.601                    | 136.054                        | 0,8263                           |
| MAYO                       | 208.385                    | 145.507                        | 0,8199                           |
| JUNIO                      | 207.963                    | 141.321                        | 0,8271                           |
| JULIO                      | 198.661                    | 136.188                        | 0,8248                           |
| AGOSTO                     | 212.457                    | 146.143                        | 0,8239                           |
| SEPTIEMBRE                 | 211.559                    | 145.195                        | 0,8245                           |
| OCTUBRE                    | 232.146                    | 159.203                        | 0,8247                           |
| NOVIEMBRE                  | 228.370                    | 157.207                        | 0,8237                           |
| DICIEMBRE                  | 200.309                    | 139.088                        | 0,8214                           |
| MEDIA PONDERADA            | 208.836                    | 143.740                        | 0,8237                           |
| TOTAL                      | 2.499.236                  | 1.720.200                      |                                  |

Observando los datos obtenidos de la Tabla 9, se obtiene de media ponderada en el factor de potencia de 0,8237. El valor ideal de factor de potencia es de 1.

- Un factor de potencia ( $\cos \phi$ ) bajo comparado con otro alto, origina, para una misma potencia, una mayor demanda de corriente, lo que implica la necesidad de utilizar cables de mayor sección.
- La potencia aparente es tanto mayor cuanto más bajo sea el factor de potencia, lo que origina una mayor corriente y por lo tanto unas mayores pérdidas, por efecto Joule ( $Ri^2$ ), en las líneas de transporte y distribución de energía eléctrica.

Ambas conclusiones llevan a un mayor coste de la instalación. Esto no resulta práctico para las compañías eléctricas, puesto que el gasto es mayor para un factor de potencia bajo. Es por ello que las compañías suministradoras penalizan la existencia de un factor de potencia bajo, obligando a su mejora o imponiendo costes adicionales. Por ello, en este caso es necesaria la instalación de un banco de condensadores para aumentar el factor de potencia, asimismo, reducir el consumo de energía reactiva y reducir el coste extra en las facturas eléctricas.

La cantidad de energía reactiva se calcula con la ecuación (4) y conociendo que el valor medio ponderado del factor de potencia es de 0,8237 (véase Tabla 9).

$$Q = \sqrt{\left(\frac{208.836}{0,8237}\right)^2 - 208.836^2} = 143.760 \frac{kVAr}{mes}$$



Cuando el factor de potencia se encuentra por debajo del valor 0,95 según la Orden IET/221/2013 (BOE 16/02/2013), se tiene que pagar una penalización por tener valores elevados de energía reactiva en cada factura eléctrica. Esto supone un gasto extra mensual de:

$$\text{Coste extra: } 143.760 \frac{kVArh}{mes} \times 0,041554 \frac{\text{€}}{kVArh} = 5.974 \frac{\text{€}}{mes}$$

Con la instalación de un banco de condensadores, se aumentaría el factor de potencia a 0,95. El consumo de energía reactiva sería:

$$Q = \sqrt{\left(\frac{208.836}{0,95}\right)^2 - 208.836^2} = 68.641 \frac{kVar}{mes}$$

$$\text{Ahorro energía mensual: } \left(1 - \frac{68.641}{143.760}\right) \times 100 = 47,75 \%$$

Con este resultado se observa un ahorro de energía cercano al 48 %. Para conseguir estas mejoras, se necesita aumentar el  $\cos \varphi$  de 0,82 a 0,95. Esto se puede conseguir mediante la instalación de un banco de condensadores, cuya capacidad se calcula mediante la ecuación (4), siendo  $P$ , la potencia instalada en la planta,  $f$ , la frecuencia del condensador (50 Hz en España) y  $U$  la tensión que soporta el condensador (380 V, con conexión en estrella) y los valores de  $\tan \varphi_1$  y  $\tan \varphi_2$ , se obtienen a partir del  $\cos \varphi$  obtenido (0,82) y el  $\cos \varphi$  deseado (0,95) respectivamente.

$$C = \frac{652,61 \text{ kWh}}{2 \times \pi \times 50 \text{ Hz} \times 230^2 \text{ V}^2} (0,6882 - 0,3287) = 14,11 \mu F$$

El sistema de distribución en la nave consta de una red trifásica (230V/380V) con neutro accesible. Las oficinas e iluminación del recinto requieren una tensión de 230 V (tensión de fase).

Con estos resultados, se busca en diferentes catálogos de baterías de condensadores, y teniendo en cuenta las diferentes características técnicas que se necesitan, se selecciona la batería de condensadores que se ve en el Anexo V.1.1 cuyo coste total es de 19.028 €.

*Inversión inicial: 19.028 €*

$$\text{Ahorro económico: } 5.974 \frac{\text{€}}{mes}$$

Aunque haya que realizar una inversión inicial por la instalación de la batería de condensadores, merece la pena, ya que debido al ahorro económico mensual, esta inversión sería amortizada en el periodo de 4 meses aproximadamente.

Para comprobar que al instalar el banco de condensadores el factor de potencia es de 0,95, se calcula si se cumple la opción más favorable y la opción menos favorable dentro del consumo eléctrico anual. El valor mínimo dentro de la potencia activa es de 198.661 kWh y el valor



máximo es 232.146 kWh. Por lo tanto, según la ecuación (1), los factores de potencia correspondientes serán:

$$\cos \varphi_{min} = \frac{P}{\sqrt{Q^2 + P^2}} = \frac{198.661}{\sqrt{68.641^2 + 198.661^2}} = 0,9452$$

$$\cos \varphi_{máx} = \frac{P}{\sqrt{Q^2 + P^2}} = \frac{232.146}{\sqrt{68.641^2 + 232.146^2}} = 0,9590$$

Los dos factores de potencia se aproximan al valor de 0,95, por lo que la instalación de banco de condensadores saldría rentable.

Debido a una posible ampliación de la planta y compra de nueva maquinaria, se ha barajado la opción de cambiar la configuración estrella de los condensadores a una configuración en triángulo. Esta modificación tiene el objeto de aumentar la potencia reactiva, se calcula tal y como se ve en la ecuación (8):

$$Q_{\Delta} = 3 \times C \times 2 \times \pi \times f \times U^2 \quad (8)$$

$$Q_{\Delta} = 3 \times 14,11 \times 10^{-6} F \times 2 \times \pi \times 50 \text{ Hz} \times 230^2 V^2 = 703,48 \text{ kVArh}$$

De esta forma, con los dispositivos instalados, y sabiendo que en la planta se trabaja 16 horas al día y con una media de 20 días laborables se podría compensar al mes una potencia reactiva:

$$703,48 \text{ kVArh} \times 16 \frac{h}{día} \times 20 \text{ días} = 225.114 \frac{\text{kVAr}}{\text{mes}}$$

## 5.2 ILUMINACIÓN LED

En la planta se trabaja 220 días aproximadamente al año, con una media de 16 horas al día. Se tiene una distribución de la planta que se puede observar en el Anexo III.1.

La planta de reciclado de neumáticos tiene diferentes dispositivos de iluminación (fluorescentes, campanas, paneles, bombillas, focos), pero ninguna de ellas es de estilo LED, por lo tanto se calcula la amortización de la instalación de iluminación LED tal como se observa en la Tabla 10.

Inicialmente, al realizar un cambio a la tecnología LED, habría que desembolsar económicamente una cantidad de aproximadamente 19.000 €, tal y como se observa en la Tabla 10. Al sustituir la iluminación tradicional por bombillas LED y focos LED, el periodo de amortización rondaría el periodo de un año, en cambio, la sustitución de paneles, tardaría en amortizarse 6 años aproximadamente. Mirando el lado positivo se conseguiría un ahorro anual relativo al consumo de potencia de 7.235 € aproximadamente. Además, al realizar una mejora en el consumo de energía reactiva, aún se mejorarían más los datos del consumo de la planta.

Tabla 10. Amortización en Iluminación LED

|   | Fluorescente | Campana | Paneles | Bombilla | Foco  |
|---|--------------|---------|---------|----------|-------|
| Potencia tradicional (W)                | 58           | 1000    | 144     | 60       | 50    |
| Potencia LED (W)                        | 9            | 200     | 36      | 18       | 6     |
| Ahorro potencia (%)                     | 84,5         | 80,0    | 75,0    | 70,0     | 88,0  |
| Coste anual instalación LED (€)         | 289,9        | 4.730,9 | 907,3   | 71,2     | 28,0  |
| Coste anual instalación tradicional (€) | 500,9        | 10.384  | 1.546,6 | 538,6    | 293,0 |
| Ahorro Total anual (€)                  | 211,1        | 5.653,1 | 639,3   | 467,4    | 265,0 |
| Inversión (€)                           | 552,8        | 14.544  | 3.332,6 | 155,9    | 70,7  |
| Periodo amortización (Año)              | 2,6          | 2,6     | 5,2     | 0,3      | 0,3   |
| Periodo Amortización (Meses)            | 31,4         | 30,9    | 62,6    | 4,0      | 3,2   |

En la Figura 11 se representa el ahorro económico entre la iluminación tradicional y la iluminación LED. El valor de coste de tarificación fija de luz va variando, por lo tanto, se toma como base de cálculo 0,11€/kWh.

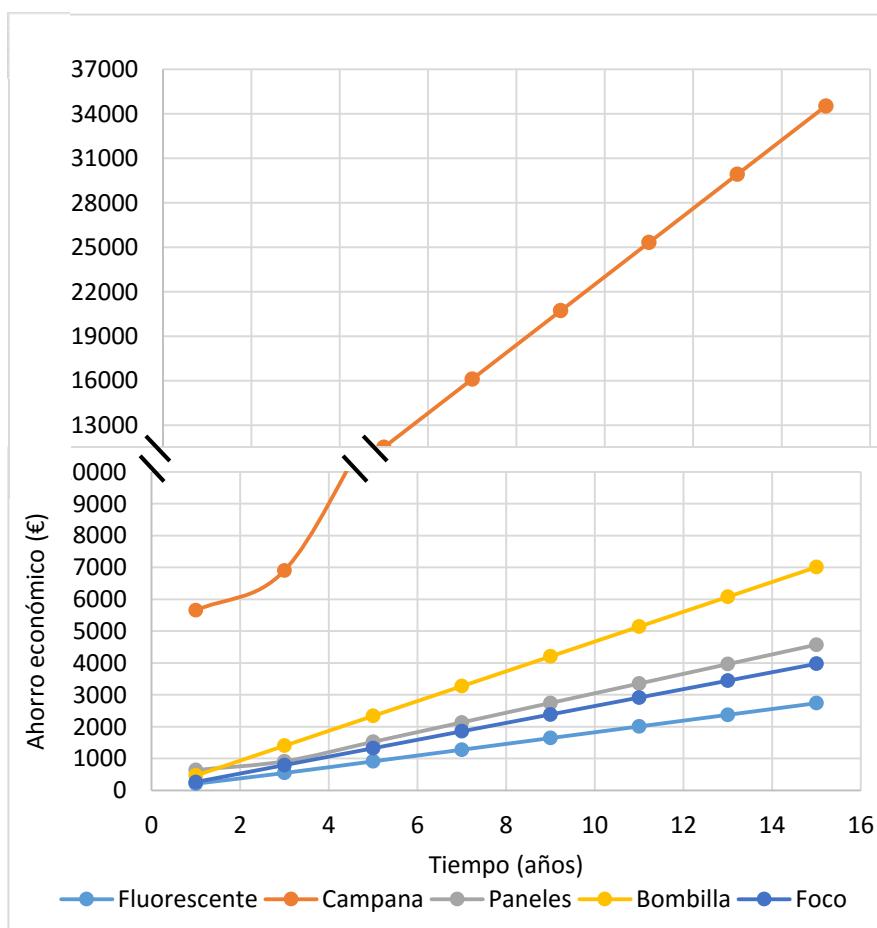


Figura 11. Gráfica comparativa ahorro económico de productos LED



Tal como se observa la gráfica en la Figura 11, a lo largo del segundo año de la instalación de iluminación LED se nota que existen beneficios tras la inversión inicial. El ahorro aumenta linealmente con el tiempo para todos los dispositivos, siendo las campanas de iluminación LED en la que se nota más dicho ahorro.

En conclusión, tanto en ahorro en la potencia como en ahorro económico, la instalación de tubos LED ahorra costes a la planta de reciclaje de neumáticos.

### 5.3 COGENERACIÓN DE RESIDUOS

En España, el 50% de NFU se recicla, un 8% se reutiliza directamente si la cubierta lo permite y un 12% se recauchuta. El resto, un 30% se transforma en combustible alternativo para uso en cementeras. Siendo que en la planta visitada se reciben 4.927,321 toneladas de neumáticos fuera de uso al año. Una instalación de cogeneración costaría aproximadamente 1.000.000 € (30).

$$\frac{30}{100} \times 4.927,321 = 1.478,2 \text{ toneladas se destinarían como combustible}$$

Teniendo en cuenta los valores de la Tabla 11, el combustible más utilizado en la sociedad actual es el gasóleo, debido a sus buenas propiedades como combustible ya que posee un elevado poder calorífico superior, comparando con el resto de combustibles. Los neumáticos son los únicos que se asemejan a ese poder calorífico.

Tabla 11. Combustibles más utilizados (1414)

| COMBUSTIBLE      | PCS<br>(kWh/kg) | PCI<br>(kWh/kg) | PRECIO<br>COMBUSTIBLE<br>(/kg) | USO                         |
|------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Maderas          | 5,28            | 4,28            | 0,30                           | Agua caliente               |
| Papel            | 5,28            | 4,86            | 0,10                           | Calderas                    |
| Neumático        | 10,14           | 8,61            | 0,20                           | Calderas                    |
| Caucho           | 11,67           | 10,03           | 1,25                           | Calderas                    |
| Carbón de madera | 9,43            | 9,08            | 0,80                           | Calderas                    |
| Gasóleo          | 10,89           | 10,28           | 0,86                           | Calderas                    |
| Gas natural      | 11,98           | 10,83           | 0,60                           | Agua caliente, calefacción  |
| Pellets          | 5,81            | 5,01            | 0,20                           | Calefacción y agua caliente |
| Coque            | 9,36            | 8,14            | 0,50                           | Generación de energía       |

Un ejemplo de cálculo de la masa necesaria para obtener una energía determinada a partir de los valores del poder calorífico superior, para el caso de utilizar pellets, se presenta a continuación. Tras revisar diferentes artículos, los sistemas de cogeneración funcionan al 90% de rendimiento, pero en este caso, se supone un rendimiento más conservador del 86%.



Pellets:

$$n = \frac{E_{util}}{E_{suministrada}} \rightarrow E_{suministrada} = \frac{E_{util}}{n} = \frac{100 \text{ kW}}{0,86} = 116,28 \text{ kWh}$$

$$m = \frac{E_{combustible}}{PCS} = \frac{116,28 \text{ kWh}}{5,81 \text{ kWh/kg}} = 20,01 \text{ kg en 1 hora}$$

Realizando los cálculos para el resto de combustibles, se obtiene el coste anual de combustibles tal como se observa en la Tabla 12.

Tabla 12. Tabla resumen coste anual de combustibles

|             | ALIMENTACIÓN PARA 1 HORA (kg) | ALIMENTACIÓN PARA 1 AÑO (kg) | PRECIO COMBUSTIBLE (€/kg) | COSTE ANUAL (€) |
|-------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------|
| PELLETS     | 20,01                         | 70.448                       | 0,20                      | 14.090          |
| MADERA      | 22,02                         | 77.520                       | 0,30                      | 23.256          |
| CARBÓN      | 12,33                         | 43.405                       | 0,80                      | 34.724          |
| NEUMÁTICOS  | 11,47                         | 40.365                       | 0,20                      | 8.073           |
| GAS NATURAL | 9,71                          | 34.166                       | 0,60                      | 20.499          |
| GASÓLEO     | 10,68                         | 37.585                       | 0,76                      | 28.415          |

Como se puede comprobar en la Tabla 12, el uso de neumáticos como combustible alterno al gasóleo sale menos costoso respecto al uso de otro tipo de combustibles. Como segunda opción menos costosa serían los pellets y luego el gas natural.

#### 5.4 NEUMÁTICOS RECAUCHUTADOS

El uso de neumáticos recauchutados se está intentando implantar en nuestra sociedad, ya que es más rentable que comprar un neumático nuevo.

En la Tabla 13, cabe destacar los referentes a los costes energéticos en la fabricación de neumáticos nuevos y recauchutados de camión y turismo. Los resultados se muestran en litros de petróleo para convertirlos en kWh es necesario conocer que la densidad del petróleo es de 0,85 g/cm<sup>3</sup> y por otro lado, 1 kilovatio por hora equivale a 860 gramos equivalentes de petróleo. A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo de conversión de unidades:

$$104,46 \text{ dm}^3 \times \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ dm}^3} = 104.460 \text{ cm}^3 \times \frac{0,85 \text{ g}}{\text{cm}^3} = 88.791 \text{ g} \times \frac{1 \text{ kWh}}{860 \text{ g}} = 103,25 \text{ kWh}$$

Tabla 13. Resumen del ahorro energético en la producción de neumáticos de camión y turismo (32)

| CAMIÓN  | MATERIALES | CONSUMO PETRÓLEO (L) |              | CONSUMO ENERGÉTICO (kWh) |              | AHORRO (%) |
|---------|------------|----------------------|--------------|--------------------------|--------------|------------|
|         |            | NUEVO                | RECAUCHUTADO | NUEVO                    | RECAUCHUTADO |            |
|         | MATERIALES | 104,46               | 36,32        | 103,25                   | 35,90        | 65,20      |
|         | PROCESO    | 36,69                | 6,55         | 36,26                    | 6,47         | 82,10      |
|         | TOTAL      | 141,20               | 42,87        | 139,51                   | 42,37        | 69,60      |
| TURISMO | MATERIALES | 15,52                | 10,52        | 15,34                    | 10,40        | 32,20      |
|         | PROCESO    | 7,98                 | 2,53         | 7,89                     | 2,50         | 68,30      |
|         | TOTAL      | 23,50                | 13,05        | 23,23                    | 12,90        | 44,50      |

En resumen, en la Tabla 14 se comparan los datos entre neumáticos de un turismo y de un camión, encontrados en el Anexo V.4.

Tabla 14. Comparativa de neumáticos recauchutados y nuevos (15, 25).

|                        |                                   | TURISMO        | CAMIÓN          |
|------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|
| NEUMÁTICO NUEVO        | CONSUMO ENERGÉTICO UNITARIO (kWh) | 23,23          | 139,51          |
|                        | COSTE PRODUCCIÓN UNITARIO (€)     | 2,56           | 15,35           |
|                        | PRECIO NEUMÁTICO (€)              | 65,22 – 150,65 | 687,50          |
|                        | TIEMPO DE VIDA (km)               | 40.000         | 100.000         |
| NEUMÁTICO RECAUCHUTADO | CONSUMO ENERGÉTICO UNITARIO (kWh) | 12,90          | 42,37           |
|                        | COSTE PRODUCCIÓN UNITARIO (€)     | 1,419          | 4,66            |
|                        | PRECIO NEUMÁTICO (€)              | 60,54 – 88,01  | 379,30 – 586,80 |
|                        | TIEMPO DE VIDA (km)               | 20.000         | 50.000          |
| ECOTASA (€)            |                                   | 1,77           | 14,86           |

Como se puede observar en la Tabla 14, una vez que el neumático se convierte en residuo, se paga una tasa de gestión de residuos por unidad, aunque se lleve a recauchutar. Comparando los precios de neumáticos nuevos y recauchutados, éste último supone un ahorro entre el 8 y el 60% para turismo y entre 14,6 y 45% para camiones; sin embargo la duración de los neumáticos recauchutados es muy inferior (35).

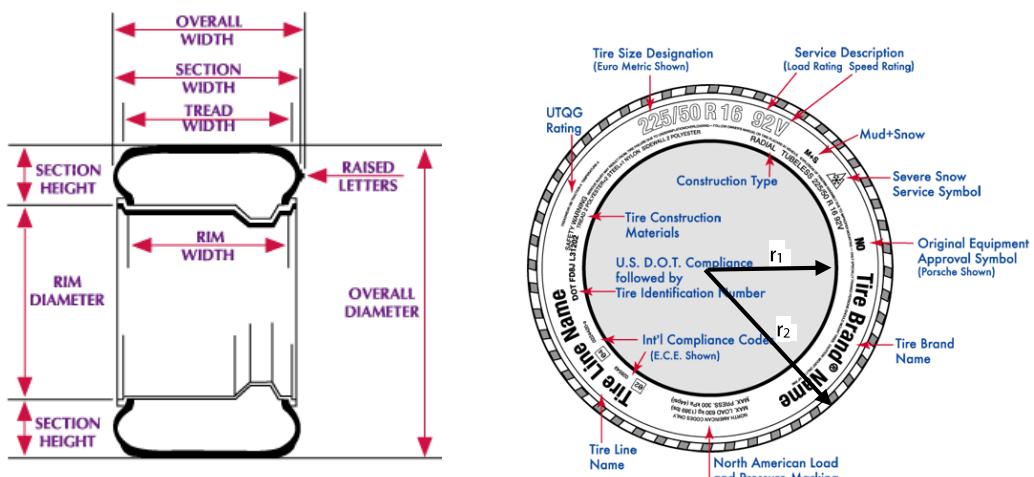


Figura 12. Información técnica de un neumático



Para calcular la energía que cuesta recauchutar un neumático se seguirán los pasos indicados a continuación, poniendo como ejemplo un neumático catalogado como 225/50R16 cuyas características se muestran en la Figura 12 y dónde los códigos indican:

- 225: indica que el ancho del neumático es de 225 milímetros, medidos de la parte más ancha de la pared o flanco interior, hasta la parte más ancha de la pared o flanco de la parte exterior.
- 50: este número indica que la altura del flanco o pared (del rin o llanta hasta donde comienza la rodadura) es el 50% del ancho del neumático. Esta medida es la relación entre la altura y el ancho del neumático y se le conoce como serie o perfil. (Altura: 112,5 milímetros)
- R: Esta letra indica que el neumático tiene una construcción Radial. Este tipo de construcción es la más común actualmente.
- 16: este número indica el diámetro de la llanta en pulgadas. (16" = 406,4 mm)

Primero, se calcula el área y el volumen del neumático nuevo del ejemplo, a través de las ecuaciones (8) y (9), sabiendo que:

$$A = \pi^2 \times (r_2 + r_1) (r_2 - r_1) \quad (9)$$

Donde  $r_2$  y  $r_1$  son los radios marcados en la Figura 12, siendo  $r_1$ , es la mitad del valor del diámetro de la llanta, en el caso del ejemplo, 203,2 mm y  $r_2$  el valor correspondiente a la suma de  $r_1$  y el ancho del neumático, en el caso del ejemplo, 225 mm.

$$A = \pi^2 \times \left( \frac{450 + 406,4}{2} + \frac{406,4}{2} \right) \times 10^{-3} m \times (428,2 - 203,2) \times 10^{-3} m = 1,402 m^2$$

$$V = \frac{\pi^2 \times (r_2 + r_1) (r_2 - r_1)^2}{4} \quad (10)$$

$$V = \frac{\pi^2 \times (0,4282 + 0,2032)(0,4282 - 0,2032)^2 m^3}{4} = 0,08188 m^3$$

Un neumático nuevo tiene un testigo de desgaste de 8 mm y conforme el neumático se desgasta va perdiendo volumen, se debe retirar del mercado cuando el testigo de desgaste llega a 1,6 mm. Por lo tanto, aproximadamente se pierde un 20% de volumen. De esta forma, el volumen de neumático desgastado es de 0,065504 m<sup>3</sup>. En conclusión, se debería de recauchutar el volumen siguiente:

$$V = 0,08188 - 0,065504 = 0,016376 m^3$$

El precio del caucho es aproximadamente 3 €/kg, y su densidad es 950 kg/m<sup>3</sup>. Para recauchutar un neumático, el coste sería:

$$Precio = 0,016376 m^3 \times 950 \frac{kg}{m^3} \times 3 \frac{\epsilon}{kg} = 46,67 \epsilon/\text{neumático}$$

Si se tiene en cuenta los costes de producción y la venta de un neumático recauchutado de la Tabla 14, el coste total y la rentabilidad del proceso de fabricación sin tener en consideración los gastos de mano de obra, de un neumático recauchutado de turismo serían:



$$Coste\ total = 46,67 \frac{\text{€}}{\text{neumático}} + 1,419 \frac{\text{€}}{\text{neumático}} = 48,09 \text{ €/neumático}$$

$$Rentabilidad_{mínima} = 60,54 \frac{\text{€}}{\text{neumático}} - 48,09 \frac{\text{€}}{\text{neumático}} = 12,45 \text{ €/neumático}$$

$$Rentabilidad_{máxima} = 88,01 \frac{\text{€}}{\text{neumático}} - 48,09 \frac{\text{€}}{\text{neumático}} = 39,92 \text{ €/neumático}$$

En Hannover (Alemania) se ha construido una planta de producción de neumático recauchutado. Han realizado una inversión de 10 millones de euros, y se estima una capacidad anual de 180.000 neumáticos recauchutados (23). Por lo tanto, teniendo en cuenta los cálculos del ejemplo. La inversión se amortizaría aproximadamente en 4 años si se cumpliera la estimación de producción anual de neumáticos.

## 5.5 PIRÓLISIS

La instalación de una planta de pirólisis implica una inversión elevada de dinero. Para obtener un flujo diario de productos entre 2 y 10 toneladas, una planta de pirólisis, tal y como se ve en la Figura 13 y en el Anexo V.5.1 costaría entre 120.000 y 200.000 €. Esto se podría ir amortizando a lo largo de los años con la venta de los productos obtenidos en el proceso de pirólisis.

### Datos Básicos

|                                     |                     |   |                    |   |                     |
|-------------------------------------|---------------------|---|--------------------|---|---------------------|
| Voltaje:                            | hasta el voltaje... | Lugar del origen:                                     | China (Contine...  | Marca:                                    | Tongrui             |
| Número de Modelo:                   | DDR                 | Peso:   | hasta la capaci... | Flujo:                                    | 2-10tons/día        |
| Energía (W):                        | hasta la capaci...  | Presión de Trabajo:                                   | hasta la capaci... | Condición:                                | Nuevo               |
| Certificación:                      | SGS; ISO2008        | Dimensión (L*W*H):                                    | hasta su fábric... | Uso:                                      | plástico, aceite... |
| Servicio After-sales proporcionado: | Dirige disponibl... | Color después del tratamiento:                        | No.1-No1.5         | garantía:                                 | de toda la vida     |
| capacidad:                          | 1-20 t/d            | viscosidad después del tratamiento:                   | 26.86-49.57 (40... | punto de fluidez después del tratamiento: | -12 grados          |
| neutralización valor:               | 0.02 mg de koh...   | punto de inflamación abierta después del tratamiento: | 224 Grados         | limitada de vacío:                        | 50 pa               |
| voltaje:                            | 380 v/50 hz/3 f...  | tasa de recuperación:                                 | 85%-90%            |   |                     |

Figura 13. Datos de planta de pirólisis para un flujo de 2 – 10 toneladas al día

Tomando un valor medio de 6 t/día de producción de hidrocarburos, se puede estimar el beneficio que se obtendría tras su producción. Así el cálculo para gasolina se muestra a continuación:

$$PRECIO\ VENTA\ HIDROCARBURO\ (\text{€}) = \frac{PRODUCCIÓN\ DIARIA\ (g)}{DENSIDAD\ (\frac{g}{L})} \times PRECIO\ VENTA\ \frac{\text{€}}{L}$$

$$GASOLINA\ 95 = 6.000.000\ g \times \frac{1\ L}{680\ g} \times 0,725\ \frac{\text{€}}{L} = 6.636,18\ \text{€}$$

En la Tabla 15, se pueden observar todos los datos necesarios para su calcular el precio de venta de los hidrocarburos si se obtuvieran a través del proceso de pirólisis. Los hidrocarburos obtenidos mediante pirólisis poseen un punto de ebullición que lo sitúa como una fracción



compuesta aproximadamente por un 70% de gasoil y un 30% de gasolina, mostrando unas propiedades intermedias entre ambos productos. Posee un poder calorífico entre 40 MJ/kg y 42 MJ/kg, por lo que podría ser utilizado como combustible en calderas.

Tabla 15. Venta de los hidrocarburos más comunes en el mercado

|                              | GASOLINA | GASÓLEO C |
|------------------------------|----------|-----------|
| DENSIDAD (g/L)               | 680      | 880       |
| PRECIO (€)                   | 1,159    | 0,756     |
| IMUESTO HIDROCARBURO (€/L)   | 0,434    | 0,307     |
| PRECIO VENTA (€/L)           | 0,725    | 0,449     |
| PORCENTAJE (%)               | 30       | 70        |
| PRECIO PRODUCCIÓN DIARIA (€) | 1.919    | 2.143     |
| TOTAL VENTA (€)              | 4.062    |           |

Se estima en 300 kWh/t el consumo energético de la planta de pirólisis para la cantidad de producción diaria. El valor de coste de tarificación fija de luz va variando, por lo tanto, se toma como base de cálculo 0,11€/kWh. Como se ha dicho anteriormente, se estima 6 toneladas diarias. Por lo tanto, el consumo de energía diario sería:

$$\text{Gastos energía: } 300 \frac{\text{kWh}}{t} \times 6 t \times 0,11 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 198 \text{ €}$$

Tras ver estos cálculos, se observa que la inversión inicial y el gasto energético diario, no supondría un inconveniente, ya que la inversión se recuperaría en un corto plazo si se vendieran los hidrocarburos que se produjeran.

## 5.6 INSTALACIONES PLACAS FOTOVOLTAICAS

Está demostrado que la instalación de placas fotovoltaicas consigue un ahorro económico. Se realiza una simulación de instalación de placas fotovoltaicas con dos programas para comprobar los elementos necesarios para su instalación, uno de ellos, es un simulador online, denominado "calculationsolar" que calcula los elementos necesarios para una instalación solar fotovoltaica aislada. Esta herramienta es una aplicación muy sencilla donde se introduce la situación geográfica y el consumo de energía por día. Para este caso, se estima un ahorro de 65 kWh/día. Para ello, se necesitaría colocar diferentes elementos para la instalación de placas fotovoltaicas que se muestra en la Figura 14.

- 58 unidades en paralelo y 2 unidades en serie. Elementos que convierten la energía del sol en energía eléctrica (corriente continua). Están formados por la unión de diversos paneles, para dotar a la instalación de la potencia necesaria.
- 14 reguladores. Nexo de unión entre los paneles solares y los elementos de consumo de la instalación. Se encarga también de proteger a los acumuladores ante sobrecargas. Proporciona a su salida la tensión continua para la instalación. Fija el valor de la tensión nominal a la que trabaja la instalación.
- 24 baterías (Solo presente en instalaciones autónomas). Proporciona energía a la instalación durante los períodos sin luz solar o sin suficiente luminosidad. Acumula energía para la instalación.



- 1 inversor/cargador. Convierte la corriente continua del sistema en corriente alterna, a 380 V de valor eficaz y frecuencia de 50 Hz, igual a la de la red eléctrica. Alimenta los aparatos que trabajan con corriente alterna.

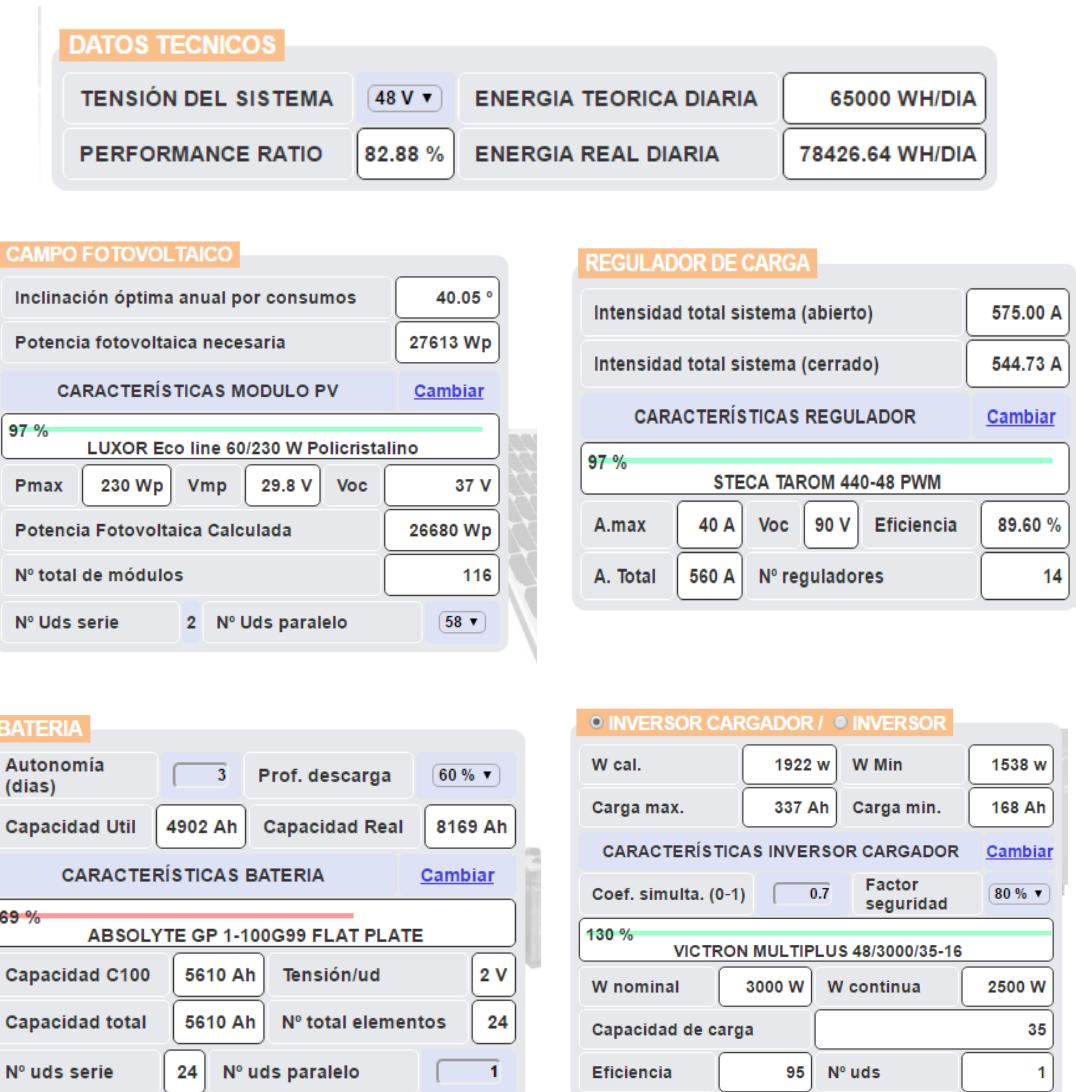


Figura 14. Simulación instalaciones solares fotovoltaicas en la planta con el programa "Calculationsolar"

Para completar los datos que ofrece la aplicación online, se utiliza otro software de cálculo de instalaciones solares denominado PVSYST como se ve en la Figura 15. Este software, además de decir los elementos necesarios para la instalación de placas solares, detalla las gráficas de energía incidente y la energía diaria obtenida tras la instalación de la placa solar fotovoltaica.



| PVSYST V6.39   | 07/12/15  |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
|--|---|--|---------------------------------------|--|--------------------------|----------------------|-------------|------|------|------|-------|-------------|------|------|------|-------|-------------|------|------|------|-------|-------------|------|------|------|-------|-------------|------|------|------|-------|-------------|------|------|------|-------|-------------|------|------|------|-------|-------------|------|------|------|-------|-------------|------|------|------|-------|-------------|------|------|------|-------|-------------|------|------|------|-------|-------------|------|------|------|-------|------------|------|------|------|--------|
| Pre-dimensionado sistema red   |   |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Lugar geográfico</b>  | <b>Barcelona</b>                                |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Ubicación</b>   | Latitud 41.4°N<br>Hora definido como Hora Solar |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Orientación Plano Receptor</b>  | Inclinación 42°                                 |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>País España</b>   |   |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
|  | Longitud 2.1°E<br>Altitud 273 m                 |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
|  | Acimut 0°                                       |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>PV-field installation main features</b>   |   |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| Module type  | Standard  |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| Technology   | Polycrystalline cells                           |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| Mounting method  | Flat roof                                       |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| Back ventilation properties  | Ventilated                                      |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>System characteristics and pre-sizing evaluation</b>  |   |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| PV-field nominal power (STC) $P_{nom}$   | 301 kWp   |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| Collector area $A_{col}$   | 2010 m <sup>2</sup>                             |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| Annual energy yield $E_{yield}$  | 500 MWh   |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| Specific yield $E_{yield}$   | 1659 kWh/kWp                                    |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| Economic gross evaluation  | 679496 EUR                                      |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| Energy price   | 0.10 EUR/kWh                                    |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Meteo and incident energy</b>   |   |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>System output</b>   |   |  |                                       |  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Gl. horiz.<br/>kWh/m<sup>2</sup>.dia</th> <th>Coll. Plane<br/>kWh/m<sup>2</sup>.dia</th> <th>System output<br/>kWh/día</th> <th>System output<br/>kWh</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Ene.</b></td> <td>2.17</td> <td>4.24</td> <td>1075</td> <td>33332</td> </tr> <tr> <td><b>Feb.</b></td> <td>2.94</td> <td>4.72</td> <td>1196</td> <td>33486</td> </tr> <tr> <td><b>Mar.</b></td> <td>4.23</td> <td>5.69</td> <td>1441</td> <td>44656</td> </tr> <tr> <td><b>Abr.</b></td> <td>5.55</td> <td>6.13</td> <td>1552</td> <td>46569</td> </tr> <tr> <td><b>May.</b></td> <td>6.42</td> <td>6.11</td> <td>1548</td> <td>47994</td> </tr> <tr> <td><b>Jun.</b></td> <td>6.85</td> <td>6.09</td> <td>1543</td> <td>46300</td> </tr> <tr> <td><b>Jul.</b></td> <td>7.17</td> <td>6.53</td> <td>1654</td> <td>51261</td> </tr> <tr> <td><b>Ago.</b></td> <td>5.90</td> <td>6.08</td> <td>1539</td> <td>47711</td> </tr> <tr> <td><b>Sep.</b></td> <td>4.74</td> <td>5.84</td> <td>1479</td> <td>44374</td> </tr> <tr> <td><b>Oct.</b></td> <td>3.39</td> <td>5.06</td> <td>1282</td> <td>39728</td> </tr> <tr> <td><b>Nov.</b></td> <td>2.39</td> <td>4.39</td> <td>1111</td> <td>33340</td> </tr> <tr> <td><b>Dic.</b></td> <td>1.92</td> <td>3.98</td> <td>1008</td> <td>31249</td> </tr> <tr> <td><b>Año</b></td> <td>4.48</td> <td>5.41</td> <td>1370</td> <td>500000</td> </tr> </tbody> </table> |   |  | Gl. horiz.<br>kWh/m <sup>2</sup> .dia | Coll. Plane<br>kWh/m <sup>2</sup> .dia | System output<br>kWh/día | System output<br>kWh | <b>Ene.</b> | 2.17 | 4.24 | 1075 | 33332 | <b>Feb.</b> | 2.94 | 4.72 | 1196 | 33486 | <b>Mar.</b> | 4.23 | 5.69 | 1441 | 44656 | <b>Abr.</b> | 5.55 | 6.13 | 1552 | 46569 | <b>May.</b> | 6.42 | 6.11 | 1548 | 47994 | <b>Jun.</b> | 6.85 | 6.09 | 1543 | 46300 | <b>Jul.</b> | 7.17 | 6.53 | 1654 | 51261 | <b>Ago.</b> | 5.90 | 6.08 | 1539 | 47711 | <b>Sep.</b> | 4.74 | 5.84 | 1479 | 44374 | <b>Oct.</b> | 3.39 | 5.06 | 1282 | 39728 | <b>Nov.</b> | 2.39 | 4.39 | 1111 | 33340 | <b>Dic.</b> | 1.92 | 3.98 | 1008 | 31249 | <b>Año</b> | 4.48 | 5.41 | 1370 | 500000 |
|  | Gl. horiz.<br>kWh/m <sup>2</sup> .dia           | Coll. Plane<br>kWh/m <sup>2</sup> .dia | System output<br>kWh/día              | System output<br>kWh                   |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Ene.</b>  | 2.17  | 4.24                                   | 1075                                  | 33332                                  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Feb.</b>  | 2.94  | 4.72                                   | 1196                                  | 33486                                  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Mar.</b>  | 4.23  | 5.69                                   | 1441                                  | 44656                                  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Abr.</b>  | 5.55  | 6.13                                   | 1552                                  | 46569                                  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>May.</b>  | 6.42  | 6.11                                   | 1548                                  | 47994                                  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Jun.</b>  | 6.85  | 6.09                                   | 1543                                  | 46300                                  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Jul.</b>  | 7.17  | 6.53                                   | 1654                                  | 51261                                  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Ago.</b>  | 5.90  | 6.08                                   | 1539                                  | 47711                                  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Sep.</b>  | 4.74  | 5.84                                   | 1479                                  | 44374                                  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Oct.</b>  | 3.39  | 5.06                                   | 1282                                  | 39728                                  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Nov.</b>  | 2.39  | 4.39                                   | 1111                                  | 33340                                  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Dic.</b>  | 1.92  | 3.98                                   | 1008                                  | 31249                                  |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |
| <b>Año</b>   | 4.48  | 5.41                                   | 1370                                  | 500000                                 |                          |                      |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |             |      |      |      |       |            |      |      |      |        |

Figura 15. Informe pre-dimensionado instalación fotovoltaica conectada a red

En la Tabla 16 se muestran los datos de la energía (kWh) generada por mes proporcionado por el software PVSYST, los consumos mensuales de la energía de la empresa (kWh) y los ahorros energéticos y económicos que supone la instalación de los paneles fotovoltaicos. Así se muestra una previsión del ahorro obtenido.



Tabla 16. Ahorros de energía y ahorros económicos tras la instalación de paneles solares

| MESES      | ENERGÍA GENERADA MES (kWh) | CONSUMO MENSUAL ENERGÍA (kWh) | AHORRO ENERGÍA (%) | AHORRO ECONÓMICO (€) |
|------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|
| ENERO      | 33.332                     | 199.918                       | 16,67              | 3.667                |
| FEBRERO    | 33.486                     | 200.228                       | 16,72              | 3.683                |
| MARZO      | 44.656                     | 199.639                       | 22,37              | 4.912                |
| ABRIL      | 46.569                     | 199.601                       | 23,33              | 5.123                |
| MAYO       | 47.994                     | 208.385                       | 23,03              | 5.279                |
| JUNIO      | 46.300                     | 207.963                       | 22,26              | 5.093                |
| JULIO      | 51.261                     | 198.661                       | 25,80              | 5.639                |
| AGOSTO     | 47.711                     | 212.457                       | 22,46              | 5.248                |
| SEPTIEMBRE | 44.374                     | 211.559                       | 20,97              | 4.881                |
| OCTUBRE    | 39.728                     | 232.146                       | 17,11              | 4.370                |
| NOVIEMBRE  | 33.340                     | 228.370                       | 14,60              | 3.667                |
| DICIEMBRE  | 31.249                     | 200.309                       | 15,60              | 3.437                |
| AÑO        | 500.000                    | 2.499.236                     | 20,00              | 55.000               |

En la Tabla 17 se muestra un resumen de los costes de los diferentes elementos de una instalación solar fotovoltaica, las unidades que serían necesarias, la inversión correspondiente de estos elementos y el periodo de amortización de la instalación solar.

Tabla 17. Amortización en placas fotovoltaicas

|                              | Placa  | Regulador de carga | Batería | Inversor/Cargador |
|------------------------------|--------|--------------------|---------|-------------------|
| Coste (€/W)                  | 0,04   | -                  |         | 0,87              |
| Coste total (€)              | 369    | 594                | 1.907   | 2.636             |
| Unidades                     | 116    | 14                 | 24      | 1                 |
| Inversión (€)                | 42.816 | 8.316              | 45.761  | 2.636             |
| Periodo amortización (Año)   | 0,78   | 0,15               | 0,83    | 0,048             |
| Periodo Amortización (Meses) | 9,34   | 1,81               | 9,98    | 0,58              |

Esta opción sería beneficiosa para el medio ambiente, y otra forma de obtener un ahorro de 65 kWh/día en la energía eléctrica. El lado negativo de esta propuesta supone una elevada inversión económica y su posterior mantenimiento. Para la instalación de este tipo de módulos fotovoltaicos se necesita el modelo A-240P, con dimensiones 1.645 x 990 x 40 (mm) (véase Figura V-18 del Anexo V.6.2), y al necesitar 116 paneles se requiere una superficie de 190,82 x 114,84 x 4,64 (m), un total de 21.913 m<sup>2</sup>. La planta tecnológica posee una superficie de 4.000 m<sup>2</sup>, por lo tanto, habría que realizar una inversión comprando parcelas contiguas a la planta para su instalación

Además, esta tecnología depende del tiempo de exposición del sol sobre las placas solares. En conclusión, no sería recomendable de momento su instalación en la planta, ya que se puede obtener energía con otro tipo de tecnologías que salen más rentables.



Para que la planta fuera autosuficiente, habría que determinar la superficie necesaria ( $m^2$ ) de paneles fotovoltaicos dependiendo del consumo total de electricidad por día. El tamaño de un sistema fotovoltaico se calcula de la siguiente manera:

$$Ar = \frac{1.200 \times Ed}{Id} \quad (11)$$

Donde Ar es el tamaño del panel (Wp), Ed es el consumo de electricidad (kWh/día) e Id es la irradiación (kWh/ $m^2$ /día).

El tamaño de un sistema fotovoltaico está dado por el vatio pico (Wp). Esta es la salida máxima de un panel fotovoltaico bajo condiciones estándar que son: temperatura ambiente de 25°C y 1000 W/ $m^2$  de irradiación.

$$Ar = \frac{1200 \times 10.442 \text{ kWh}}{5,41 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} = 2.316.155 \text{ Wp}$$

Después de obtener el tamaño del panel (Wp), se toma un catálogo de módulos fotovoltaicos (véase Figura V-18 del Anexo V.6.2), donde se elige el modelo A-315 M, con una potencia de 315 Wp, de esta manera se disminuye la cantidad de módulos fotovoltaicos y se ocupa una menor superficie comparando con otros modelos que tienen las mismas características físicas pero menor potencia.

$$2.316.155 \text{ Wp} / 315 \text{ Wp} = 7.353 \text{ módulos fotovoltaicos}$$

Este modelo de paneles tiene las siguientes dimensiones: 1965 x 990 x 40 (mm), si estas dimensiones las multiplicas por 7.353 (14.449 x 7280 x 295 m), se necesitaría una superficie de 105.188.720  $m^2$ . Esta opción no es viable, porque la planta consta de una superficie de 4.000  $m^2$  y para la instalación de todos los módulos fotovoltaicos que se necesitan se requeriría comprar varias parcelas para su montaje.



## 6 CONCLUSIONES

Tanto el cambio de iluminación tradicional por iluminación LED, como instalar un banco de condensadores en la planta de reciclaje de neumáticos para obtener una compensación de la energía reactiva, son tecnologías muy interesantes de aplicar, ya que viendo los resultados se obtendrían beneficios, tanto económicamente como medioambientalmente. En la compensación de la reactiva se tendría un ahorro económico mensual de 5.974€ y un 47,75 % en el ahorro energético, datos muy positivos. Al cambiar la iluminación tradicional por iluminación LED se observa, que inicialmente hay que realizar una alta inversión, pero se comprueba que la total recuperación económica se obtendría en 6 años después de su instalación y un ahorro energético de 80% aproximadamente.

En conclusión, tanto realizar los cambios necesarios de la iluminación tradicional por iluminación LED como la instalación de un banco de condensadores suponen una mejora de la planta y una amortización económica en corto plazo.

Debido a la gran cantidad de neumáticos que se encuentran almacenados en la campa exterior, tanto el textil que se obtiene en su procesado como neumáticos enteros que pueden ser troceados, la tecnología más beneficiosa sería la instalación de una planta de cogeneración. El neumático resulta muy beneficioso como combustible, tiene un alto poder calorífico, tras el gasóleo y el gas natural. Además, resulta económicamente más viable que otro tipo de combustibles con un coste anual de 8.073 €. De esta manera la planta podría generar energía, con la que se podría autoabastecer y con el sobrante venderlo a las empresas de energía, de esta manera se obtendrían ingresos extras por la venta de energía sobrante y un ahorro considerable en las facturas de energía.

De entre todas las posibilidades, la opción que sale más rentable es la pirólisis. Se trata de un proceso de transformación muy eficiente ya que entre el 85% y el 90% del material de entrada es transformado en otros productos con gran valor añadido, como son los aditivos para combustibles líquidos y el negro de carbón. Se trata de un proceso térmicamente autónomo. La producción de hidrocarburos de alto poder calorífico garantiza disponer de un proceso con un balance de energía neutro o incluso positivo. La rentabilidad económica del proceso de pirólisis es mayor que otros procesos. Desde el primer año de su instalación, la planta de pirólisis está amortizada y se pueden obtener beneficios vendiendo los productos de salida en el proceso de transformación del caucho en hidrocarburos. Por su parte, el negro de carbón es un producto industrial de uso muy extendido y cuyo precio también está correlacionado con el del petróleo ya que mayoritariamente se obtiene de esta materia prima. Se trata de una tecnología sencilla, robusta y barata que además permite la instalación de plantas de reducido tamaño.



## 7 DEFINICIONES

- CAPACIDAD DEL CONDENSADOR (C): Dispositivo capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico. Se mide en faradios (F).
- ENERGÍA DEL CONDENSADOR (U): energía que acumula el condensador en forma de campo eléctrico.
- ENERGÍA SUMINISTRADA ( $E_{suministrada}$ ): energía consumida por la máquina o el proceso, también se denomina energía del combustible. Se mide en julios (J).
- ENERGÍA ÚTIL ( $E_{util}$ ): energía obtenida del funcionamiento de la máquina o del proceso. Se mide en julios (J).
- FACTOR DE POTENCIA ( $\cos \varphi$ ): se expresa como la razón entre la potencia activa P (kW) y la potencia aparente S (kVA) y puede variar de 0 a 1.
- FRECUENCIA (w): se denomina pulsación, se calcula como  $2\pi \cdot f$ , siendo f la frecuencia. Se mide en Hz
- PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI): Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de masa de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua generado en la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor. Se mide en kJ/kg.
- PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS): Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de masa de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado y, por consiguiente, se tiene en cuenta el calor desprendido en este cambio de fase. Se mide en kJ/kg.
- POTENCIA ACTIVA (P): Potencia capaz de transformar la energía eléctrica en otras formas de energía tales como: mecánica, térmica, química, etc. Se designa con la letra P y se mide en vatios (W) o kilovatios (kW).
- POTENCIA APARENTE (S): Es la potencia utilizada para la formación de los campos eléctrico y magnético de sus componentes, que fluctuará entre estos componentes y la fuente de energía. Se mide en voltiamperios (VA), aunque para aludir a grandes cantidades de potencia aparente lo más frecuente es utilizar como unidad de medida en kilovoltiamperio (kVA).
- POTENCIA REACTIVA (Q): es la componente de potencia que pulsa a 90 o -90°. Está originada por los elementos reactivos de la carga, y no genera trabajo útil a lo largo del tiempo. Se mide en kVAr.
- $\varphi$ : ángulo que forman la potencia activa (P) y la potencia aparente (S) en el triángulo de potencias tradicional.



## 8 BIBLIOGRAFÍA

1. Alcolea, S. (2011). Eficiencia Energética en la iluminación. Philips.
2. Algasa. (2014). Comparativa Combustibles. Obtenido de [www.algasa.net/6.html](http://www.algasa.net/6.html)
3. Álvarez Diez, M. (2015). *Incendio de neumáticos en Ardoncino, León. Una oportunidad para reflexionar sobre Seguridad*. Departamento de Prevención de Riesgos Laborales. León: ibsingeneria.
4. Aylón, E., Fernández-Colino, A., Murillo, R., Grasa, G., Navarro, M., García, T., & Mastra, A. (2010). Waste tyre pyrolysis: Modelling of a moving bed reactor. *Waste Management*, 2530-2536.
5. Cano Serrano, E., Cerezo García, L., & Urbina Fraile, M. (2008). Valorización Material y Energética de Neumáticos Fuera de Uso.
6. Castro, G. Reutilización, Reciclado y Disposición Final del Neumático. (Consultado el 07 de marzo de 2015)
7. Cemex. *CEMEX S.A.B. de C.V.* Obtenido de <http://www.cemex.es>. (Consultado el 08 de noviembre de 2015)
8. Calidad Ambiental. *Memoria Anual 2014*. Obtenido de <http://calidadambiental.aragon.es/> (Consultado el 05 de mayo de 2015)
9. Corchero de La Torre, S. (2012). El reciclaje de neumáticos en 2011 ahorró 218 millones de litros de petróleo. Madrid: Universidad politécnica de Madrid.
10. Ecovalor, P. S. *Sistema integrado de gestión de neumáticos usados*. Obtenido de <http://www.signus.es/es/area-comunicacion/info/publicaciones>. (Consultado el 14 de julio de 2015)
11. Eiras, J., Segovia, F., Bonilla, M., Borrachero, M., Monzó, J., & Payá, J. (2010). Conglomerados ligeros de cemento Portland con residuos de neumáticos fuera de uso. II Simposio Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción, 499-510. (Consultado el 19 de marzo de 2016)
12. Greenice. *Greenice Iluminación LED*. Obtenido de <http://www.greenice.com.es>. (Consultado el 08 de octubre de 2015)
13. Holderbank. (1997). Combustibles alternativos.
14. IDAE. *Ahorro y eficiencia energética*. Obtenido de <http://www.idae.es/index.php/idpag.20/relmenu.337/mod.pags/mem.detalle>. (Consultado el 05 de mayo de 2015)
15. i-neumáticos. Obtenido de <http://www.i-neumaticos.es/?gclid=CjwKEAjwlfO3BRDR4Pj u-O2U0SJAD88y1SOC80d5LzVZFWuOyHJawvULdp78fQzrqXP9e8sGidtRoC-dHw wcB>. (Consultado el 21 de marzo de 2016)
16. LAFARGE. *Lafarge España 2015*. Obtenido de <http://www.lafarge.com.es>. (Consultado el 08 de noviembre de 2015)
17. Legrand. (2013). Compensación de la energía reactiva y monitoreo de la calidad de la potencia. Obtenido de [www.legrand.cl](http://www.legrand.cl)
18. López, F. (2010). *Curso sobre neumáticos fuera de uso*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
19. López, F. A., Álvarez Centeno, T., & Alguacil, F. (2009). Aprovechamiento energético de residuos: el caso de los neumáticos fuera de uso. *Energía Sostenible para todos*.
20. López, F., López Delgado, A., Alguacil, F., & Manso, J. (s.f.). Situación actual del tratamiento de neumáticos fuera de uso y posibilidades de obtención de negro de humo de alta pureza. *Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas*.
21. Ministerio de Agricultura, A. y. Magrama. Obtenido de <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion->



[http://waste.ideal.es/neumaticos.htm](http://www.ingenieria.unizar.es/~y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/>. (Consultado el 05 de mayo de 2015)</a></p><p>22. Neuma Waste Ideal. <i>Waste magazine online</i>. Obtenido de Reciclaje: Neumáticos: <a href=). (Consultado el 14 de julio de 2015)

23. Neumático, Canal (22 de Marzo de 2016). *Planta de Reciclado y Recauchutado*. Obtenido de [http://www.canalneumatico.com/es/continental-crea-la-primeraplanta-de-reciclado-y-recauchutado-contilifecycle\\_652](http://www.canalneumatico.com/es/continental-crea-la-primeraplanta-de-reciclado-y-recauchutado-contilifecycle_652). (Consultado el 22 de marzo de 2016)

24. Philips. *Iluminación Philips*. Obtenido de [www.luz.philips.com](http://www.luz.philips.com). (Consultado el 07 de octubre de 2015)

25. Pikengo. NEUMÁTICOS RECAUCHUTADOS. Obtenido de <http://www.pikengo.es/s/idx/5080204/w/Neumaticos+recauchutados/s/1?display=list&AID=1&KID=2000094> (Consultado el 21 de marzo de 2016)

26. Presti, D. L. (2013). Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*.

27. Quezada V., D. (2001). Utilización de neumáticos desechados como combustible alternativo en fábricas de cemento. Talca, Chile: Universidad de Talca. Obtenido de <http://dspace.utalca.cl/bitstream/1950/158/1/29117.pdf>

28. Reciclamas, S. (2014). *Reciclamas*. Obtenido de <http://reciclamas.eu/neumaticos/>

29. RECYCLING, E. (2014). *ELDAN RECYCLING*. Obtenido de <http://www.eldan-recycling.com/>

30. Renovetec. Presupuesto Planta de Cogeneración. Obtenido de <http://www.energia.renovetec.com/centrales-de-ciclo-combinado/301-presupuesto-de-planta-de-cogeneraci%C3%B3n>. (Consultado el 21 de Marzo de 2016)

31. Sánchez Juan, R. (2012). Segunda vida de los neumáticos usados. *QuímicaViva*.

32. Sánchez Lozano, M., & Guzmán García, M. (2012). *Análisis de la Eficiencia Medioambiental del Recauchutado de Neumáticos*. Elche: Universidad Miguel Hernández.

33. TNU. *Memorias anuales TNU*. Obtenido de [www.tnu.es](http://www.tnu.es). (Consultado el 14 de julio de 2015)

34. Undri, A., Meini, S., Rosi, L., Frediani, M., & Frediani, P. (2013). Microwave pyrolysis of polymeric materials: Waste tires treatment and characterization of the value-added products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 149-158.

35. Universidad Miguel Hernández. (2012). Análisis de la eficiencia medioambiental del recauchutado de neumáticos. Elche: Cátedra para la Investigación y Formación sobre Neumáticos Reciclados. (Consultado el 21 de marzo de 2016)

36. Wik, A., & Göran, D. (2009). Occurrence and effects of tire wear particles in the environment - A critical review and an initial risk assessment. *Environmental Pollution*, 1-11.



## Trabajo Fin de Grado

Estudio de viabilidad para mejorar la eficiencia  
energética de una planta de reciclaje de  
neumáticos

### ANEXOS

Autora

Ainhoa Sancho Cubero

Director/es

Jesús Sergio Artal Sevil  
Eva Francés Pérez

# INDICE ANEXOS

|   |     |
|---|-----|
| ANEXO I. LEGISLACIÓN .....  | 52  |
| ANEXO II. PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DE ARAGÓN 2009-2015 .....                              | 54  |
| II.1 AMBITO Y OBJETO DEL PROGRAMA.....  | 54  |
| II.2 NORMATIVA DE INTERÉS.....  | 54  |
| II.3 MODELO DE GESTIÓN.....   | 55  |
| II.3.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.....   | 55  |
| II.4 ESQUEMA DEL MODELO DE GESTIÓN .....  | 56  |
| II.5 SISTEMAS INTEGRADOS DE GESTIÓN .....   | 57  |
| II.6 GESTORES AUTORIZADOS Y SUJETOS HABILITADOS PARA PROCEDER A LA GESTIÓN DE LOS NFU .....           | 58  |
| II.7 OBJETIVOS.....   | 58  |
| II.7.1 OBJETIVOS PARA LA REDUCCIÓN PROGRESIVA DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS Y DE SU PELIGROSIDAD ..... | 58  |
| II.7.2 OBJETIVOS PARA LA CORRECTA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS GENERADOS.....                              | 58  |
| II.8 LÍNEAS DE ACTUACIÓN .....  | 59  |
| II.8.1 PREVENCIÓN.....  | 59  |
| II.8.2 VALORIZACIÓN.....  | 59  |
| II.8.3 ELIMINACIÓN.....   | 59  |
| II.8.4 OTRAS MEDIDAS COMPLEMENTARIAS O DE APOYO .....   | 59  |
| ANEXO III. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE NEUMÁTICOS .....                              | 62  |
| III.1 NAVE DE PROCESO .....   | 63  |
| III.2 PROCEDIMIENTOS E INSTALACIONES ELÉCTRICAS.....  | 64  |
| ANEXO IV. APLICACIONES DEL RECICLAJE DE LOS NEUMÁTICOS .....  | 70  |
| IV.1 ESTUDIO DE UN NEUMÁTICO.....   | 70  |
| IV.2 APLICACIONES DE LOS NEUMÁTICOS ENTEROS .....   | 74  |
| IV.3 APLICACIONES DE LOS NEUMÁTICOS TRITURADOS.....   | 74  |
| IV.4 APLICACIONES EN MATERIALES BITUMINOSOS .....   | 76  |
| IV.5 APLICACIÓN NEUMÁTICO COMO COMBUSTIBLE.....   | 77  |
| IV.6 ANÁLISIS DE PROBLEMAS ENERGÉTICOS.....   | 78  |
| IV.7 FICHA TÉCNICA HORNO DE COMBUSTIÓN NEUMÁTICOS .....   | 79  |
|   | 81  |
| ANEXO V. COMPENSACIÓN REACTIVA .....  | 82  |
| V.1.1 BANCO DE CONDENSADORES.....   | 82  |
| V.2 SUSTITUCIÓN DE ILUMINACIÓN TRADICIONAL POR LED .....  | 84  |
| V.3 COGENERACIÓN.....   | 88  |
| V.3.1 FICHA TÉCNICA PLANTA DE COGENERACIÓN NEUMÁTICOS .....   | 90  |
| V.3.2 COGENERACIÓN DE RESIDUOS.....   | 93  |
| V.4 RECAUCHUTADO .....  | 95  |
| V.4.1 CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE MATERIALES PARA NEUMÁTICOS RECAUCHUTADOS .....              | 97  |
| V.4.2 COMPARATIVA ENTRE NEUMÁTICOS NUEVOS Y RECAUCHUTADOS.....  | 99  |
| V.5 TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS .....  | 100 |
| V.5.1 PIRÓLISIS.....  | 100 |
| V.5.2 INCINERACIÓN .....  | 104 |

|  |     |
|--|-----|
| V.6 OTRAS TÉCNICAS.....                | 109 |
| V.6.1 AISLAMIENTO TÉRMICO.....         | 109 |
| V.6.2 PLACAS SOLARES.....              | 109 |
| V.6.3 TECNOLOGÍAS DE REGENERACIÓN..... | 111 |

## INDICE DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| Figura II-1. Modelo de gestión de los neumáticos fuera de uso .....  | 56  |
| Figura II-2. Personas físicas o jurídicas facultadas para proceder a la gestión de los neumáticos fuera de uso en Aragón.....                              | 58  |
| Figura II-3. Objetivos cuantitativos .....   | 59  |
| Figura III-1. Esquema de gestión de los NFU entre los años 2007-2008.....  | 62  |
| Figura III-2. Layout de la planta de tratamiento de neumáticos .....   | 63  |
| Figura III-3. Recepción y descarga de los neumáticos en la planta de reciclaje.....  | 64  |
| Figura III-4. Primera fase en el reciclado de un neumático .....   | 64  |
| Figura III-5. Introducción de neumáticos en el Super Chopper .....   | 65  |
| Figura III-6. Imagen del Rasper .....  | 66  |
| Figura III-7. Fotografías de la planta de reciclado de neumáticos fuera de uso .....   | 67  |
| Figura III-8. Chips de neumáticos .....  | 67  |
| Figura III-9. Granulado de neumático .....   | 68  |
| Figura III-10. Polvo de neumático.....   | 68  |
| Figura III-11. Acero de neumático .....  | 68  |
| Figura III-12. Textil de neumáticos .....  | 68  |
| Figura IV-1. Balas de neumáticos.....  | 70  |
| Figura IV-2. Campos de fútbol de caucho.....   | 70  |
| Figura IV-3. Aditivo de caucho al betún asfáltico.....   | 70  |
| Figura IV-4. Tarifas para la gestión y tratamiento de neumáticos fuera de uso publicadas el 27 de enero del 2014 en el BOA nº 18.....                      | 73  |
| Figura IV-5. Solicitud de admisión para el tratamiento de neumáticos fuera de uso ..   | 73  |
| Figura V-1. Catálogo CYDESA batería de condensadores .....   | 83  |
| Figura V-2. Multas por energía reactiva según Orden IET/221/2013 (BOE 16/02/2013) .....  | 84  |
| Figura V-3. Requisitos de iluminación según norma UNE EN 12464-1:2002 .....  | 85  |
| Figura V-4. Cogeneración en planta de neumáticos.....  | 89  |
| Figura V-5. Características técnicas gama de equipos ALTARE Smartblock.....  | 89  |
| Figura V-6. Ficha técnica de una planta de cogeneración de neumáticos.....   | 90  |
| Figura V-7. Cogeneración con turbina de vapor .....  | 92  |
| Figura V-8. Planta de cogeneración con motor de gas y turbina de vapor.....  | 93  |
| Figura V-9. Recauchutado de un neumático .....   | 95  |
| Figura V-10. Imágenes de una planta de recauchutado.....   | 96  |
| Figura V-11. Ecuaciones para el cálculo de neumáticos nuevos y recauchutados .....   | 97  |
| Figura V-12. Comparación del coste energético asociado a materiales y al proceso de fabricación de neumáticos nuevos y de recauchutados para camión. ..... | 99  |
| Figura V-13. Comparación del coste energético asociado a materiales y al proceso de fabricación de neumáticos nuevos y de recauchutado para turismo .....  | 99  |
| Figura V-14. Proceso de pirólisis .....  | 101 |
| Figura V-15. Planta Pirólisis de neumáticos .....  | 102 |
| Figura V-16. Planta de pirólisis para flujo de 2-10 toneladas al día.....  | 103 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura V-17. Diagrama de flujo de la instalación de pirólisis.....                  | 104 |
| Figura V-18. Características físicas de paneles fotovoltaicos. Catálogo ATERSA..... | 111 |

## INDICE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla II-1. Tasas de los neumáticos de retirada en centros autorizados en el año 2015 .....                               | 57  |
| Tabla III-1. Características técnicas Super Chopper.....  | 65  |
| Tabla III-2. Características técnicas del Rasper .....  | 65  |
| Tabla III-3. Características técnicas granulador fino .....   | 66  |
| Tabla III-4. Características técnicas de los clasificadores.....  | 66  |
| Tabla III-5. Características técnicas aspiradores.....  | 66  |
| Tabla IV-1. Aplicaciones de los neumáticos reciclados .....   | 70  |
| Tabla IV-2. Composición de los neumáticos fuera de uso.....   | 71  |
| Tabla IV-3. Compuestos peligrosos que contienen los neumáticos fuera de uso .....   | 71  |
| Tabla IV-4. Razones de los conductores para cambiar de neumáticos.....  | 72  |
| Tabla IV-5. Composición inmediata y elemental de neumáticos granulados.....   | 77  |
| Tabla V-1. Comparativa iluminación actual vs iluminación LED .....  | 86  |
| Tabla V-2. Costes instalación tradicional vs instalación LED .....  | 87  |
| Tabla V-3. Amortización económica de la instalación de iluminación LED.....   | 87  |
| Tabla V-4. Estimación de pesos de diferentes tipos de neumático.....  | 98  |
| Tabla V-5. Consumo energético (en litros de petróleo) debido a los materiales en neumáticos de camión recauchutados ..... | 98  |
| Tabla V-6. Consumo energético (en litros de petróleo) debido a los materiales en neumáticos de turismo .....              | 99  |
| Tabla V-7. Análisis mineral de la ceniza de un neumático (% en peso) .....  | 105 |
| Tabla V-8. Energía contenida y emisión de CO <sub>2</sub> de diversos combustibles .....                                  | 108 |
| Tabla V-9. Análisis de las cenizas de un neumático.....   | 108 |





## **ANEXO I: LEGISLACIÓN**

## ANEXO I. LEGISLACIÓN

- Orden MAM/304/2002, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.
- Directiva 1999/31/CE del consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos
- Real Decreto 1481/2001 de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero.
- Orden AAA/661/2013 de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero.
- Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Ley 5/2013, de 11 de junio, por la que se modifican la ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación y la ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera, y Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico.
- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.
- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.
- Norma Europea prEN14243-2005 ("End-of-life-tyre-RecyclingMaterials")
- DECISIÓN DEL CONSEJO de 13 de marzo de 2006 por la que se modifican las Decisiones 2001/507/CE y 2001/509/CE con el objeto de conferir carácter obligatorio a los Reglamentos no 109 y 108 de la Comisión Económica para Europa de las NacionesUnidas (CEPE/ONU) sobre neumáticos recauchutados (2006/443/CE)
- Norma UNE-EN 12464-1:2002 Iluminación de los lugares de trabajo
- Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus instalaciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07.
- Reglamento (UE) N<sup>a</sup> 1357/2014 de la comisión de 18 de diciembre de 2014 por el que se sustituye el anexo III de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre residuos y por la que se derogan determinadas directivas.



**ANEXO II:**

**PLAN DE GESTIÓN**

**INTEGRAL DE RESIDUOS**

**DE ARAGÓN**

**2009-2015**

## ANEXO II. PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DE ARAGÓN 2009-2015

### II.1 AMBITO Y OBJETO DEL PROGRAMA

Se definen los Neumáticos Fuera de Uso (NFU) como aquellos neumáticos que según su estado, con relación a las normas de seguridad vigentes, no sean aptos para su uso sin aplicarles técnicas que alarguen su vida útil. Asimismo, se considerarán como tales las cámaras y neumáticos de rechazo de fabricación y aquellos neumáticos de los que se desprenda su poseedor, aun cuando en ellos no concurran los requisitos arriba descritos. El neumático es un residuo no peligroso (Código CER 160103) cuando el poseedor se desprenda o tenga la intención u obligación de desprendérse del mismo.

El Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre sobre la gestión de neumáticos fuera de uso, posterior a la aprobación del GIRÁ 2005-08, incorpora a nuestro ordenamiento interno el principio de responsabilidad del productor que queda obligado a hacerse cargo de la gestión de los residuos derivados de sus productos. Los productores pueden cumplir con esta obligación, directamente mediante la organización de sistemas propios de gestión, a través de la celebración de acuerdos voluntarios o convenios de colaboración o mediante la participación en sistemas organizados de gestión de neumáticos fuera de uso, autorizados por las correspondientes comunidades autónomas.

Tras la entrada en vigor del RD 1619/2005, existen tres alternativas en la gestión de los neumáticos fuera de uso (el depósito en vertedero de NFU está prohibido):

- a) Recauchutado. Actualmente se realiza principalmente para los neumáticos usados de camión y maquinaria pesada de obras públicas.
- b) Tratamiento destinado a su reciclado para la obtención de materias primas utilizadas en otros procesos de producción industrial.
- c) Valorización para la generación de energía.

Mediante Ley del Gobierno de Aragón se declaró –entre otras actividades de gestión de residuos– servicio público de titularidad autonómica en el territorio de la C. A. de Aragón la valorización y eliminación de neumáticos fuera de uso. La justificación, alcance, configuración, regulación normativa, situación y grado de desarrollo de los distintos servicios públicos de titularidad autonómica de valorización o eliminación de residuos se describen detalladamente en el anexo 2.

Los NFU, por su peculiaridad, requieren soluciones específicas que justifican que sean objeto de un programa específico en el Plan GIRÁ.

### II.2 NORMATIVA DE INTERÉS

La normativa estatal relativa a los Neumáticos Fuera de Uso se concreta en el Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso. Del contenido de dicho RD hay que destacar que:

- Obliga a los productores de neumáticos a hacerse cargo de la gestión de los residuos derivados de su uso, y de financiarla. Admite la posibilidad de que estas obligaciones

sean asumidas a través de un Sistema Integrado de Gestión (SIG). También se establecen las obligaciones de los gestores y los generadores y poseedores de NFU.

- Exige la recogida y correcta gestión de los NFU generados a partir del 4 de enero de 2007, momento en que el citado Real Decreto entró en vigor, disponiendo que los NFU acumulados preexistentes deben ser gestionados por su poseedor.
- Se establece un régimen de autorizaciones y la obligación de informar a las autoridades ambientales de los datos estadísticos sobre la puesta en los mercados de neumáticos y de NFU recogidos y gestionados.
- Prohibió el depósito en vertedero de NFU enteros o troceados a partir del 16/07/2006.

Al amparo de lo establecido en este reglamento se han autorizado en nuestra Comunidad Autónoma dos Sistemas Integrados de Gestión de Neumáticos Fuera de Uso.

El artículo 36 de la Ley 26/2003, de 30 de diciembre, de Medidas Tributarias y Administrativas declara servicio público una serie de actividades de gestión de residuos: "1. Conforme a lo regulado por el artículo 12.3 de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, se declaran como servicio público de titularidad autonómica las siguientes actividades de gestión de residuos en la Comunidad Autónoma de Aragón:...c) Valorización y eliminación de neumáticos fuera de uso..."

El Decreto 40/2006, de 7 de febrero, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el Reglamento de la producción, posesión y gestión de los neumáticos fuera de uso y del régimen jurídico del servicio público de la valorización y eliminación de neumáticos fuera de uso en la Comunidad Autónoma, regula y establece las pautas para la adecuada gestión de los neumáticos fuera de uso, generados o gestionados en Aragón. En particular, se regulan las obligaciones de los productores de neumáticos derivadas de la puesta en mercado de productos que con su uso se transforman en residuos, la actividad de los productores de neumáticos fuera de uso, de los poseedores y de los gestores de los mismos, así como las condiciones documentales para constatar la transferencia de estos residuos por la que se regulan los documentos de aceptación.

El Reglamento dota de contenido a los principios básicos y generales en la gestión, como son los principios de jerarquía, proximidad y suficiencia, se establece el régimen de autorizaciones para los flujos de NFU que entran o salen del territorio de la Comunidad Autónoma y las potestades de inspección, vigilancia y control de la Administración de la Comunidad Autónoma de Aragón.

## II.3 MODELO DE GESTIÓN

### II.3.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

El modelo de gestión desarrollado en el presente Plan para los NFU tiene en cuenta las siguientes circunstancias:

- a) La declaración de servicio público de titularidad autonómica de la valorización y eliminación de los NFU en Aragón.

- b) La constitución de sistemas integrados de gestión como consecuencia de la introducción del principio de responsabilidad del productor en la normativa de aplicación.
- c) La apuesta del Gobierno de Aragón por la valorización material –reciclado- de la totalidad de los NFU generados en Aragón que no sean reutilizados, en respuesta a las demandas de gran parte de los agentes sociales durante la elaboración del GIRA 2005-08.

La primera prioridad es la minimización, es decir, la reducción de la cantidad de NFU generados. En segundo lugar se ha fomentar la reutilización, el recauchutado de los neumáticos pesados de camión y maquinaria de obras públicas. La totalidad de la fracción que no sea reutilizada (salvo aquellos neumáticos que hayan sufrido alteraciones en su composición o estado que lo impidan) será valorizada materialmente –reciclada- en las instalaciones del servicio público.

Para la gestión del servicio público se establece la creación de un único Centro Integral de Gestión de Neumáticos Fuera de Uso ubicado en Zaragoza atendiendo a la zona de mayor producción de los mismos. La modalidad de gestión indirecta adoptada es la concesión de gestión de servicio público.

El proceso de valorización material tiene por objeto la trituración de los NFU para la separación de acero, caucho y textiles y la comercialización del producto obtenido, con diversas granulometrías, para su utilización en variadas aplicaciones tales como: revestimientos para escalones, losetas y adoquines, ruedas para carretillas; paneles acústicos, amortiguadores anti vibración, absorción de aceites y grasas, piezas para utilajes, alfombras, aislantes de vehículos o losetas de goma; césped artificial, campos de juegos, suelos de atletismo, pistas de paseo y bicicleta; cables de freno, compuestos de goma, suelas de zapatos, bandas de retención de tráfico, compuestos para navegación y mezclas bituminosas.

#### II.4 ESQUEMA DEL MODELO DE GESTIÓN

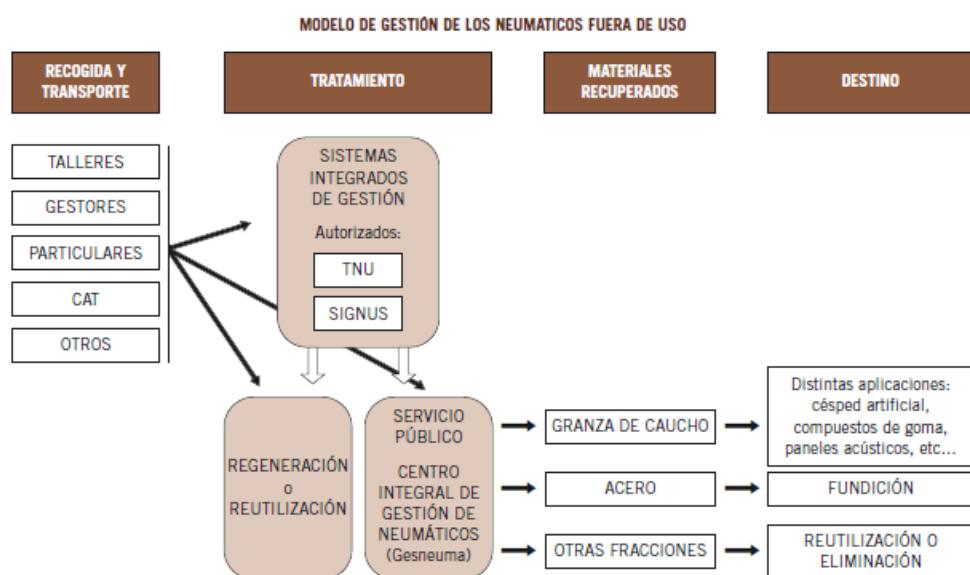


Figura II-1. Modelo de gestión de los neumáticos fuera de uso

## II.5 SISTEMAS INTEGRADOS DE GESTIÓN

El Real Decreto 1619/2005 de 30 de diciembre, sobre gestión de neumáticos fuera de uso obliga a los productores a garantizar la recogida y correcta gestión de tantos NFU como neumáticos se introduzcan anualmente en el mercado de reposición.

De esta forma, los principales fabricantes de neumáticos acordaron crear una entidad operacional sin ánimo de lucro que garantizase la correcta gestión y valorización de los NFU bajo su responsabilidad.

En Aragón están autorizados dos Sistemas Integrados de Gestión: SIGNUS, sistema integrado de gestión de neumáticos usados (desde el 27 de octubre de 2006) y TNU, tratamiento de neumáticos usados (desde el 27 de abril de 2007).

Estas autorizaciones y los convenios suscritos con el Gobierno de Aragón les obligan a recoger gratuitamente el 100% de los NFU generados en Aragón y puestos a disposición de los SIG por los puntos de generación, con independencia de su estado de desgaste y que la marca de neumático esté adherida o no al SIG; y a garantizar que se suministrará al Centro de Gestión Integral de NFU de la Comunidad Autónoma de Aragón la cantidad total de estos residuos gestionados por los SIG.

Al cambiar los neumáticos gastados por unos nuevos, se debe pagar unas tasas como se aprecia en la Tabla II-1:

Tabla II-1. Tasas de los neumáticos de retirada en centros autorizados en el año 2015

| CATEGORÍA | TIPO NEUMÁTICO  | PESO         | TASA SIGNUS (€/ud.) | TASA TNU (€/ud.) |
|-----------|---|--------------|---------------------|------------------|
| A         | Moto, Scooter, Ciclomotor   | Todos        | 0,88                | 0,75             |
| B         | Turismo   | Todos        | 1,46                | 1,21             |
| C         | Camioneta, 4x4, suv   | Todos        | 2,55                | 2,21             |
| D         | Camión , autobús  | Todos        | 12,28               | 9,88             |
| E1        | Agricultura, obra pública, industrial, macizos, aeronaves, quad, otros* | 0,01 – 5     | 0,38                | 0,35             |
| E2        |   | 5,01 – 20    | 2,23                | 2,03             |
| E3        |   | 20,01 – 50   | 4,89                | 4,39             |
| E4        |   | 50,01 – 100  | 11,94               | 8,94 – 10,44     |
| E5        |   | 100,01 – 200 | 23,27               | 21,77            |
| E6        |   | 200,01 – 450 | 39,74               | 38,24            |
| E7        |   | >450         | 84,86               | -                |

\*Los neumáticos cuyo diámetro sea superior a más de 1.400 mm, quedan excluidos del RD 1619/2005

\* Las tasas por la gestión de los neumáticos son valores sin IVA

En la Tabla II-1 se muestran los distintos precios que los usuarios de vehículos abonan al cambiar sus neumáticos. Se muestran los diferentes tipos de neumáticos que hay en el mercado y sus costes. Este precio se paga para cubrir los gastos que el SIG (Sistema Integrado de Gestión), al ser el intermediario entre los centros autorizados de recogida y los centros de tratamiento de neumático (transporte de recogida, transporte al centro de tratamiento, etc.)

## II.6 GESTORES AUTORIZADOS Y SUJETOS HABILITADOS PARA PROCEDER A LA GESTIÓN DE LOS NFU

| VALORIZACIÓN Y ELIMINACIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO  |  |
|--|--|
| CENTRO INTEGRAL DE GESTIÓN DE NFU  |  |
| Gestores de NFU que realizasen operaciones de gestión de NFU antes de la entrada en vigor de la Ley 26/2003 (01.01.04) y hasta que sus derechos se extingan o revoquen por las causas previstas legalmente |  |
| Actividades de gestión de NFU llevadas a cabo por sus propios productores debidamente autorizados  |  |
| OTRAS OPERACIONES DE GESTIÓN   |  |
| Gestores autorizados de la Comunidad Autónoma de Aragón  |  |
| SIG autorizados en la Comunidad Autónoma de Aragón   |  |

Figura II-2. Personas físicas o jurídicas facultadas para proceder a la gestión de los neumáticos fuera de uso en Aragón.

## II.7 OBJETIVOS

Los objetivos pueden dividirse en:

- Objetivos para la reducción progresiva de la generación de residuos y de su peligrosidad.
- Objetivos para la correcta gestión de los residuos generados.

### II.7.1 OBJETIVOS PARA LA REDUCCIÓN PROGRESIVA DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS Y DE SU PELIGROSIDAD

- Fomento de la prevención y minimización de la producción de NFU.
- Información y sensibilización.

### II.7.2 OBJETIVOS PARA LA CORRECTA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS GENERADOS

- El aprovechamiento máximo de los recursos contenidos en los NFU mediante el recauchutado, el reciclado y la valorización material.
- Promoción del recauchutado.
- La no valorización térmica de los NFU en Aragón.
- Fomento de los mercados secundarios para los productos reciclados.
- Incorporación de uso de caucho recuperado de los NFU en la obra pública.
- Limitar la utilización de los vertederos a la fracción no valorizable.
- Formación, información y sensibilización de empresarios y trabajadores y ciudadanos en general.

|   | 2012           | 2015  |  |
|---|----------------|-------|--|
| Reducción de la generación  | ≥ 5%           | ≥ 8%  | En peso respecto a lo generado en 2008   |
| Reutilización o regeneración  | ≥ 15%          | ≥ 20% | En peso respecto al total generado en el año   |
| Valorización material de acero y caucho   | 100%           | 100%  | Del tonelaje recogido y gestionado valorizable, que no sea reutilizado o regenerado  |
| Valorización energética   |                |       | No se contempla en Aragón  |
| Eliminación   |                |       | La eliminación en vertedero de NFU, enteros o troceados, está prohibida. Sólo se contempla para los rechazos del reciclado |
| NFU gestionados en las instalaciones del servicio público. (Umbral inferior o masa crítica) | ≥ 13.000 t/año |       | Criterios de autosuficiencia y viabilidad técnica económica  |
| Recogida controlada y correcta gestión  | ≥ 95%          | ≥ 98% | Toneladas generadas y/o gestionadas en Aragón  |
| Control de entradas y salidas de NFU de la C. A. de Aragón                                  | ≥ 95%          | 100%  | Trasladados  |

Figura II-3. Objetivos cuantitativos

## II.8 LÍNEAS DE ACTUACIÓN

### II.8.1 PREVENCIÓN

- Realización de campañas dirigidas a conductores destinadas a alargar la vida útil de los neumáticos.
- Fomento de iniciativas de I+D+i destinadas a la reciclabilidad de los neumáticos.
- Fomento del uso de neumáticos recauchutados en los vehículos pesados del Parque Móvil de la Diputación General y de la maquinaria de obras públicas.

### II.8.2 VALORIZACIÓN

- Fomento de I+D+i en alternativas a posibles usos de polvo de caucho recuperado de los NFU, incluyendo su uso en obra pública.
- Promoción de la incorporación de polvo de caucho recuperado en obras públicas, en particular en carreteras a través de los pliegos de prescripciones administrativas y técnicas que rigen los procedimientos de licitación pública.
- No se contempla la valorización energética de los NFU en Aragón.
- Aplicación de las MTD en el Centro Integral de Gestión de NFU.

### II.8.3 ELIMINACIÓN

- Los NFU no serán eliminados en vertedero, lo prohíbe la normativa vigente. La eliminación sólo se contempla para los rechazos del tratamiento de reciclado.

### II.8.4 OTRAS MEDIDAS COMPLEMENTARIAS O DE APOYO

- Acuerdos con el sector para obtener los datos de puesta en el mercado de neumáticos y conocimiento de los flujos de neumáticos fuera de uso.
- Coordinación entre los SIG de NFU con los de Vehículos Fuera de Uso (SIGRAUTO).
- Construcción de un aula medioambiental en las instalaciones del servicio público.
- Coordinación de las actuaciones de los SIG por medio de convenios específicos.





## **ANEXO III:**

# **CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE NEUMÁTICOS**

### ANEXO III. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE NEUMÁTICOS

La planta de reciclaje de neumáticos que se ha visitado, consta de una planta tecnológica de 4.000 m<sup>2</sup>, con tecnología punta y donde se almacenan los neumáticos fuera de uso de la comunidad autónoma de Aragón. En su pleno rendimiento, puede reciclar la cantidad de 30.000 toneladas de neumáticos al día.

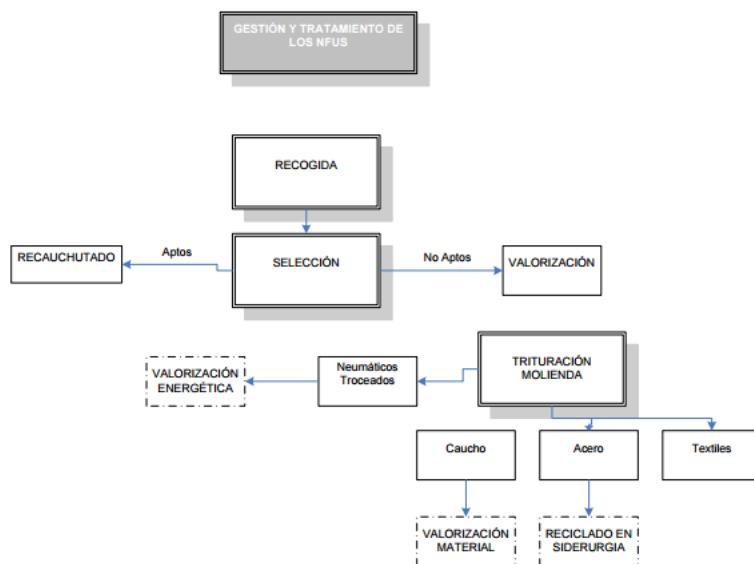


Figura III-1. Esquema de gestión de los NFU entre los años 2007-2008

La organización de la planta de reciclaje de neumáticos atendiendo a su uso se configura de la siguiente manera, superficie total de 28.690 m<sup>2</sup>:

- Edificio de Nave de proceso: 4.000 m<sup>2</sup>

|                                       |                                   |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Zona maquinaria: 2.432 m <sup>2</sup> | Vestuarios: 49 <sup>2</sup>       |
| Comedor: 60 m <sup>2</sup>            | Almacén: 64 m <sup>2</sup>        |
| Sala mantenimiento: 64 m <sup>2</sup> | Sala compresor: 16 m <sup>2</sup> |
| Sala bombas: 16 m <sup>2</sup>        | Fosos: 1.300 m <sup>2</sup>       |

- Oficinas: 374.71 m<sup>2</sup>

|                                |                                 |                              |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Pasillos: 84 m <sup>2</sup>    | Laboratorio: 110 m <sup>2</sup> |                              |
| Despacho: 74,71 m <sup>2</sup> | Baños: 16 m <sup>2</sup>        | Recepción: 90 m <sup>2</sup> |

- Casetas del grupo de bombeo para protección contra incendios y centro de transformación: 39 y 36.66 m<sup>2</sup>
- Casetas de control de accesos.

### III.1 NAVE DE PROCESO

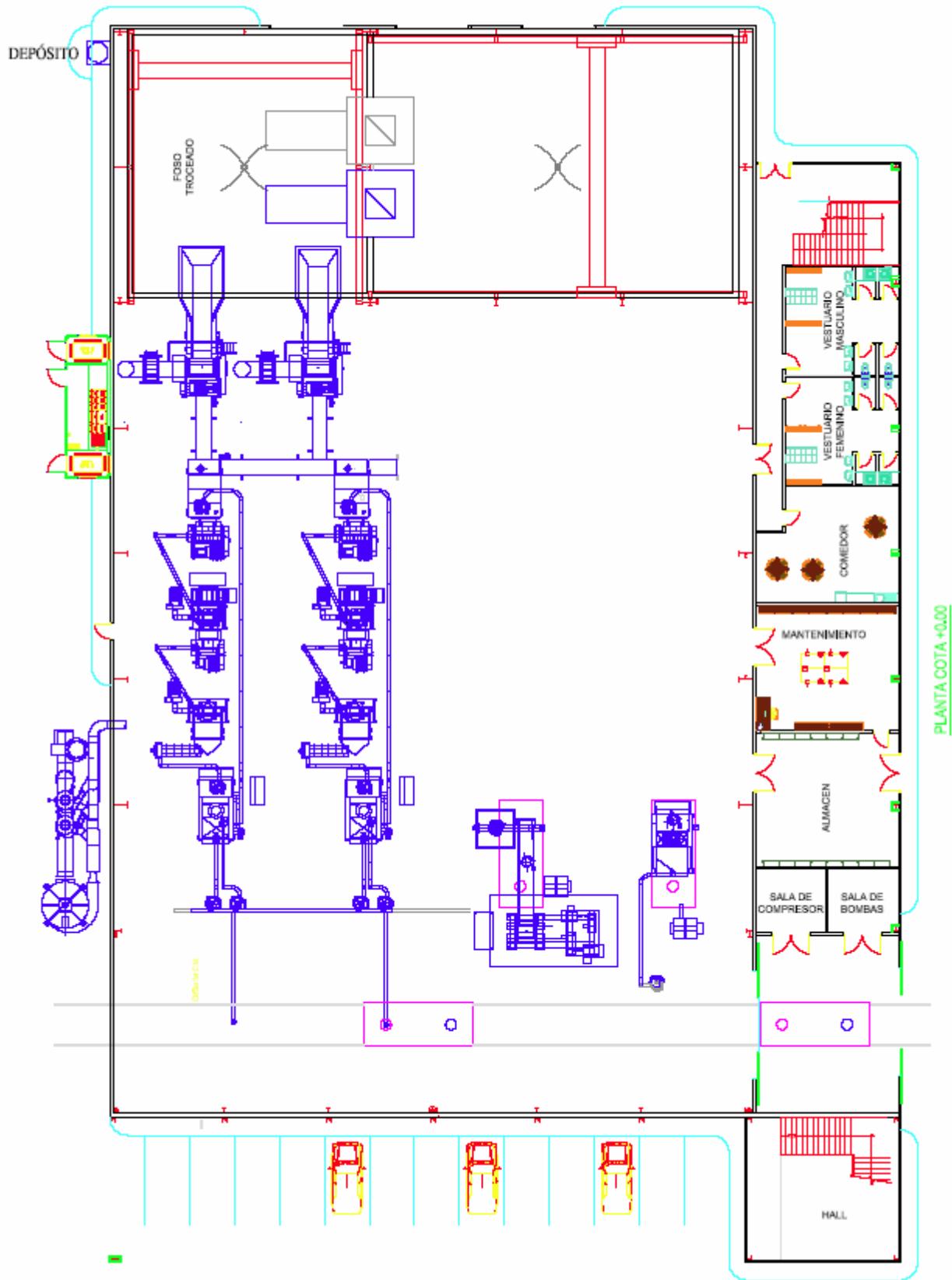


Figura III-2. "Layout" de la planta de tratamiento de neumáticos

### III.2 PROCEDIMIENTOS E INSTALACIONES ELÉCTRICAS

En la empresa visitada, el objetivo es tomar un neumático y reducir su tamaño lo suficiente mediante una combinación de máquinas para obtener los diferentes materiales de salida y así obtener el máximo aprovechamiento del reciclado de estos neumáticos.

Primero se hace una recepción de los neumáticos fuera de uso, enteros o troceados que son almacenados en la campa exterior al aire libre.



Figura III-3. Recepción y descarga de los neumáticos en la planta de reciclaje

El almacén de neumáticos fuera de uso se encuentra situado a una distancia respecto a zonas forestales o herbáceas u otra instalación industrial que proporcione suficiente seguridad frente a la propagación de incendios, sin perjuicio del cumplimiento de las distancias exigidas por otras disposiciones vigentes. En la zona destinada a su almacenamiento solo se encuentran neumáticos fuera de uso sin mezclarse con otros residuos o materiales.

Los apilamientos de los neumáticos enteros almacenados se realizan en pilas libres de tres metros de altura y se disponen de forma segura para evitar desprendimientos. Después, se realiza la fragmentación del neumático en gránulos y separación de componentes (Acero y fibras).



Figura III-4. Primera fase en el reciclado de un neumático

Se toman los neumáticos que se encuentran almacenados en la campa exterior con un pulpo y se van introduciendo en la máquina "Super Chopper". Es un proceso puramente mecánico y por lo tanto los productos resultantes son de alta calidad limpios de todo tipo de impurezas, lo que facilita la utilización de estos materiales en nuevos procesos y aplicaciones. La trituración con sistemas mecánicos es, casi siempre, el paso previo en los diferentes métodos de recuperación y rentabilización de los residuos de los neumáticos.

Tabla III-1. Características técnicas "Super Chopper"

| CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS | MODELO SC2118/250    |
|--------------------------|----------------------|
| Motor Eléctrico          | 250 kW               |
| Rotor                    | 2.100 mm/0-21 rpm    |
| Cuchillas                | 28                   |
| Capacidad / hora         | Sobre 20.000 kg/hora |
| Peso de la máquina       | 24.000 kg            |



Figura III-5. Introducción de neumáticos en el "Super Chopper"

La siguiente etapa del reciclado del neumático se basa en la granulación del caucho triturado. Para este proceso se utiliza una máquina que se llama "Rasper".

Tabla III-2. Características técnicas del "Rasper"

| CARACTERÍSTICAS               | MPR200           |
|-------------------------------|------------------|
| Rotor                         | 2.000 mm/144 rpm |
| Cuchillas                     | 51               |
| Motor                         | 2x110 kW/750 rpm |
| Apertura a la cámara de corte | 600x2000 mm      |



Figura III-6. Imagen del "Rasper"

Cuando el material sale del "Rasper" hay una fase de micronización del caucho granulado. En esta parte se alimenta la máquina vía silo (V4) para asegurarse de la utilización óptima de la capacidad.

Tabla III-3. Características técnicas granulador fino

|                 |                  |
|-----------------|------------------|
| CARACTERÍSTICAS | FG1504           |
| Rotor           | 1.425 mm/430 rpm |
| Cuchillas       | 24               |
| Capacidad       | 4.500 kg/hora    |
| Peso            | 7.750 kg         |

Después de las diferentes etapas de trituración, se separan los diferentes materiales, primero en una etapa separando el acero del textil liberado y de la goma granulada.

Después, en una segunda etapa separa la goma granulada del textil.

Tabla III-4. Características técnicas de los clasificadores

| CARACTERÍSTICAS     | PC 10T                     | PC15                       |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|
| Área de proyección  | 1,6 m <sup>2</sup>         | 4,8 m <sup>2</sup>         |
| Número de pantallas | 2                          | 4                          |
| Número de salidas   | 2                          | 2                          |
| Capacidad           | 3.000 kg/hora              | 3.000 kg/hora              |
| Volumen aire        | 4.000 m <sup>3</sup> /hora | 2.000 m <sup>3</sup> /hora |
| Motor               | 0,75 kW                    | 1,5 kW                     |

Por último los aspiradores están diseñados para separar el textil de la goma granulada que aún queda al final y clasifica la goma granulada en tres tamaños y polvo.

Tabla III-5. Características técnicas aspiradores

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| CARACTERÍSTICAS                           | UP1500                      |
| Área de proyección                        | 12 m <sup>2</sup>           |
| Volumen aire                              | 11.000 m <sup>3</sup> /hora |
| Potencia tambor de alimentación           | 0,37 kW                     |
| Potencia transportadora y esclusa de aire | 0,55 W                      |
| Potencia de la pantalla                   | 1,5 kW                      |
| Número de salidas                         | 3                           |
| Capacidad                                 | 2.000 kg/hora               |



Figura III-7. Fotografías de la planta de reciclado de neumáticos fuera de uso

Después de todo el proceso de trituración y separación se obtienen los diferentes materiales de salida:

### **TROZOS DE NEUMÁTICOS (50-300 mm)**

Los neumáticos son troceados en tiras con un tamaño entre 50 y 300 mm.

### **CHIPS**

Después de obtener los trozos de neumáticos pasan por otra máquina “Rasper” que elimina el 98% de la goma granulada. Los chips pueden ser usados para TDF (“Tyre Derived Fuel”) el cual es un fuel usado para plantas de calor y cementeras.



Figura III-8. Chips de neumáticos

### **GRANULADO**

El material que sale del “Rasper” pasa posteriormente por un granulador fino. Por un lado elimina todo el textil posible que proviene de la goma granulada. Esto consigue mantener una alta capacidad ya que el textil de otra manera bloquearía las pantallas y de este modo reduciría

la capacidad. Después de la granulación y la separación de acero se consigue un granulado de goma textil con una pureza de hasta el 99,9%. La distribución del tamaño final depende de las necesidades específicas. Por ejemplo, de 0,8 a 1,6 mm y de 1,6 a 3,2 mm. Estos granulados se utilizan para campos deportivos y céspedes artificiales de campos de fútbol, golf y pistas de atletismo.



Figura III-9. Granulado de neumático

## POLVO

Con el granulado obtenido antes, se saca el polvo a través de tamizadoras. El polvo es por ejemplo, utilizado en la industria del asfalto para "Caucho pavimentado de asfalto".



Figura III-10. Polvo de neumático

## ACERO

El acero obtenido del reciclaje del neumático fuera de uso sale habitualmente con un 99% libre de impurezas, y tiene una elevada densidad de unos  $700 \text{ kg/m}^3$ .



Figura III-11. Acero de neumático

## TEXTIL

El textil obtenido del proceso de reciclaje, puede ser comprado o recogido para los recicladores de neumático. No se usa tan a menudo como el granulado de caucho o acero, pero todavía puede ser utilizado para diversos fines. El textil obtenido tiene un valor muy alto de combustión eficaz, ya que consiste en nylon y polvo de caucho. Por lo tanto, se puede mezclar con otros materiales con el fin de aumentar el valor eficaz de la combustión de ese material. A modo de ejemplo - la industria del cemento mezcla el textil con combustible alternativo con menor valor eficaz de combustión (por ejemplo, madera, cartón, papel, plástico). Por último, el textil puede ser utilizado como aislante de ruido y para reducir la vibración en las plantas industriales.



Figura III-12. Textil de neumáticos



## **ANEXO IV:**

# **APLICACIONES DEL RECICLAJE DE LOS NEUMÁTICOS**

## ANEXO IV. APPLICACIONES DEL RECICLAJE DE LOS NEUMÁTICOS

En la planta visitada, el principal material que se obtiene del neumático es el caucho, un compuesto utilizado bien de manera individual o combinado con otros materiales y sus aplicaciones más demandadas son las siguientes:

Tabla IV-1. Aplicaciones de los neumáticos reciclados

| APLICACIONES                                     | GRANULOMETRÍA DEL CAUCHO UTILIZADO | PORCENTAJE |
|--|------------------------------------|------------|
| Bases elásticas en pavimentos deportivos         | 1,5-5,0 mm                         | 13,4       |
| Campos de hierba artificial                      | 0,5-2,0 mm                         | 60,0       |
| Pavimentos multiuso                              | 1,5-4,0 mm                         | 1,3        |
| Suelos de seguridad                              | 1,5-4,0 mm                         | 11,3       |
| Aislamientos acústicos y contra ruido de impacto | 0,5-1,5 mm                         | 3,3        |
| Pistas de atletismo                              | 1,5-4,0 mm                         | 5,0        |
| Industrias del caucho y asfaltos modificados     | 0,0-0,4 mm                         | 5,7        |

APLICACIONES DE LOS NEUMÁTICOS ENTEROS



Figura IV-1. Balas de neumáticos

APLICACIONES DE LOS NEUMÁTICOS TRITURADOS



Figura IV-2. Campos de fútbol de caucho

APLICACIONES EN MATERIALES BITUMINOSOS



Figura IV-3. Aditivo de caucho al betún asfáltico

### IV.1 ESTUDIO DE UN NEUMÁTICO

Actualmente, existe una gran variedad de tipos de neumáticos, que se pueden distribuir según: construcción (diagonal o radial); su uso de cámara (con cámara, sin cámara) y según tipo de vehículo o máquina para el cual se fabrica. Según esta última clasificación se puede encontrar neumáticos para:

- Automóviles como los turismos, furgonetas y pequeños vehículos
- Dos ruedas: para motos, scooter, bicicletas, competición, etc.
- Neumáticos profesionales: camiones, autobuses, máquinas agrícolas, etc.

Los neumáticos varían según utilización y fabricante. Sin embargo, la composición de los distintos fabricantes es muy similar para todos los casos.

Tabla IV-2. Composición de los neumáticos fuera de uso.

| NEUMÁTICOS                  |                       |                  |                                 |
|-----------------------------|-----------------------|------------------|---------------------------------|
|                             | MATERIALES            | CARACTERÍSTICAS  | FUNCIÓN                         |
| Composición                 | Caucho                | 45 – 47 %        | Estructural-deformación         |
|                             | Negro de carbono      | 21,5 – 22 %      | Mejora propiedades físicas      |
|                             | Textil                | 5,5 % (Turismos) | Formación esqueleto             |
|                             | Acero                 | 16,5 – 25 %      | Formación esqueleto estructural |
|                             | Óxido de zinc         | 1 – 2 %          | Catalizador                     |
|                             | Azufre                | 1 %              | Agente vulcanizante             |
|                             | Aditivos              | 5 – 7,5 %        |                                 |
| Metales Pesados             | Cobre, Cadmio y plomo | Trazas           |                                 |
| Poder Calorífico Superior   |                       | 32 – 34 MJ/kg    |                                 |
| Temperatura de autoignición |                       | 400 °C           |                                 |
| Peso Vehículos livianos     |                       | 6,5 – 11 kg      |                                 |
| Peso camiones               |                       | 50 – 80 kg       |                                 |

El componente mayoritario de un neumático es el caucho. En cuanto a los textiles y los metales que forman parte del neumático, se utilizan cordones de acero y tela para reforzar el compuesto del caucho y proporcionar resistencia. Tanto la tipología como los porcentajes del resto de componentes minoritarios, dependen de cada fabricante. Estos componentes son: aditivos y compuestos de azufre – agente vulcanizador que entrelaza los polímeros del caucho y otros componentes peligrosos.

Tabla IV-3. Compuestos peligrosos que contienen los neumáticos fuera de uso

| COMPOSICIÓN                                 | %  |
|---|--|
| Compuestos de cobre                         | Aprox. 0,02                                    |
| Compuestos de cadmio                        | Máx. 0,001                                     |
| Compuestos de zinc                          | Aprox. 1                                       |
| Compuestos de plomo                         | Máx. 0,005                                     |
| Ácidos (En soluciones o en forma sólida)    | Aprox. 0,3                                     |
| Compuestos organohalogenados                | Máx. 0,10                                      |
| Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) | 0 (para fabricados después de 1 enero de 2010) |

En España, en 2001 se aprueba el I Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso 2001-2006. En esa fecha, no existía una normativa específica que regulara este residuo, ni existía ningún sistema de gestión de NFUs, donde apareció la figura de los Sistemas Integrados de Gestión (SIGs). Ahora, se encuentra en vigor el II Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso 2008-2015 que forma parte del plan integral nacional de residuos (PNIR) 2008-2015.

Los Sistemas Integrados de Gestión (SIG), tienen como fin organizar la recogida y la recuperación ecológicamente de NFUs, usando las soluciones más económicas. En España los dos SIG de NFUs son SIGNUS y TNU. Ambos SIG cobran a los fabricantes adscritos respectivamente por cada neumático puesto por primera vez en el mercado. Los costes aplicables a la gestión de los NFU están al amparo del Real Decreto 1619/2005.

En España, se han realizado estudios sobre la durabilidad de los neumáticos, según los datos en España se tarda más en sustituir los neumáticos que en otros países de la comunidad europea, la media en Europa para sustituir los neumáticos está en los 42.639 km. Las marcas preferidas por los españoles y que más duran son Michelin, Continental, Goodyear, Sava... Dentro de las razones más comunes en España para realizar la sustitución de neumáticos se encuentran:

Tabla IV-4. Razones de los conductores para cambiar de neumáticos

| RAZONES PARA CAMBIAR NEUMÁTICOS     | % ESPAÑA |
|-------------------------------------|----------|
| Gastados                            | 73       |
| Mayor seguridad / confort           | 16       |
| Consejo taller                      | 16       |
| Consejo fabricante                  | 3        |
| Reventón inesperado                 | 2        |
| Reventón por obstáculo              | 5        |
| Defectos neumáticos                 | 5        |
| Tras accidente                      | 1        |
| Cambio de marca o tipo de neumático | 1        |
| Otras razones                       | 3        |

Un neumático desgasta un 15% de goma antes de ser reciclado. Un neumático fuera de uso que llega a planta tiene un peso de media en torno a 7 – 10 kg.

## ANEXO II

**Tarifas del servicio público de valorización y eliminación de neumáticos fuera de uso en la Comunidad Autónoma de Aragón.**

| <b>Aplicables a Remesas</b> | <b>Epígrafe</b>  | <b>Tarifa (IVA excluido)</b> |
|-----------------------------|--|------------------------------|
|                             | 1. Remesa de neumáticos fuera de uso pequeños o medianos enteros     | 97,54 €/Tm                   |
|                             | 2. Remesa de neumáticos fuera de uso pequeños o medianos pretratados | 92,67 €/Tm                   |
|                             | 3. Remesa de neumáticos fuera de uso grandes enteros o pretratados   | 126,94 €/Tm                  |

| <b>Aplicables a Unidades</b> | <b>Epígrafe</b>  | <b>Tarifa (IVA excluido)</b> |
|------------------------------|--|------------------------------|
|                              | 4. Gestión administrativa y emisión de certificados de gestión para neumáticos fuera de uso entregados en unidades | 6,90 €/Entrega               |
|                              | 5. Unidad de neumáticos fuera de uso pequeños o medianos   | 0,84 €/Ud                    |
|                              | 6. Unidades de neumáticos fuera de uso grandes   | 5,72 €/Ud                    |

Figura IV-4. Tarifas para la gestión y tratamiento de neumáticos fuera de uso publicadas el 27 de enero del 2014 en el BOA nº 18

|   |   |                     |                     |               |       |
|---|---|---------------------|---------------------|---------------|-------|
| <b>DOC. 1</b>   | <b>SOLICITUD DE ADMISIÓN<br/>EN PLANTA DE SERVICIO PÚBLICO DE VALORIZACIÓN Y<br/>ELIMINACIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO</b> |                     |                     |               |       |
| FECHA SOLICITUD   | Nº DE ALBARÁN   | Nº ORDEN ACEPTACIÓN |                     |               |       |
| <b>DATOS DEL USUARIO DEL SERVICIO PÚBLICO</b>   |   |                     |                     |               |       |
| Nombre o razón social:  |   | NIF:                |                     |               |       |
| Dirección:  |   | Teléfono:           |                     |               |       |
| Localidad:  | Provincia:  | Fax:                |                     |               |       |
| Persona contacto:   | Correo electrónico:   |                     |                     |               |       |
| <b>DATOS DEL TRANSPORTISTA</b>  |   |                     |                     |               |       |
| Nombre o razón social:  |   | NIF:                |                     |               |       |
| Código transportista:   |   | Teléfono:           |                     |               |       |
| <b>CARGA ESTIMADA</b>   |   |                     |                     |               |       |
| TIPO NEUMÁTICO FUERA DE USO<br>Cód. L.E.R. 16 01 03   | REMESSA   |                     | UNIDADES (< 50 Uds) |               | TOTAL |
| Pequeños o medianos enteros   | Peso (Ton)  | Tarifa (€/Ton)      | Unidades            | Tarifa (€/Ud) |       |
| Pequeños o medianos pretratados   |   | 107,29              |                     | 0,92          |       |
| Grandes enteros o pretratados   |   | 101,94              |                     | —             |       |
| Grandes enteros o pretratados (mas de 30% de fragmentos mayores de 100 mm)                                      |   | 139,63              |                     | 6,29          |       |
| Recargo cuando el peso sea inferior al límite   |   | 30%                 |                     | —             |       |
| Recargo por previa separación de materiales y componentes   |   | 30%                 |                     | —             |       |
| Gestión administrativa y emisión de certificados de gestión para neumáticos fuera de uso entregados en unidades | —   |                     | 7,59 €/Entrega      |               |       |
|   | TOTAL (€) IVA incluido  |                     |                     |               |       |

\* Los campos coloreados serán cumplimentados por el S.P.

Figura IV-5. Solicitud de admisión para el tratamiento de neumáticos fuera de uso

## IV.2 APLICACIONES DE LOS NEUMÁTICOS ENTEROS

Arrecifes artificiales: se espera que los neumáticos usados en la creación de arrecifes artificiales puedan perdurar más de 30 años. Los neumáticos sumergidos en agua marina se encuentran en un medio estable químicamente y protegidos de la radiación ultravioleta, lo que limita la cantidad de lixiviados contaminantes.

Macizos de suelo reforzado: los NFU agrupados en sistemas de tipo geomalla permiten la formación de macizos de suelo reforzado mediante la interposición de capas superpuestas de neumáticos enteros llenos de material granular compactado. Las estructuras neumático-suelo muestran propiedades mecánicas superiores a los suelos de origen y pueden presentar diferentes aplicaciones específicas: como muros de sostenimiento de tierras, muros de estabilización en pie de taludes, muros antierosión en márgenes de cauces fluviales, rellenos ligeros con terraplenes.

Balas de neumáticos: las balas prismáticas de 1 tonelada de peso se fabrican con prensas hidráulicas, que compactan entre 100 y 125 neumáticos por unidad. Las dimensiones habituales son 75 cm. 150 cm x 135 cm. Son una buena alternativa a los gaviones metálicos en la construcción de estructuras de contención y presas. Se han utilizado con éxito en la estabilización de márgenes fluviales degradados por la erosión del agua.

Barreras acústicas: los neumáticos constituyen la base de la estructura y se recubren con tierra, de esta forma no les afecta la luz. Como la estructura es inmóvil, el desgaste del material es mínimo.

Pistas provisionales: para la circulación de vehículos sobre terrenos poco estables en explotaciones forestales, accesos a canteras, etc.

## IV.3 APLICACIONES DE LOS NEUMÁTICOS TRITURADOS

Pistas de atletismo: los gránulos de caucho procedentes de NFU son una materia prima básica en la composición de los distintos revestimientos sintéticos, que podemos clasificarlos en revestimientos realizados "in situ", mixtos y prefabricados, atendiendo a su puesta en obra, que a su vez pueden ser compactos o multicapas si el tipo de mezclas que lo componen es homogéneo o compuesto por capas de distintas calidades.

Pistas multiuso: las características generales que deben cumplir todos los pavimentos deportivos son elasticidad, resistencia al deslizamiento y durabilidad. La elasticidad permite que el pavimento juegue un papel importante absorbiendo parte de la energía que el deportista transmite en sus impactos con el pavimento evitando así lesiones en sus articulaciones y en sus caídas. Las capas elásticas de mejor calidad se fabrican con gránulos de caucho procedentes de la trituración de neumáticos usados, utilizando generalmente como aglomerante una resina de poliuretano, se fabrican en distintos espesores a pie de obra o se suministran prefabricadas en forma de rollos. La capa final de acabado debe garantizar la correcta estabilidad del deportista en contacto con el pavimento así como el bote de la pelota por lo que la textura y calidad de esta capa varía en función de distintos factores como son, la ubicación de la pista, en interior o al aire libre y el tipo de deporte.

Campos de hierba artificial: la hierba artificial consiste en una moqueta cuyas fibras sintéticas, de polietileno en su gran mayoría, imitan a la hierba natural, las fibras tienen una altura que varía de 50 a 60 mm, y están lubricadas para evitar quemaduras ante la posible caída de los jugadores. Como material de relleno se utilizan gránulos de caucho sueltos procedentes de

neumáticos fuera de uso de un tamaño comprendido entre 0,5 y 2,0 mm combinados con arena de sílice, que por su mayor peso específico se sitúa en el fondo de la moqueta sirviendo de lastre del sistema. Como referencia en un campo de fútbol con base elástica de dimensiones reglamentarias puede llegar a consumir 140 t de Caucho de NFU de gránulos de distintos tamaños, para obtener estas cantidades de caucho es necesario reciclar el equivalente a 36.000 neumáticos de turismo.

**Pavimentos de seguridad:** se utilizan principalmente en parques infantiles, guarderías y residencias de ancianos para evitar posibles lesiones por caídas al resultar un pavimento elástico. Su composición es a base de gránulos de caucho aglomerados con resinas de poliuretano.

**Rellenos ligeros.** Empleados como relleno de terraplenes se utilizan fundamentalmente sobre cimientos comprensibles o de baja capacidad portante para limitar las cargas transmitidas al cimiento y los asentamientos totales. Pueden realizar también mezclas de suelo o material granular con neumáticos troceados en aquellas situaciones donde la necesidad de una menor compresibilidad del relleno compense el aumento de peso frente al uso de neumáticos troceados en exclusiva. Los rellenos ligeros también pueden utilizarse sobre estructuras o tuberías enterradas, para limitar las cargas sobre la estructura y la concentración de tensiones por consolidación diferencial, ya que su deformabilidad permite la generación de un efecto bóveda sobre la estructura. En zonas con problemas de inestabilidad, su baja densidad y suficiente resistencia al corte permite su empleo para la formación de taludes o bermas. Resulta un material especialmente adecuado como relleno ligero en muros (estribos de puentes, muros de sosténamiento...)

**Aislamiento acústico:** el caucho es un material con buena absorción acústica, por lo que resulta adecuado para la fabricación de pantallas antiruido en carreteras. Los NFU troceados, así como enteros o embalados, han sido utilizados como material de relleno de terraplenes longitudinales utilizados como barreras antiruido. Paneles de caucho granulados, aglomerado con resinas de poliuretano, se ha utilizado como capa de aislamiento en barreras acústicas prefabricadas.

**Aislamiento térmico:** se puede considerar que los neumáticos troceados presentan una capacidad de aislamiento térmico 8 veces superior a la de un suelo. La utilización de rellenos de NFU en terraplenes de carreteras proporciona una protección eficaz frente a la penetración de la helada en el suelo subyacente. El problema de la pérdida de capacidad portante de los suelos durante el deshielo primaveral es un factor primordial de diseño de carreteras de zonas frías. La parte más atractiva de este producto es su esencia sostenible, debido a que se obtiene de forma natural después del proceso de trituración del neumático. Además, mantiene la temperatura constante en interior de una edificación, lo que reduce hasta en un 50% el consumo energético que generan sistemas de ventilación artificial. Por ejemplo, un muro de un metro de largo por un metro de ancho requeriría 10 kilos de esta fibra, lo que equivale a 50 neumáticos fuera de uso.

**Capa de drenaje en vertederos:** para la recogida de lixiviados se establece la instalación de una capa de drenaje de espesor superior a 0,5 m. Esta capa requiere una permeabilidad superior a  $10^{-3}$  m/s y los rellenos de NFU troceados superan este requisito ( $10^{-2}$ - $10^{-1}$ ). Este material también es utilizado como relleno de las zanjas o pozos de drenaje de recolección.

**Sistemas de drenaje en carreteras:** se emplean los NFU troceados como material de relleno de capas y zanjas drenantes en carreteras, las propiedades elásticas del relleno proporcionan una protección mecánica a las tuberías. Las propiedades aislantes del caucho hacen que sea un material de relleno idóneo en zonas sometidas a temperaturas bajas, impidiendo la congelación del agua contenida en él.

Equipamientos viales y ferroviarios: se han utilizado productos reciclados en equipamientos viales prefabricados (bordillos, isletas, bandas sonoras, conos de señalización, barreras de seguridad, quitamiedos, etc.). En los equipamientos ferroviarios destaca la utilización de losetas flexibles en pasos a nivel. Existen también algunas experiencias en la fabricación de traviesas compuestas.

Calzado: las suelas de los zapatos fabricados con polvo o granulado son muy duraderas.

Colchonetas para animales. Recubiertas por 2 capas de tela sintética la cual protege al granulado contra los rayos ultravioleta. La capa interior es impermeable y puede lavarse y desinfectarse fácilmente.

#### IV.4 APLICACIONES EN MATERIALES BITUMINOSOS

La incorporación de polvo de caucho a una mezcla bituminosa modifica sus propiedades y mejora sus prestaciones como material para carreteras. Actualmente son posibles dos métodos de incorporación del polvo de caucho procedente de los NFU. Vía húmeda y vía seca.

Vía húmeda: el polvo de los NFU se incorpora al betún asfáltico previamente a su introducción en la amasadora de la central de fabricación de la mezcla bituminosa en caliente, obteniéndose un betún modificado o mejorado por el caucho. La forma de fabricar este ligante puede ser mediante la utilización de una planta de fabricación de betunes modificados o bien mediante una instalación *in situ* ubicada en planta de fabricación de la mezcla bituminosa, entre el depósito de betún y la amasadora de la mezcla bituminosa.

Vía seca: consiste en introducir el polvo procedente de NFU directamente en la amasadora de la central de fabricación de la mezcla bituminosa, como si de un polvo mineral se tratara. El polvo de caucho actúa en parte como árido, pero las partículas más finas interaccionan con el betún modificando sus propiedades, consigiéndose así mejorar el comportamiento de la mezcla bituminosa.

En el proceso por vía seca pueden diferenciarse dos técnicas, según el tamaño máximo del polvo de caucho. La primera utiliza tamaños máximos elevados, de hasta 2 mm y en la segunda técnica se emplea polvo de caucho de menor tamaño, (todo pasa por el tamiz 0,5 mm y en proporción)

Ambas vías suponen ahorro de materias primas en origen, ya que polímeros y agregados quedan, al menos parcialmente, sustituidos por los trituradores de caucho.

La eliminación de neumáticos fuera de uso a través de la carretera no tiene ningún riesgo posible de contaminación, siendo sin duda un procedimiento ecológico.

Los neumáticos procesados en la planta visitada tienen las siguientes aplicaciones:

Los triturados en forma de polvo de caucho, es decir, en tamaños comprendidos entre 0,5 mm y 1 mm, se utilizan como elementos constituyentes de mezclas bituminosas para pavimentos de carreteras. Todos estos usos se consideran como la valorización material de estos residuos.

Los troceados en forma de granza, es decir, de tamaños comprendidos entre 1 mm y 10 mm, tienen diversas aplicaciones, tales como materiales granulares de la base del césped artificial para campos de deportes, para la fabricación de elementos de protección de carreteras, en particular como revestimientos de las barreras, para superficies de parques de juegos infantiles, para la fabricación de baldosas para pavimentos sometidos a gran desgaste, etc.

Como combustible en plantas de fabricación de cementos.

Los neumáticos troceados se utilizan para la protección de las láminas geotextiles de aislamiento de los vertederos y para el aislamiento frente al agua de las edificaciones y los

troceados en tamaños de “chips” se utilizan como materiales granulares para los sistemas de drenaje.

El acero se reintroduce como materia prima en las acerías.

#### IV.5 APlicación NEUMÁTICO COMO COMBUSTIBLE

El 50% de NFUs se recicla, un 8% se reutiliza directamente si la cubierta lo permite y un 12% se recauchuta. El resto, un 30% se transforma en combustible alternativo para uso en cementeras.

La cantidad de caucho reciclado fue de un 30% con respecto al 12% total aditivado. Se observa como este porcentaje como el máximo admitido para el sistema, por encontrarse en el límite de digestión del asfalto cumpliendo con Norma IRAM. El total de la adición está compuesto por 30% de caucho reciclado, 65% de polímero SBS y 5% de rejuvenecedor.

Tabla IV-5. Composición inmediata y elemental de neumáticos granulados

| CARACTERÍSTICAS           | % EN PESO SOBRE MATERIA SECA |
|---------------------------|------------------------------|
| Análisis inmediato        |                              |
| Materia volátil           | 62,0 - 66,0                  |
| Cenizas                   | 4,8 – 8,2                    |
| C fijo                    | 26,7 – 34,0                  |
| Composición elemental     |                              |
| C                         | 80,2 – 89,1                  |
| H                         | 7,2 – 7,6                    |
| N                         | 0,2 – 0,4                    |
| S                         | 1,4 – 2,4                    |
| O                         | 2,3 – 3,1                    |
| Poder calorífico superior |                              |
| (MJ/kg)                   | 34 – 39                      |

Los neumáticos se pueden aprovechar como combustible de sustitución, es decir, sustituyendo a combustibles fósiles tradicionales, en la industria del cemento. Se estima que una tonelada de neumáticos puede ahorrar 0,7 toneladas de fuel. Dependiendo del tipo de sistema de horno, los combustibles alternativos pueden sustituir los combustibles fósiles hasta en un 25% sin mayores problemas importantes asociados con el proceso de cocción del clínker. En el caso de los neumáticos, la sustitución suele ser del 16%.

La valorización del NFU como combustible se ha desarrollado fundamentalmente en Japón y en EE.UU. Se basa en el gran poder calorífico del neumático, superior al del carbón. Los NFU se están utilizando como combustible en plantas industriales (cementeras, ladrillo, papel, acerías,

etc.) y en centrales de producción de vapor y energía eléctrica, aunque esta última aplicación se da mayoritariamente en los EE.UU.

El sector de la UE que más usa los NFU como combustible es el de fabricación del cemento. Por ejemplo, durante el año 2010 se valorizaron en Austria el 50% de los neumáticos como combustible, mientras que en Alemania, España, Francia y Reino Unido esta cifra alcanzó el 42%, 39%, 38% y 22%, respectivamente.

#### IV.6 ANÁLISIS DE PROBLEMAS ENERGÉTICOS

Como se puede comprobar en el apartado, la cantidad que se almacena anualmente en la campa exterior suma una cantidad importante: 6.930 toneladas al año.

Para eliminar estos residuos antiguamente se usaba con frecuencia la quema directa que provocaba graves problemas medioambientales ya que producía emisiones de gases que contienen partículas nocivas para el entorno.

Actualmente toda la cantidad que no se procesa se queda almacenada, esta situación provoca problemas de estabilidad por la degradación química parcial que éstos sufren.

Un neumático al aire libre va liberando muy lentamente los contaminantes, como son los bifenilos policlorados (PCB), que son muy tóxicos y peligrosos. Otro de los riesgos del almacenaje de los neumáticos se debe a su forma. Por su diseño, cuando cae agua de lluvia reiteradamente es difícil sacarla una vez que ha entrado en él. Esta agua provoca la proliferación de roedores, insectos y otros animales dañinos que constituye un problema añadido. La reproducción de ciertos mosquitos, se realiza con mayor probabilidad en el agua estancada de un neumático que en la propia naturaleza. Esto puede conllevar a problemas de salud, ya que ciertos mosquitos pueden transmitir por picadura fiebres y encefalitis.

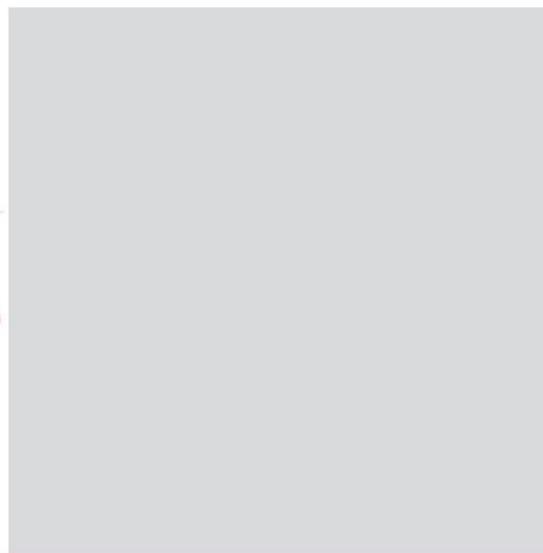
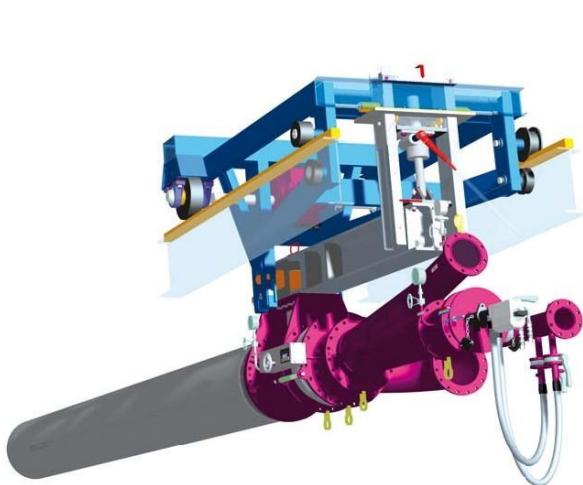
Según estudios realizados por los sistemas integrados de gestión (SIG), un neumático emite 67,95 kg de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Por cada tonelada de neumático que se recicla se evitan aproximadamente 10 kg de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Por esta razón, es muy importante dar valor al neumático que está fuera de uso mediante la recuperación de sus materiales. Teniendo en cuenta los datos anuales de la empresa visitada, al año se quedan almacenados en la campa exterior unas 6.930 toneladas, eso supone unas 7 toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera a lo largo del tiempo. Para evitar estas cantidades de contaminación atmosférica, hay que buscar soluciones que mejoren la eficiencia energética.

#### IV.7 FICHA TÉCNICA HORNO DE COMBUSTIÓN NEUMÁTICOS



### NOVAFLAM®

rotary kiln burner



High flexibility  
Easy to operate  
Repeatable flame shaping adjustments  
Single primary air supply  
Low NOx proprietary version  
Firing high % of Alternative Solid Fuels (ASF)

→ The new kiln burner by Fives Pillard



The new NOVAFLAM® rotary kiln burner (protected by numerous patents) is Fives Pillard's latest technology for rotary kiln firing.

The NOVAFLAM® is tailor-made to each application, is easy to operate, delivers perfectly repeatable flame shaping adjustment and high flexibility when firing various types of fuels including alternative ones.

For the new rotary kiln firing requirements such as using low-grade fuels, the NOVAFLAM® is the well adapted solution allowing a quick flame optimization thanks to the very simple flame adjustment principle.

The concept of the NOVAFLAM® burner is a single air supply (SAS) with two outlets, allowing for a variable swirl component which can be easily adjusted without modifying the primary air amount.

- The burner specific impulse can be adjusted.
- The flame width is adjusted via the swirl adjusting device.



NOVAFLAM®: single primary air channel



NOVAFLAM®: swirl adjustment device

| CHARACTERISTICS  |  |
|------------------|--|
| Fuels            | coal, petroleum coke, anthracite, lignite, heavy oil, diesel oil, natural gas, alternative solid fuels (plastics, wood chips, sawdust, animal meal, fluff...), waste oils, solvents, process gases (NCG, coke oven gas...) |
| Output range     | from 10 MW to 200 MW   |
| Primary air data | case by case from 7 to 10% flow rate, at 150 mbar to 300 mbar pressure   |

| SELECTED REFERENCES             |  |
|---------------------------------|--|
| 1 200 TPD Cement Plant (France) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Up to 70% firing ratio by solid waste fuel (saw dust+animal meal, sludge)</li> <li>• Increase of saw dust substitution from 30% to 50%</li> <li>• Range of primary air pressure between 130 and 200 mbar</li> <li>• No more ring or build-up at kiln inlet</li> </ul> |
| 800 TPD Cement Plant (France)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Up to 60% firing ratio by solid waste fuel (saw dust+animal meal, sludge)</li> <li>• Increase of saw dust substitution from 20% to 40%</li> <li>• Range of primary air pressure between 130 and 200 mbar</li> <li>• Higher kiln availability</li> </ul>               |
| 1300 TPD Cement Plant (Germany) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Up to 65% firing ratio by solid waste fuel (fluff)</li> <li>• Increase of waste fuel firing while using lower quality fluff</li> <li>• Range of primary air pressure between 150 and 200 mbar</li> </ul>  |



BUK-1289



## **ANEXO V: TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA**

## ANEXO V. COMPENSACIÓN REACTIVA

### CÓMO MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA

Un buen factor de potencia es un  $\cos \varphi$  alto (cercano a 1) o  $\tan \varphi$  bajo (cercano a 0).

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1+(\tan \varphi)^2}} ; \tan \varphi = \frac{Q}{P}$$

Un buen factor de potencia posibilita la optimización de una instalación eléctrica y proporciona las siguientes ventajas:

- No existen multas por energía reactiva
- Disminución en la potencia total en KVA
- Limitación de pérdidas de energía activa en cables gracias a la disminución en la corriente que se transmite en la instalación.
- Mejora en el nivel de tensión al final de la línea
- Potencia disponible adicional en los transformadores de potencia si la compensación se desarrolla en las bobinas secundarias.

### INSTALACIÓN DE CONDENSADORES O BANCOS DE CONDENSADORES

Optimizar el factor de potencia de una instalación eléctrica consiste en darle los medios para producir una proporción variable de la energía reactiva que consume. Hay diferentes sistemas disponibles para producir energía reactiva, particularmente, adelantadores de fase y condensadores de derivación (o condensadores en serie para grandes redes de transportes).

El condensador se utiliza con mayor frecuencia gracias a:

- Su nulo consumo de energía activa
- Su costo de compra
- Su fácil uso
- Su vida útil (aproximadamente 10 años)
- Sus bajos requerimientos de mantenimiento (Dispositivo estático)

El condensador es un receptor compuesto de dos partes conductivas (electrodos) separadas por un aislador. Cuando se somete a este receptor a una tensión sinusoidal, la corriente resultante (Capacitiva), se adelanta en 90°. En cambio, en el resto de los receptores (motores, transformadores, etc.) la corriente inductiva, se retrasa en un ángulo de hasta 90° respecto a la tensión. La composición vectorial (inductiva o capacitiva) de estas corrientes reactivas, da como resultado una corriente reactiva por debajo del valor existente antes de la instalación de los condensadores. En términos simples, se puede decir, que las cargas inductivas (motores, transformadores, etc.) consumen energía reactiva, mientras que los condensadores (Receptores capacitivos) producen energía reactiva.

#### V.1.1 BANCO DE CONDENSADORES

Primero, se calcula con la potencia instalada en la planta y los valores de tangente  $\varphi$  medidos el valor de reactiva que se necesita y se busca el banco de condensadores necesario en el catálogo de la Figura V-1:

$$Q_C = \sqrt{\left(\frac{1.800 \text{ kW}}{0,95}\right)^2 - (1.800)^2} = 591,63 \text{ kVAr}$$



Baterías  
de condensadores  
estandar EG 400V, 50Hz

Standard capacitor  
bank EG, 400V, 50Hz

**Características**

- Características generales en pág. 40
- Con regulador de la serie FPM (ver pág. 22)
- Condensadores (ver pág. 8)
- Contactores con resistencias previas para limitación de la corriente de conexión
- Autotrafo de maniobra 400/230V
- Acometida por la parte inferior.
- Protección diferencial opcional
- Fijación sobre suelo

**Technical data**

- Technical data on page 40.
- With series FPM controller (see page 22).
- Capacitors (see page 8).
- Contactors with previous resistors to damp the switch on current.
- Autotrans. for aux. voltage 400/230V
- Incoming at the bottom
- Optional residual current protection
- Floor mounted

| 400V, 50Hz                                     |                           |                |              |                    |  |                 |                 |
|--|---------------------------|----------------|--------------|--------------------|--|-----------------|-----------------|
| Potencia (Composición)<br>Output (Composition) | Dimensiones<br>Dimensions | Peso<br>Weight | Tipo<br>Type | Precio<br>Price    | Suplemento<br>interruptor de corte<br>en carga<br>Extra price for<br>switch disconnector | Calibre<br>Size | Precio<br>Price |
| kvar (400V)                                    | kvar (440V)               | mm             | kg           | €                  |  | A               | €               |
| 400 (8x50)                                     | 484                       | 2000x600x600   | 224          | EG 400/400-8/8     | 10,511.00  | 1000            | 1,904.00        |
| 400 (2x25+7x50)                                | 484                       | 2000x600x600   | 224          | EG 400/400-9/16    | 10,552.00  | 1000            | 1,904.00        |
| 425 (25+8x50)                                  | 514                       | 2000x600x600   | 235          | EG 400/425-9/17    | 11,134.00  | (1)             | (1)             |
| 425 (25+8x50)                                  | 514                       | 2000x1200x600  | 313          | EG 400/425-9/17/A  | 11,509.00  | 1000            | 2,335.00        |
| 450 (9x50)                                     | 545                       | 2000x 600x600  | 237          | EG 400/450-9/9     | 11,565.00  | (1)             | (1)             |
| 450 (9x50)                                     | 545                       | 2000x1200x600  | 316          | EG 400/450-9/9/A   | 12,409.00  | 1000            | 2,335.00        |
| 450 (2x25+8x50)                                | 545                       | 2000x600x600   | 238          | EG 400/450-10/18   | 11,720.00  | (1)             | (1)             |
| 450 (2x25+8x50)                                | 545                       | 2000x1200x600  | 316          | EG 400/450-10/18/A | 12,451.00  | 1000            | 2,335.00        |
| 475 (25+9x50)                                  | 575                       | 2000x1200x600  | 320          | EG 400/475-10/19   | 13,323.00  | 1000            | 2,335.00        |
| 500 (10x50)                                    | 605                       | 2000x1200x600  | 323          | EG 400/500-10/10   | 13,671.00  | 1250            | 2,633.00        |
| 500 (2x25+9x50)                                | 605                       | 2000x1200x600  | 323          | EG 400/500-11/20   | 13,776.00  | 1250            | 2,633.00        |
| 525 (25+10x50)                                 | 635                       | 2000x1200x600  | 336          | EG 400/525-11/21   | 14,308.00  | 1250            | 2,633.00        |
| 550 (11x50)                                    | 666                       | 2000x1200x600  | 340          | EG 400/550-11/11   | 14,527.00  | 1250            | 2,633.00        |
| 575 (25+11x50)                                 | 696                       | 2000x1200x600  | 343          | EG 400/575-12/23   | 15,065.00  | 1250            | 2,633.00        |
| 600 (12x50)                                    | 726                       | 2000x1200x600  | 347          | EG 400/600-12/12   | 15,108.00  | 1250            | 2,633.00        |
| 625 (25+2x50+5x100)                            | 756                       | 2000x1200x600  | 356          | EG 400/625-8/25    | 15,920.00  | 1600            | 2,898.00        |
| 650 (50+8x100)                                 | 787                       | 2000x1200x600  | 359          | EG 400/650-7/13    | 16,130.00  | 1600            | 2,898.00        |
| 675 (25+50+6x100)                              | 817                       | 2000x1200x600  | 363          | EG 400/675-8/27    | 16,982.00  | 1600            | 2,898.00        |
| 700 (2x50+6x100)                               | 847                       | 2000x1200x600  | 366          | EG 400/700-8/14    | 17,195.00  | 1600            | 2,898.00        |
| 725 (25+2x50+6x100)                            | 877                       | 2000x1200x600  | 369          | EG 400/725-9/29    | 17,645.00  | 1600            | 2,898.00        |
| 750 (50+7x100)                                 | 908                       | 2000x1200x600  | 373          | EG 400/750-8/15    | 18,199.00  | 1600            | 2,898.00        |
| 775 (25+1x50+7x100)                            | 938                       | 2000x1200x600  | 376          | EG 400/775-9/31    | 18,588.00  | 1600            | 2,898.00        |
| 800 (2x50+7x100)                               | 968                       | 2000x1200x600  | 380          | EG 400/800-9/16    | 18,772.00  | (2)             | (2)             |
| 850 (50+8x100)                                 | 1029                      | 2100x1200x600  | 398          | EG 400/850-9/17    | 21,237.00  | (2)             | (2)             |
| 900 (2x50+8x100)                               | 1089                      | 2100x1200x600  | 405          | EG 400/900-10/18   | 22,018.00  | (2)             | (2)             |
| 950 (50+9x100)                                 | 1150                      | 2100x1200x600  | 412          | EG 400/950-10/19   | 23,481.00  | (2)             | (2)             |
| 1000 (2x50+9x100)                              | 1210                      | 2100x1200x600  | 419          | EG 400/1000-11/20  | 24,023.00  | (2)             | (2)             |

**Otros suplementos:**

- Para interruptor automático y diferencial ver pág. 61
- (1) No es posible incorporar interruptor sin aumentar las dimensiones del armario (ver tipo siguiente). (2) Bajo demanda.

**Other extra prices:**

- Residual current circuit-breaker on page 61
- (1) It is not possible to include a switch disconnector without increasing the cubicle dimensions (see next type). (2) On request.

Figura V-1. Catálogo CYDESA batería de condensadores

Finalmente, se busca en el catálogo de CYDESA correspondiente a las baterías de condensadores estándar de 400 V y 50 Hz. El banco de condensadores que más se aproxima al valor 646,53 kVAr, cuyo precio es de 19.028 €

## PROTECCIÓN Y CONEXIÓN DE CONDENSADORES

### Protección:

Además de los dispositivos de protección internos incorporados al Condensador:

- Capas de propileno metalizado autorregenerativa
- Fusibles internos
- Dispositivos de desconexión ante sobrepresión, es esencial tener un dispositivo de protección externo en el Condensador

Esa protección se puede obtener ya sea por:

- Por un interruptor:
  - Relé térmico, regulado entre 1,3 y 1,5 In.
  - Relé magnético, regulado entre 5 y 10 In.
- Por fusibles HRC tipo GI, entre 1,5 a 2 In.

### Conexión:

Los estándares establecen que los Condensadores pueden resistir un exceso de sobrecarga permanente de 30%.

Estos estándares también autorizan una tolerancia máxima de +10% en la capacidad nominal.

## COSTES DE MULTAS POR ENERGÍA REACTIVA

(1) El precio kVArh facturado en cada uno de los periodos dependerá del cálculo del  $\cos\phi$  de forma que:

$\cos\phi \geq 0,95$ ; el precio será 0,000000 €/kVArh

$0,90 \leq \cos\phi < 0,95$ ; el precio será 0,041554 €/kVArh

$0,85 \leq \cos\phi < 0,90$ ; el precio será 0,041554 €/kVArh

$0,80 \leq \cos\phi < 0,85$ ; el precio será 0,041554 €/kVArh

$\cos\phi < 0,80$ ; el precio será 0,062332 €/kVArh

Figura V-2. Multas por energía reactiva según Orden IET/221/2013 (BOE 16/02/2013)

## CATÁLOGO BANCO DE CONDENSADORES

### V.2 SUSTITUCIÓN DE ILUMINACIÓN TRADICIONAL POR LED

Los tubos LED están indicados para todo tipo de lugares que necesitan una alta iluminación con un gran ahorro energético. Los productos LED son más caros que los productos tradicionales, pero al mismo tiempo son extremadamente eficientes energéticamente. La ventaja principal de los tubos LED es el ahorro energético, es posible ahorrar entre un 20% y un 30% de energía respecto a los equipos convencionales. Otra gran ventaja es el ahorro en mantenimiento ya que el tubo LED no necesita ni reactancias ni cebadores. Tienen encendido inmediato y no contaminan el medio ambiente al no tener mercurio. El 75% de todo el alumbrado usado en el sector de la industria de la UE se basa en tecnologías anticuadas de baja eficiencia.

**Tabla 5.2 (Continúa)**  
**Actividades industriales y artesanales**

**2.14 Papel y artículos de papel**

| Nº ref. | Tipo de interior, tarea y actividad   | $\bar{E}_m$<br>lux | UGR <sub>L</sub> | R <sub>a</sub> | Observaciones                                 |
|---------|---|--------------------|------------------|----------------|---|
| 2.14.1  | Molino vertical, molinos de pulpa   | 200                | —                | —              |   |
| 2.14.2  | Fabricación y tratamiento de papel, máquinas de papel y ondulación, fabricación de cartón   | 300                | 25               | 80             | Para grandes alturas: véase el apartado 4.6.2 |
| 2.14.3  | Encuadernado estándar, por ejemplo, plegado clasificación, encolado, corte, grabado, cosido | 500                | 22               | 80             |   |

**2.5 Industria química, de plásticos y de caucho**

| Nº ref. | Tipo de interior, tarea y actividad  | $\bar{E}_m$<br>lux | UGR <sub>L</sub> | R <sub>a</sub> | Observaciones                               |
|---------|--|--------------------|------------------|----------------|---|
| 2.5.1   | Instalaciones de tratamiento manejadas por control remoto                    | 50                 | —                | 20             | Se deben reconocer los colores de seguridad |
| 2.5.2   | Instalaciones de tratamiento con intervención manual limitada                | 150                | 28               | 40             |   |
| 2.5.3   | Puestos de trabajo constantemente protegidos en instalaciones de tratamiento | 300                | 25               | 80             |   |
| 2.5.4   | Salas de medidas de precisión, <b>laboratorios</b>                           | 500                | 19               | 80             |   |
| 2.5.5   | Producción farmacéutica  | 500                | 22               | 80             |   |
| 2.5.6   | Producción de neumáticos   | 500                | 22               | 80             |   |
| 2.5.7   | Inspección de colores  | 1 000              | 16               | 90             | $T_{CP} \geq 4\,000\text{ K}$               |
| 2.5.8   | Corte, acabado, inspección   | 750                | 19               | 80             |   |

**Tabla 5.3**  
**Oficinas**

**3 Oficinas**

| Nº ref. | Tipo de interior, tarea y actividad                           | $\bar{E}_m$<br>lux | UGR <sub>L</sub> | R <sub>a</sub> | Observaciones                          |
|---------|---|--------------------|------------------|----------------|--|
| 3.1     | Archivo, copias, etc.   | 300                | 19               | 80             |  |
| 3.2     | Escrivura, escritura a máquina, lectura, tratamiento de datos | 500                | 19               | 80             | Trabajo en EPV: véase el apartado 4.11 |
| 3.3     | Dibujo técnico  | 750                | 16               | 80             |  |
| 3.4     | Puestos de trabajo de CAD                                     | 500                | 19               | 80             | Trabajo en EPV: véase el apartado 4.11 |
| 3.5     | Salas de conferencias y reuniones                             | 500                | 19               | 80             | La iluminación debería ser controlable |
| 3.6     | Mostrador de recepción  | 300                | 22               | 80             |  |
| 3.7     | Archivos  | 200                | 25               | 80             |  |

Figura V-3. Requisitos de iluminación según norma UNE EN 12464-1:2002

A continuación se muestra una tabla comparativa

Tabla V-1. Comparativa iluminación actual vs iluminación LED

| TIPO                           | ZONA           | CANTIDAD | POTENCIA (W) | LUMENES | LUXES (Lúmenes/m <sup>2</sup> ) | Luxes mínimos * | TIEMPO VIDA (h) | PRECIO (€) |
|--------------------------------|----------------|----------|--------------|---------|---------------------------------|-----------------|-----------------|------------|
| <b>Fluorescentes</b>           | Vestuarios     | 4        | 58           | 5.200   | 106 * 4 = 424                   | 200             | 8.000 – 10.000  | 2,89       |
|                                | Comedor        | 4        | 58           | 5.200   | 87 * 4 = 348                    | 200             | 8.000 – 10.000  | 2,89       |
|                                | Mantenimiento  | 4        | 58           | 5.200   | 81 * 4 = 324                    | 200             | 8.000 – 10.000  | 2,89       |
|                                | Almacén        | 4        | 58           | 5.200   | 81 * 4 = 324                    | 200             | 8.000 – 10.000  | 2,89       |
|                                | Sala bombas    | 2        | 58           | 5.200   | 325 * 2 = 650                   | 200             | 8.000 – 10.000  | 2,89       |
|                                | Sala compresor | 2        | 58           | 5.200   | 325 * 2 = 650                   | 200             | 8.000 – 10.000  | 2,89       |
| <b>Fluorescentes LED</b>       | Vestuarios     | 12       | 9            | 1.800   | 36 * 12 = 432                   | 200             | 30.000          | 13,26      |
|                                | Comedor        | 12       | 9            | 1.800   | 30 * 12 = 360                   | 200             | 30.000          | 13,26      |
|                                | Mantenimiento  | 12       | 9            | 1.800   | 28 * 12 = 336                   | 200             | 30.000          | 13,26      |
|                                | Almacén        | 12       | 9            | 1.800   | 28 * 12 = 336                   | 200             | 30.000          | 13,26      |
|                                | Sala bombas    | 6        | 9            | 1.800   | 112 * 6 = 672                   | 200             | 30.000          | 13,26      |
|                                | Sala compresor | 6        | 9            | 1.800   | 112 * 6 = 672                   | 200             | 30.000          | 13,26      |
| <b>Bombillas</b>               | Zona máquinas  | 24       | 1000         | 58.500  | 24 * 24 = 576                   | 300             | 12.000          | 152        |
| <b>Campana industrial</b>      | Zona máquinas  | 82       | 200          | 18.000  | 7 * 82 = 574                    | 300             | 50.000          | 300        |
| <b>Paneles 4 fluorescentes</b> | Laboratorio    | 9        | 144          | 6.700   | 60 * 9 = 540                    | 500             | 15.000          | 3,5        |
|                                | Despacho       | 9        | 144          | 6.700   | 74 * 9 = 666                    | 500             | 15.000          | 3,5        |
|                                | Hall           | 9        | 144          | 6.700   | 83 * 9 = 747                    | 300             | 15.000          | 3,5        |
| <b>Paneles LED</b>             | Laboratorio    | 18       | 36           | 3.300   | 30 * 18 = 540                   | 500             | 30.000          | 84,7       |
|                                | Despacho       | 16       | 36           | 3.300   | 44 * 16 = 704                   | 500             | 30.000          | 84,7       |
|                                | Hall           | 18       | 36           | 3.300   | 41 * 18 = 738                   | 300             | 30.000          | 84,7       |
| <b>Bombillas</b>               | Pasillo        | 14       | 60           | 710     | 8 * 14 = 112                    | 100             | 1.000           | 1,33       |
| <b>Bombillas "downlight"</b>   | Pasillo        | 8        | 18           | 1.550   | 18 * 8 = 144                    | 100             | 30.000          | 16,49      |
| <b>Focos halógenos</b>         | Baños oficinas | 10       | 50           | 330     | 20 * 10 = 200                   | 200             | 2.000           | 2,65       |
| <b>Focos LED</b>               | Baños oficinas | 10       | 6            | 410     | 26 * 10 = 260                   | 200             | 30.000          | 4,07       |

## AMORTIZACIÓN ECONÓMICA INSTALACIÓN LED

Tabla V-2. Costes instalación tradicional vs instalación LED

|                     |                                 | Fluorescentes | Campanas   | Paneles    | Bombillas | Focos    |
|---------------------|---------------------------------|---------------|------------|------------|-----------|----------|
| Nueva instalación   | Coste Anual Energía             | 236,97 €      | 3.717,12 € | 529,69 €   | 55,76 €   | 23,23 €  |
|                     | Coste Instalación Material      | 450,84 €      | 14.400 €   | 3.218,6 €  | 131,92 €  | 40,70 €  |
|                     | Coste Mano obra                 | 102,00 €      | 144 €      | 114 €      | 24,00 €   | 30,00 €  |
|                     | Coste de Reposición Material    | 52,90 €       | 1.013,76 € | 377,65 €   | 15,48 €   | 4,78 €   |
|                     | Coste Anual Mantenimiento       | 0,00 €        | 0,00 €     | 0,00 €     | 0,00 €    | 0,00 €   |
| Antigua Instalación | Coste Anual Energía             | 449,15 €      | 9.292,80 € | 1.505,43 € | 325,25 €  | 193,60 € |
|                     | Coste Anual Reposición material | 13,56 €       | 1.070,08 € | 22,18 €    | 65,54 €   | 46,64 €  |
|                     | Coste Anual Mantenimiento       | 14,08 €       | 21,12 €    | 19,01 €    | 147,84 €  | 52,80 €  |

Tabla V-3. Amortización económica de la instalación de iluminación LED

| Antigua Instalación                 | Factores Energéticos |          |                                     |           | Nueva Instalación |
|-------------------------------------|----------------------|----------|-------------------------------------|-----------|-------------------|
|                                     | Demanda Anual (kW)   |          | Energía Iluminación Consumida (kWh) |           |                   |
|                                     | 31,228               | 12.091   | 12,084                              |           | 4.678,9248        |
| RETORNO DE INVERSIÓN                | Fluorescentes        | Campanas | Paneles                             | Bombillas | Focos             |
| Coste anual nueva instalación (€)   | 289,86               | 4.730,88 | 907,34                              | 71.2354   | 28,0075           |
| Coste anual antigua instalación (€) | 500,98               | 10.384   | 1.546,618                           | 538.6304  | 293,04            |
| Ahorro Total Anual (€)              | 211,12               | 5.653,12 | 639,28                              | 467,395   | 265,0325          |
| Inversión(€)                        | 552,84               | 14.544   | 3.332,6                             | 155,92    | 70,7              |
| Periodo Amortización (Año)          | 2,62                 | 2,57     | 5,21                                | 0,33      | 0,27              |
| Periodo Amortización (Meses)        | 31,42                | 30,87    | 62,56                               | 4,00      | 3,20              |

#### Ventajas iluminación LED:

- Larguísima vida (30.000 a 100.000 horas)
- Reducción en coste mantenimiento
- Mayor eficacia que las lámparas incandescentes y halógenas (30lumenes/W)
- Gran calidad de luz: sin UV, sin IR en el haz de luz
- Productos más pequeños, miniaturización
- Flexibilidad en diseño (luz oculta)
- Colores saturados sin necesidad de filtros
- Posibilidad de regulación y de luz dinámica (colores RGB)
- Fuente de luz libre de mercurio
- Encendido instantáneo, sin parpadeo

### V.3 COGENERACIÓN

La cogeneración es una técnica de gran eficacia que consiste en la producción combinada de calor y electricidad a partir de la combustión en un grupo motor o turbina acoplados a un alternador. El calor generado puede tener diferentes usos (procesos industriales, calefacción, producción de frío mediante máquina de absorción, etc). Además del calor de los gases de escape (400 °C) existen otras fuentes de calor recuperables en el motogenerador: las camisas de los cilindros, el aceite de lubricación y los "intercoolers" a partir de los cuales se puede obtener agua caliente entre 40 y 90°C.

El proceso de cogeneración tiene un reparto más o menos fijo entre producción eléctrico/mecánica y calor. Como las necesidades de ambas energías pueden variar de forma diferente es frecuente que haya un excedente de alguna de ellas.

La energía de cogeneración se incluye en el Régimen Especial de energía (Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos) que le permite utilizar la cogeneración para proveerse de todo el calor que necesite e inyectar en la red eléctrica la energía eléctrica que no necesite a una tarifa fija. De esta forma se evita que otra central produzca esa energía de forma menos eficiente.

Para poder realizar una instalación de cogeneración deben cumplir alguno de los siguientes requisitos:

- Producción / consumo continuo (más de 5.000 horas/año)
- Carga térmica (calor y/o frío) regular durante el año
- Consumos eléctricos importantes y simultáneos a los consumos térmicos.



Figura V-4. Cogeneración en planta de neumáticos

Dentro de sus características, las ventajas principales que tiene esta técnica son las siguientes:

- Ahorro energía primaria ya que el combustible necesario es la mitad del empleado por las centrales térmicas convencionales lo cual conlleva un menor impacto ambiental.
- Dependiendo de la instalación la cogeneración puede significar una reducción en los costes energéticos entre el 20 y 30% de la factura energética.

Las plantas de cogeneración están constituidas por módulos compactos basados en motor a gas con diferentes potencias unitarias. A continuación se muestra una imagen en la que se enseñan una gama de equipos de micro-cogeneración con potencias de: 5,5; 7,5; 12; 16; 22; 33 y 50 kW específicamente diseñados para su uso en edificios.

Gama de equipos ALTARE Smartblock:

| Equipo                                   | Smartblock 7.5   | Smartblock 16 | Smartblock 22 | Smartblock 33 | Smartblock 50 |
|--|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Motor</b>                             | Kubota 1.0 l   | Kubota 1.8 l  | Kubota 2.4 l  | Kubota 3.6 l  | MAN 4.6 l     |
| Potencia eléctrica <sup>1</sup> [kW]     | 7,5  | 16            | 22            | 33            | 50            |
| Potencia térmica <sup>2</sup> [kW]       | 22,1   | 38,0          | 51,2          | 73,4          | 87,7          |
| Consumo de gas <sup>3</sup> [kW]         | 27,1   | 51,7          | 67,9          | 97,7          | 138,9         |
| Rendimiento eléctrico [%]                | 27,6%  | 31,0%         | 32,4%         | 33,8%         | 36,0%         |
| Rendimiento térmico [%]                  | 81,5%  | 73,5%         | 75,5%         | 75,2%         | 63,1%         |
| Rendimiento total [%]                    | 109,1%   | 104,5%        | 107,9%        | 109,5%        | 99,1%         |
| Dimensiones [LaxAnxAl cm]                | 104x70x82  | 127x82x98     | 141x82x98     | 159x91x110    | 224x96x173    |
| Peso [kg]                                | 380  | 740           | 895           | 1.080         | 1.820         |
| Nivel de emisiones                       | CO < 150 mg/m <sup>3</sup> ; NOx < 125 mg/m <sup>3</sup> |               |               |               |               |
| Presión sonora <sup>4</sup> [dB(A) a 1m] | 41   | 46            | 47            | 49            | 54            |

Descargar ficha técnica:



Figura V-5. Características técnicas gama de equipos ALTARE “Smartblock”

### V.3.1 FICHA TÉCNICA PLANTA DE COGENERACIÓN NEUMÁTICOS

**GAS NATURAL**

PAÍS: España  
AÑO: 2000

MODELO COMPRESOR: 2EHP-4-GT/210-145  
GAS: Gas Natural

NÚMERO DE ETAPAS: 2

NÚMERO DE CILINDROS: 4

TAMAÑO DE CILINDROS (mm): 2x210/2x145

CARRERA (mm): 200

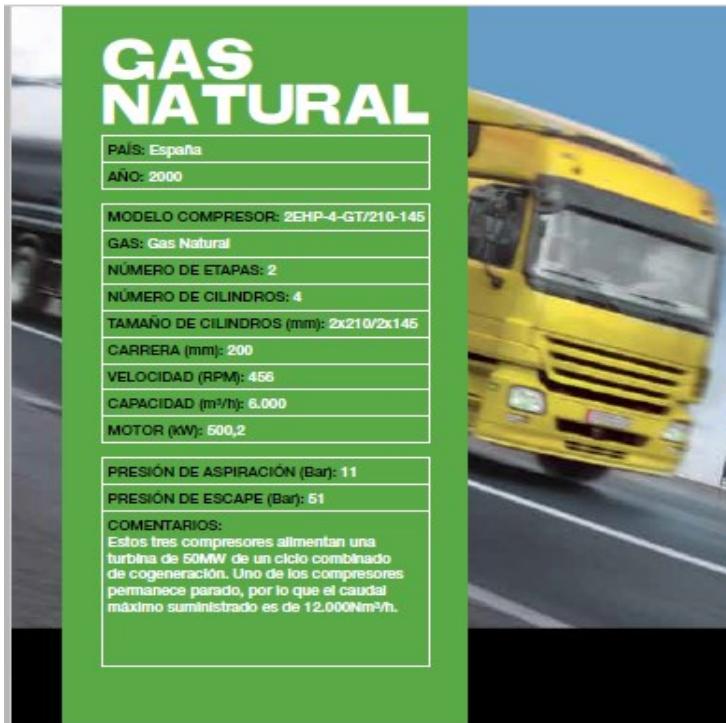
VELOCIDAD (RPM): 456

CAPACIDAD (m<sup>3</sup>/h): 6.000

MOTOR (kW): 500,2

PRESIÓN DE ASPIRACIÓN (Bar): 11  
PRESIÓN DE ESCAPE (Bar): 51

COMENTARIOS:  
Estos tres compresores alimentan una turbina de 50MW de un ciclo combinado de cogeneración. Uno de los compresores permanece parado, por lo que el caudal máximo suministrado es de 12.000Nm<sup>3</sup>/h.



**ABC**  
COMPRESSORS

ARIZAGA, BASTARRICA Y CIA, S.A.

**RELIABLE BEYOND LIMITS**

[www.abc-compressors.com](http://www.abc-compressors.com)

Figura V-6. Ficha técnica de una planta de cogeneración de neumáticos

Existen diferentes tipos de cogeneración que se muestran a continuación:

#### V.3.1.1 COGENERACIÓN CON MOTOR DE GAS

Utilizan gas, gasóleo o fuel-oil como combustible. Son muy eficientes eléctricamente, pero son poco eficientes térmicamente. El sistema de recuperación térmica se diseña en función de los requisitos de la industria y en general se basan en la producción de vapor a baja presión (hasta 10 bares), aceite térmico y en el aprovechamiento del circuito de alta temperatura del agua de refrigeración del motor. Son también adecuadas la producción de frío por absorción, bien a través del vapor generado con los gases en máquinas de doble efecto, o utilizando directamente el calor del agua de refrigeración en máquinas de simple efecto.

Este tipo de instalaciones es conveniente para potencias bajas (hasta 15 MW) en las que la generación eléctrica es muy importante en el peso del plan de negocio. Los motores son la máquina térmica que más rendimiento tiene, pues es capaz de convertir actualmente hasta el 45% de la energía química contenida en el combustible en energía eléctrica, y se espera que en los próximos años este rendimiento aumente.

#### V.3.1.2 COGENERACIÓN CON TURBINA DE GAS

En los sistemas con turbina de gas se quema combustible en un turbogenerador. Parte de la energía se transforma en energía mecánica, que se transformará con la ayuda del alternador en energía eléctrica. Su rendimiento eléctrico es inferior al de los motores alternativos, pero presentan la ventaja de que permiten una recuperación fácil del calor, que se encuentra concentrado en su práctica totalidad en sus gases de escape, que está a una temperatura de unos 500°C, idónea para producir vapor en una caldea de recuperación

Cuando se presenta en el denominado ciclo simple, el sistema consta de una turbina de gas y una caldera de recuperación, generándose vapor directamente a la presión de utilización en la planta de proceso asociada a la cogeneración. Su aplicación es adecuada cuando los requisitos de vapor son importantes (>10 t/h), situación que se encuentra fácilmente en numerosas industrias (alimentación, química, papelera). Son plantas de gran fiabilidad y económicamente rentables cuando están diseñadas para una aplicación determinada.

El diseño del sistema de recuperación de calor es fundamental, pues su economía está directamente ligada al mismo, ya que a diferencia de las plantas con motores alternativos el precio del calor recuperado es esencial en un ciclo simple de turbina de gas.

#### V.3.1.3 COGENERACIÓN CON TURBINA DE VAPOR

En estos sistemas, la energía mecánica se produce por la expansión del vapor de alta presión procedente de una caldera convencional. El uso de esta turbina fue el primero en cogeneración. Actualmente su aplicación ha quedado prácticamente limitada como complemento para ciclos combinados o en instalaciones que utilizan combustibles residuales, como biomasa subproductos residuales que se generan en la industria principal a la que está asociada la planta de cogeneración.

Dependiendo de la presión de salida del vapor de la turbina se clasifican en turbinas a contrapresión, en donde esta presión está por encima de la atmosférica, y las turbinas a condensación, en las cuales ésta está por debajo de la atmosférica y han de estar provistas de

un condensador. En ambos caso se puede disponer de salidas intermedias, extracciones, haciendo posible la utilización en proceso a diferentes niveles de presión.

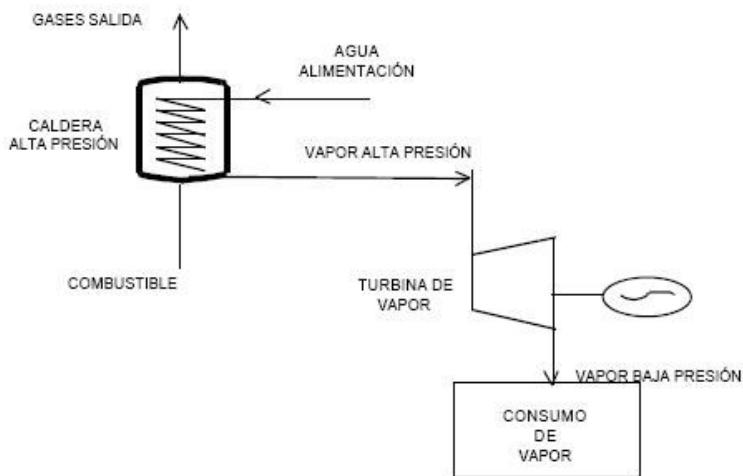


Figura V-7. Cogeneración con turbina de vapor

#### V.3.1.4 COGENERACIÓN EN CICLO COMBINADO CON TURBINA DE GAS Y VAPOR

La aplicación conjunta de una turbina de gas y una turbina de vapor es lo que se denomina "Ciclo Combinado".

En el gráfico adjunto puede verse que los gases de escape de la turbina pueden tirarse a la atmósfera si no se requiere aprovechamiento térmico, a través del bypass, o pueden atravesar la caldera de recuperación, donde se produce vapor de alta presión. Este vapor puede descomprimirse en una turbina de vapor produciendo una energía eléctrica adicional. La salida de la turbina será vapor de baja presión, que puede aprovecharse como tal o condensarse en un condensador presurizado, produciendo agua caliente o agua sobrecalentada, que será utilizado en la industria asociada. Si la demanda de vapor es mayor que la que pueden proporcionar los gases de escape, puede producirse una cantidad de vapor adicional utilizando un quemador de postcombustión, introduciendo una cantidad adicional de combustible (gas natural) directamente a un quemador especial con el que cuenta la caldera. Esto puede hacerse porque los gases de escape son aún suficientemente ricos en oxígeno (en un ciclo combinado con motor alternativo no podría hacerse, ya que los gases de escape son pobres en oxígeno)

En un ciclo combinado con turbina de gas el proceso de vapor es esencial para lograr la eficiencia del mismo. La selección de la presión y la temperatura del vapor vivo se hacen en función de las turbinas de gas y vapor seleccionadas, selección que debe realizarse con criterios de eficiencia y economía. Por ello se requiere una ingeniería apropiada capaz de crear procesos adaptados al consumo de la planta industrial asociada a la cogeneración, que al mismo tiempo dispongan de gran flexibilidad que posibilite su trabajo eficiente en situaciones alejadas del punto de diseño.

Una variante del ciclo combinado expuesto, en el que la turbina de vapor trabaja a contrapresión (esto es, descomprime el vapor entre una presión elevada y una presión inferior, siempre superior a la atmosférica) es el ciclo combinado a condensación, en el que el

aprovechamiento del calor se realiza antes de la turbina de vapor, quedando ésta como elemento final del proceso. El vapor de salida se condensa en un condensador que trabaja a presión inferior a la atmosférica, para que el salto térmico sea el mayor posible.

#### V.3.1.5 COGENERACIÓN CON MOTOR DE GAS Y TURBINA DE VAPOR

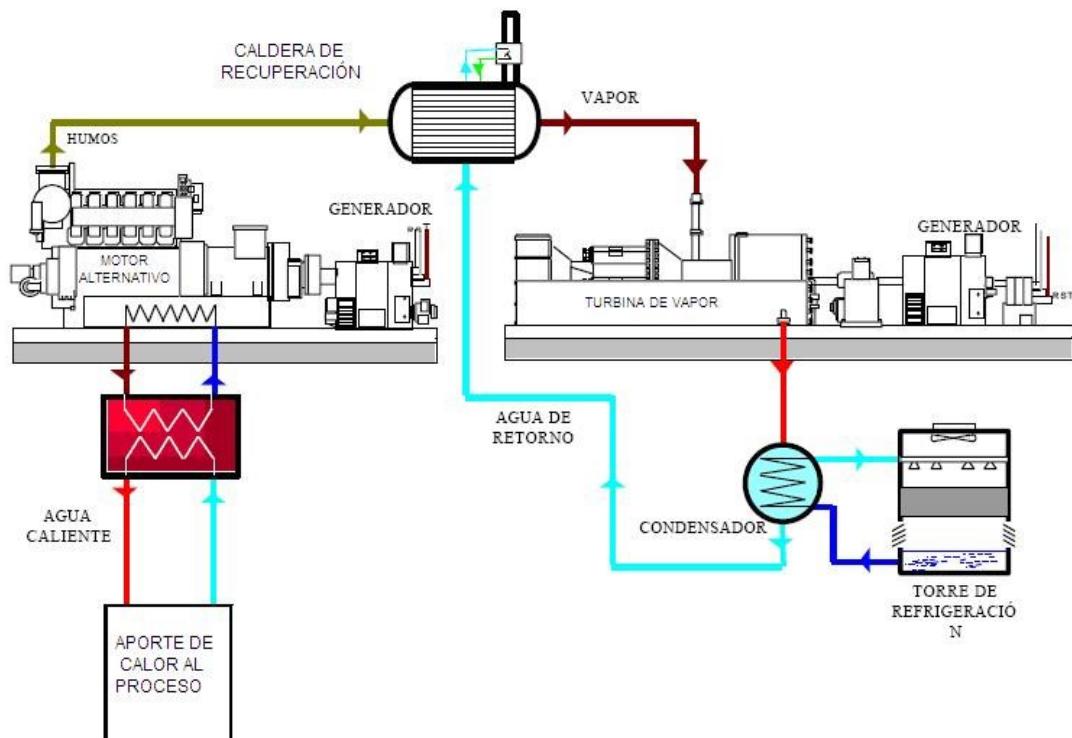


Figura V-8. Planta de cogeneración con motor de gas y turbina de vapor

En este tipo de plantas, el calor contenido en los humos de escape del motor se recupera en una caldera de recuperación, produciendo vapor que es utilizado en una turbina de vapor para producir más energía eléctrica o energía mecánica. El circuito de refrigeración de alta temperatura del motor se recupera en intercambiadores, y el calor recuperado se utiliza directamente en la industria asociada a la planta de cogeneración. El rendimiento eléctrico en esta planta es alto, mientras que el térmico disminuye considerablemente.

#### V.3.2 COGENERACIÓN DE RESIDUOS

La cogeneración consiste en la producción y aprovechamiento de dos o más energías, habitualmente se utilizan la energía eléctrica y la energía térmica (calor). En los procesos tradicionales de producción de electricidad en centrales térmicas se produce una gran cantidad de calor que no se aprovecha y que se libera al medio ambiente. En cambio, en la cogeneración, la planta de producción de energía se coloca cerca del lugar del consumo de la misma.

El uso de un residuo como materia prima para los procesos de producción de energía es muy favorable tanto económicamente como medioambientalmente. De forma económica, porque se transforma un residuo (que lleva asociado un coste de gestión) en energía (que implica un ingreso económico). Y ambientalmente, porque es una vía de reducir la cantidad de residuos generados.

Uno de los requisitos para implantar una instalación de cogeneración debe ser por un lado, la producción de residuos que sean combustibles o que puedan ser transformados en un combustible. Por otro lado, deberán tener una demanda de energía térmica y energía eléctrica.

Estos requisitos se cumplen con facilidad en:

Las plantas de tratamiento de aguas residuales mediante proceso biológico, ya sean urbanas como industriales. Los lodos generados, a través de un proceso de digestión anaerobia, son transformados en biogás (dióxido de carbono y metano) y lodos estabilizados, los cuales tienen aplicación agrícola como fertilizantes. El biogás, dependiendo de la riqueza relativa en metano que posea, tiene un mayor o menor poder calorífico, que en cualquier caso puede ser utilizado en un proceso de cogeneración. En las plantas de tratamiento de aguas residuales, la energía térmica producida en el proceso de cogeneración se puede utilizar para mantener constante la temperatura del digestor anaerobio (a 36°C) y para calentar previamente los lodos digeridos antes del proceso de deshidratación, y consecuentemente aumentar la eficacia de esta operación.

Las explotaciones agrícolas y ganaderas, en las que se producen residuos biodegradables que son sometidos a un tratamiento de digestión anaerobia, para reducir la cantidad de residuos, a la vez que se genera una considerable cantidad de biogás. En este tipo de explotaciones, el calor que se desprende en la cogeneración se puede utilizar para mantener a una temperatura confortable las naves en las que se encuentran los animales, para mantener controlada la temperatura en los invernaderos y para disminuir la sequedad del residuo sólido final precalentándolo previamente a la deshidratación.

Vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU), en los que, dadas las condiciones en las que se encuentran los residuos y su naturaleza orgánica, se produce un proceso natural de biometanización en el que se genera biogás. En los vertederos de RSU, la energía térmica excedente de la cogeneración puede ser de gran utilidad en el proceso de tratamiento de los lixiviados generados para reducir la humedad del residuo final, incluso hasta llegar a secarlo, mediante un proceso de concentración-evaporación. Para transformar el biogás en energía eléctrica y energía térmica existen dos tecnologías alternativas:

Los motores de combustión: son válidos cuando la concentración de metano en el biogás es superior al 40%. Tienen una eficacia eléctrica del 35-40% y una eficacia térmica del 35-40%.

Las microturbinas: pueden operar con una riqueza de metano del 30% (35% en el arranque), su eficiencia eléctrica es del 25-30% y su eficiencia térmica del 55-60%.

Teniendo en cuenta la eficiencia global, es decir, la suma de la eficiencia eléctrica y de la eficiencia térmica, las microturbinas presentan mejores resultados que los motores de combustión.

En cuanto al mantenimiento, las microturbinas sólo tienen una parte móvil y son lubricadas por aire, mientras que los motores de combustión son mucho más complejos a nivel mecánico y precisan de aceite para su lubricación. Esto hace que el mantenimiento necesario de las microturbinas sea muy bajo mientras que los motores necesitan atención constante.

En el caso de los motores, el calor excedente se obtiene del circuito de refrigeración y de los gases de combustión, mientras que en el caso de las microturbinas, la energía térmica se obtiene de una única corriente, aprovechando la alta temperatura de los gases de combustión.

Tanto en el uso de motores como el uso de microturbinas, el biogás debe ser limpiado antes de entrar en contacto con estos equipos. En ambos casos se debe eliminar el biogás de los siloxanos, los cuales se adsorben en un filtro de carbón activo. En el caso de los motores de combustión, además, también se debe eliminar del biogás el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), el cual es un ácido muy corrosivo.

#### V.4 RECAUCHUTADO

Actualmente el recauchutado de neumáticos se desarrolla principalmente para los neumáticos usados de camión, aprovechándose las carcasa originales y cambiando la banda de rodadura. Las carcasa pueden llegar a reutilizarse de ésta manera hasta tres veces, alargando así su vida útil.

El recauchutado del neumático usado es un proceso que permite reutilizar la carcasa del neumático, al colocar una nueva banda de rodadura, siempre que conserve las cualidades que garanticen su uso, como si fuera uno nuevo. En la actualidad se están poniendo en marcha los Reglamentos de homologación de recauchutado, (R108 para neumáticos de turismo; R109 para neumáticos de camión) certifican la calidad de las instalaciones y los procesos productivos de las unidades que fabrican los neumáticos recauchutados, con controles y ensayos sobre el producto similares a los exigidos para la homologación de los neumáticos nuevos.

El proceso de recauchutado consiste en sustituir las formas viejas del neumático y reconstruir su estructura original convirtiéndolo en un neumático de características similares al nuevo. Este proceso es técnicamente muy complejo.

El recauchutado del neumático es un procedimiento mediante el cual se recuperan las propiedades originales de un neumático usado. Se hace aplicando una nueva banda de rodadura de caucho, en lugar de la antigua. En el proceso de recauchutado debe comprobarse que la carcasa no tiene daños (poros, fallos de material, pequeñas ralladuras...) Solamente así no se comprometerá ni el rendimiento ni la seguridad del neumático. Si no cumple los requisitos para volver a usarse en un automóvil, el neumático debería ser reciclado para aprovechar el caucho en otras aplicaciones.

Sólo un 20-30% de la masa utilizada para la fabricación del neumático se sustituye por una nueva. El método de recauchutado es sencillo. Primero se pone una mezcla de caucho sobre la carcasa previamente preparada y luego se realiza un vulcanizado, en una prensa a alta presión y temperatura.

Pueden ser recauchutados todo tipo de neumáticos. La banda de rodadura debe tener la misma profundidad que la carcasa que sirven de base en el recauchutado y los neumáticos deben tener una banda de rodadura con una profundidad de al menos 2-3 mm



Figura V-9. Recauchutado de un neumático

Países como Italia o Dinamarca recauchutan alrededor de un 22% de los NFU que generan. Actualmente se recauchutan en España un 10% (en peso) de los NFU que se producen, el porcentaje es bastante más elevado si se consideran solamente los neumáticos de camión.

Atendiendo a la superficie renovada se distinguen tres sistemas:

- Recauchutado integral, en el cual se renueva la banda de rodamiento y los flancos, (de talón a talón).
- Recauchutado semi-integral. En éste se renueva la banda de rodamiento y parte del flanco.
- Recauchutado sólo de la banda de rodamiento.

Atendiendo al sistema de adhesión de las nuevas gomas hay dos sistemas:

- Recauchutados en caliente, en el cual el proceso de vulcanización se realiza en prensas a una temperatura comprendida entre 150 y 160°C.
- Recauchutados en frío. En este proceso la banda de rodamiento está previamente vulcanizada y se adhiere mediante una goma (llamada unión), vulcanizándose en autoclaves a una temperatura entre 98°C y 125°C.



Figura V-10. Imágenes de una planta de recauchutado

El recauchutado permite alargar la vida de los neumáticos en una media de dos ciclos y disminuye la necesidad de fabricar nuevos.

A través de la producción y uso de neumáticos recauchutados pueden alcanzarse ahorros de entre un 50 y un 75% en el consumo de energía y materias primas, así como en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Según la investigación, también, una repercusión directa en la economía de los usuarios.

## VENTAJAS

- Reducción de los costes. Son más baratos que un neumático nuevo
- Los neumáticos para camiones utilizados de manera óptima pueden recauchutarse hasta dos o tres veces.
- El proceso de recauchutado aprovecha recursos y es menos contaminante que la producción de neumáticos nuevos.

- Los neumáticos recauchutados son más resistentes al “aquaplaning” que los neumáticos viejos.
- Es totalmente falso que estallen (el recauchutado es integral) o que esas ruedas no pueden ser equilibradas.

## DESVENTAJAS

- Aguantan menos kilómetros que los neumáticos nuevos
- Algunas propiedades del neumático (volumen, adherencia, precisión de la conducción) pueden ser peores que las de un neumático nuevo si el proceso de recauchutado no se realiza correctamente.
- Deben elegirse de marcas y fabricantes conocidos, que trabajen con buenos materiales y seleccionen cuidadosamente las cubiertas a utilizar (con inspecciones visuales y radiográficas)
- No deberían excederse de carga y velocidad

### V.4.1 CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE MATERIALES PARA NEUMÁTICOS RECAUCHUTADOS

Se ha encontrado a través de diferentes bibliografías diferentes valores para el ahorro de energía y materiales (litros de petróleo) asociado al recauchutado, tanto de neumáticos de turismo como de vehículos comerciales.

Para calcular la contribución energética que cada material aporta al neumático, se toma por una parte los valore de pesos y composiciones porcentuales estimadas para cada parte del neumático. Las cantidades resultantes se multiplican por los valores de intensidad energética más y menos favorables que se obtienen para cada material.

#### • NEUMÁTICOS DE NUEVA FABRICACIÓN.

$$E_{Tot F} = E_{proceso\ fabricación} + E_{implicada\ en\ las\ materias\ primas} \quad (1)$$

$$E_{proc\ fabricación} = E_{Carcasa} + E_{bandas(R+F+GU)} + E_{textil} + E_{acero} \quad (2)$$

$$E_{materias\ primas} = \% \text{ de cada material} * \text{Contenido } E \text{ del material} \quad (3)$$

#### • NEUMÁTICOS RECAUCHUTADOS.

$$E_{Tot R} = E_{proceso\ reacuchutado} + E_{constitución\ materias\ primas} \quad (4)$$

$$E_{proc\ reacuchutado} = E_{prep} + E_{recauchut} + E_{fab\ mat} \quad (5)$$

$$E_{constitución\ mat\ prim} = \% \text{ de cada material} * \text{Cont } E \text{ del material} \quad (6)$$

Figura V-11. Ecuaciones para el cálculo de neumáticos nuevos y recauchutados

A continuación, en la Tabla V-4, se muestra una comparativa entre neumáticos nuevos y recauchutados teniendo en cuenta la estimación de los pesos de cada parte de neumático.

Tabla V-4. Estimación de pesos de diferentes tipos de neumático

|                   | PESO (Kg) | PORCENTAJE MASA (%) |
|-------------------|-----------|---------------------|
| CARCASA           | 54,5      | 77,9                |
| BANDA DE RODADURA | 14,00     | 20,0                |
| GOMA DE FLANCOS   | 1,50      | 2,1                 |
|                   | PESO (Kg) | MASA PORCENTAJE (%) |
| CARCASA           | 54,50     | 76,2                |
| BANDA DE RODADURA | 15,50     | 21,7                |
| GOMA DE UNIÓN     | 1,25      | 1,7                 |
| GOMA DE FLANCOS   | 0,25      | 0,4                 |
|                   | PESO      | PORCENTAJE MASA (%) |
| CARCASA           | 4,0       | 53,3                |
| BANDA DE RODADURA | 3,5       | 46,7                |
|                   | PESO (kg) | MASA PORCENTAJE (%) |
| CARCASA           | 4,0       | 44,4                |
| BANDA DE RODADURA | 3,5       | 38,9                |
| GOMA DE FLANCOS   | 1,5       | 16,7                |

Para el cálculo del consumo energético de los neumáticos de camión debido a los materiales se obtienen los siguientes datos que se muestran en la Tabla V-5:

Tabla V-5. Consumo energético (en litros de petróleo) debido a los materiales en neumáticos de camión recauchutados

|                   | VALORES FAVORABLES (L petróleo) | VALORES DESFAVORABLES (L petróleo) | VALORES MEDIOS (L petróleo) |
|-------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| BANDA DE RODADURA | 30,19                           | 39,4                               | 34,79                       |
| FLANCOS           | 0,38                            | 0,518                              | 0,45                        |
| GOMAS DE UNIÓN    | 0,99                            | 1,13                               | 1,06                        |
| TOTAL             | 31,56                           | 41,05                              | 36,31                       |

En el análisis del consumo energético debido al proceso productivo, se diferencia entre los neumáticos fabricados por el método en frío y en caliente. Los valores medios obtenidos en los procesos de recauchutado en las diferentes fuentes bibliográficas, son de 83 MJ/neumático para el proceso en frío y de 427 MJ/neumático para el proceso de recauchutado en caliente. Esto supone 2,30 l para el proceso en frío y 11,85 l para el proceso en caliente. Se tiene en cuenta los volúmenes totales de producción en España. La media ponderada del consumo energético asociado al proceso es de 6,55 l de petróleo (236,41 MJ/neumático).

En conclusión, la energía total para el proceso de recauchutado de los neumáticos de camión es:

$$E_{Tot} = 36,31 + 6,55 = 42,87 \text{ Litros Petróleo}$$

De la misma forma que se ha analizado los neumáticos de camión, se analiza los neumáticos de turismo de dimensiones 195/65/R15. En la Tabla V-6, se muestra el consumo energético de los materiales en el caso de neumáticos de turismo:

Tabla V-6. Consumo energético (en litros de petróleo) debido a los materiales en neumáticos de turismo

|                   | VALORES FAVORABLES<br>(L petróleo) | VALORES DESFAVORABLES<br>(L petróleo) | VALORES MEDIOS<br>(L petróleo) |
|-------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| BANDA DE RODADURA | 6,76                               | 8,63                                  | 7,69                           |
| FLANCOS           | 2,41                               | 3,23                                  | 2,82                           |
| TOTAL             | 9,17                               | 11,86                                 | 10,51                          |

En las fuentes bibliográficas, indican que los valores medios de consumos del proceso de recauchutado de neumáticos turismo, se han calculado en 91,5 MJ/neumático (2,54 L petróleo).

En conclusión, la energía total para el proceso de recauchutado de los neumáticos de camión es:

$$E_{Tot} = 10,51 + 2,54 = 13,05 \text{ Litros Petróleo}$$

#### V.4.2 COMPARATIVA ENTRE NEUMÁTICOS NUEVOS Y RECAUCHUTADOS

En las siguientes Figuras V-10 y V-11, se muestra unas gráficas comparativas del coste energético asociado a materiales y al proceso de fabricación entre neumáticos nuevos y neumáticos recauchutados. Por un lado, se muestra la comparativa de los neumáticos de camión y por otro lado la comparativa de los neumáticos de turismo.

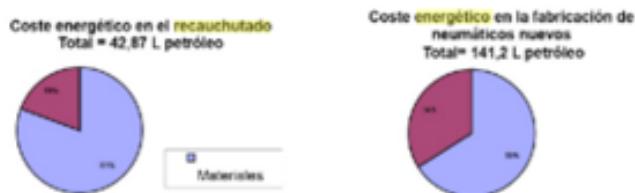


Figura V-12. Comparación del coste energético asociado a materiales y al proceso de fabricación de neumáticos nuevos y de recauchutados para camión.



Figura V-13. Comparación del coste energético asociado a materiales y al proceso de fabricación de neumáticos nuevos y de recauchutado para turismo

## V.5 TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

### V.5.1 PIRÓLISIS

Proceso termoquímico mediante el cual el material orgánico de los subproductos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmósfera deficiente de oxígeno, y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua.

En el proceso de pirólisis (calentamiento a temperatura moderada en ausencia de oxígeno) la parte orgánica volátil del neumático se descompone en gases y líquidos y los componentes inorgánicos, principalmente acero y negro de carbono no volátil, permanecen como residuo sólido. Los gases pirolíticos están compuestos principalmente por metano, butenos y butanos junto con otros hidrocarburos ligeros, también contienen en baja proporción CO, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S y tienen un gran poder calorífico (68 – 84 MJm<sup>-3</sup>). Los sólidos pirolíticos (de iguales dimensiones que el original) se desintegran fácilmente en polvo de carbono, cordones de acero y filamentos.

Los productos obtenidos mediante pirólisis y sus características dependen de la fuente de alimentación, las condiciones experimentales y las características específicas del sistema empleado (tamaño y tipo de reactor, eficiencia de la transferencia de calor, tiempo de permanencia...)

En el proceso de pirólisis procedente de los neumáticos usados, se transforma el caucho granulado mediante la tecnología de pirólisis para obtener aditivos para combustibles líquidos y negro de carbón reutilizable para la producción de nuevo caucho. Esta planta no sólo será capaz de absorber gran parte del caucho procedente de neumáticos usados que habitualmente se utiliza en la producción de granulado y polvo de caucho, sino que también podrá procesar aquel material que, sin sus características fisicoquímicas, ya no es útil en procesos de valorización material debido a su cristalización y pérdida de propiedades.

Este proceso (fábrica piloto) está operativo en Taiwán desde 2002 con cuatro líneas de pirólisis que permiten reciclar 9.000 toneladas/año. En la actualidad el procedimiento ha sido mejorado y es capaz de tratar 28.000 toneladas de neumáticos usados/año, a través de una sola línea. Los productos obtenidos después del proceso de pirólisis son principalmente:

- GAZ, similar al propano que se puede emplear para uso industrial
- Aceite industrial líquido que se puede refinar en Diésel
- Coque

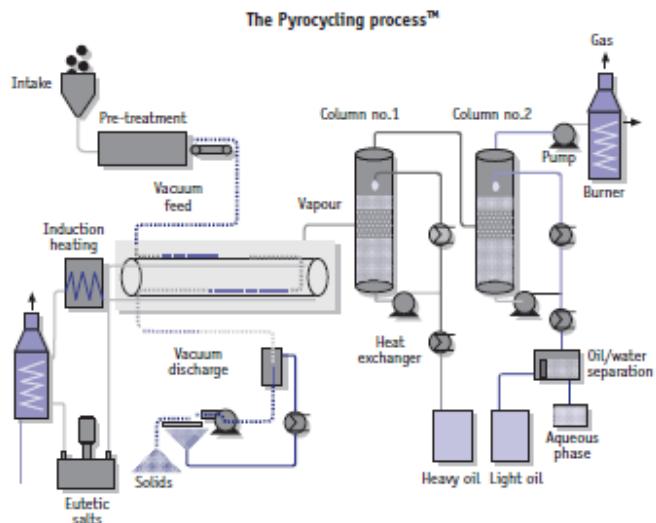


Figura V-14. Proceso de pirólisis

La pirólisis se ha considerado como una de las soluciones más factibles para valorizar NFU y que además puede proporcionar un provecho económico a gran escala. El interés se centra en el hecho de que los productos obtenidos por este proceso son de fácil manipulación, almacenamiento y transporte.

La fracción gaseosa generada puede ser utilizada como combustible para el proceso autotérmico. Los materiales carbonosos pueden ser utilizados como combustible de alta calidad o como precursores de negro de carbono o carbono activo.

El producto líquido es una mezcla compleja de compuestos orgánicos de 5 -20 átomos de carbono con alto contenido en aromáticos. Tras la destilación, la fracción líquida puede emplearse como aceites o ser mezclada para obtener combustibles para automoción. También se obtienen otros productos químicos como benceno, tolueno, xilenos y limonenos.

Por último, la fracción sólida puede utilizarse como combustible sólido o como negro de carbono de bajo grado.

La viabilidad económica de la recuperación de neumáticos usados mediante pirólisis depende claramente de una mejora de las propiedades finales de los productos pirolíticos y en sus salidas comerciales.

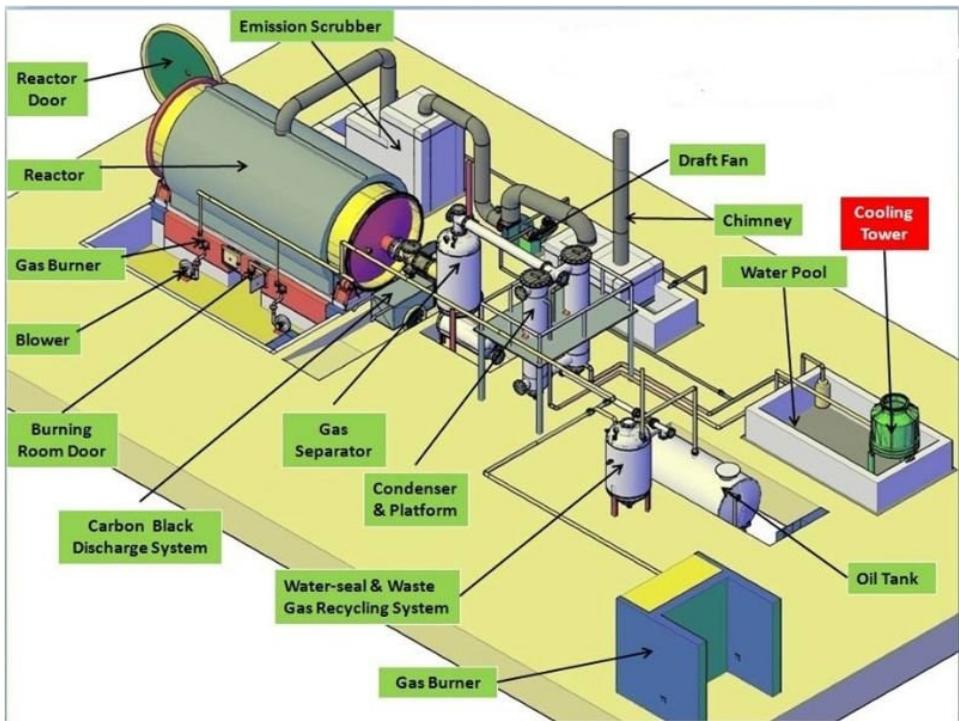


Figura V-15. Planta Pirólisis de neumáticos

Ventajas:

- Se genera una fracción líquida fácil de manejar, transportar y almacenar.
- Reducción de emisiones a la atmósfera al ser un proceso cerrado.
- Admite como combustible material residual de otros procesos
- No genera gases contaminantes como óxidos de nitrógeno y azufre, los que se producen en la combustión
- Todos los productos o subproductos generados pueden ser reutilizados.
- El proceso es autosuficiente con respecto a la energía.

Desventajas:

- Requiere alta inversión para la instalación
- La alimentación requiere pretratamiento para que se introduzca material homogéneo y con humedad adecuada que no afecte al rendimiento
- El residuo carbonoso ("char") tiene PCI bajo
- Operaciones de mantenimiento para las cenizas
- Costes altos hornos pirolíticos

Existen diferentes estudios realizados sobre la pirólisis:

- Un grupo de la Escuela Superior de Ingenieros de Bilbao estudió la caracterización del líquido pirolítico obtenido a temperaturas de 300-700 °C en atmósfera de nitrógeno, es un autoclave, durante 30 min, obteniéndose que la temperatura no afectaba a la composición de los aceites. Bajo las mismas condiciones y a 500°C se obtienen gases

pirolíticos muy ricos en hidrocarburos con baja proporción de H<sub>2</sub>S y elevado poder calorífico (83.9 MJm<sup>-3</sup>)

- A.M. Mastral et al. estudiaron la influencia de las principales variables de proceso (Temperatura, tiempo y presión) en la hidroconversión del neumático mediante un "reactor YB /tubing bomb reactors"). Encontraron que a elevada temperatura no mejoraba la conversión total del caucho pero decrecía el rendimiento a aceite (47% a 375°C y 42% a 425°C). Se observó la misma tendencia para tiempos largos de reacción.
- A.A. Yousefi et al. estudiaron el efecto del aceite pirolítico de los neumáticos usados sobre las propiedades del asfalto modificado con polietileno reciclado. Los resultados mostraron que se mejoraban las prestaciones del asfalto a moderadas y altas temperaturas.
- Algunos autores han estudiado la cinética de la pirólisis de neumáticos mediante técnicas basadas en termo gravimétricas TG/DTG. Estos estudios permiten identificar los diferentes tipos de caucho en el neumático, basándose en los resultados de su descomposición térmica. No obstante, la mayoría de estos estudios se aproximan a una cinética de la descomposición del caucho (desvolatilización) sin establecer los esquemas cinéticos para la formación de productos secundarios.

Observando diferentes precios de plantas de pirólisis de neumáticos, se ha estimado elegir una planta de pirólisis con las características que se ven en la Figura V-11, Figura V-12.



Figura V-16. Planta de pirólisis para flujo de 2-10 toneladas al día

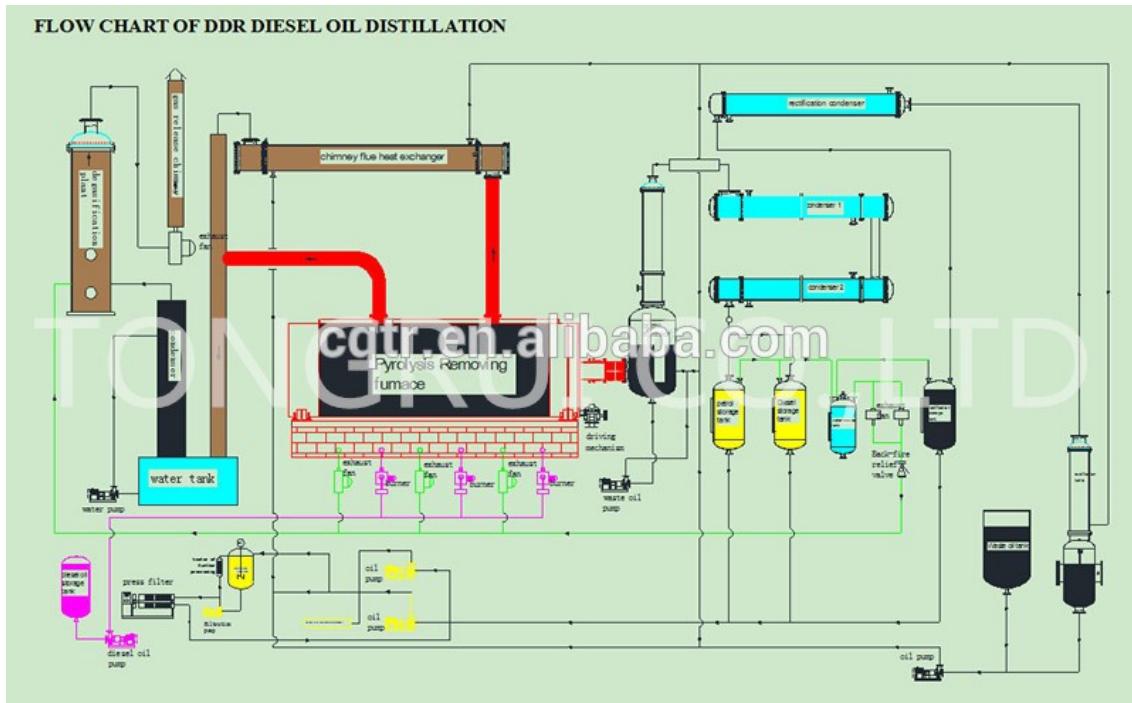


Figura V-17. Diagrama de flujo de la instalación de pirólisis

La planta de pirólisis que presenta las características que se han visto anteriormente, tiene un coste que oscila entre 120.000 € y 200.000 €, con un flujo diario de 2 a 10 toneladas al día.

## V.5.2 INCINERACIÓN

Proceso por el que se produce la combustión de los materiales orgánicos de los neumáticos a altas temperaturas en hornos con materiales refractarios de alta calidad. Es un proceso costoso y además presenta el inconveniente de la diferente velocidad de combustión de los diferentes componentes y la necesidad de depuración de los residuos por lo que no resulta fácil de controlar y además es contaminante. Genera calor que puede ser usado como energía, ya que se trata de un proceso exotérmico. Con este método, los productos contaminantes que se producen en la combustión son muy perjudiciales para la salud humana, entre ellos el monóxido de carbono, xileno, hollín, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, óxidos de zinc, benceno, fenoles, dióxido de azufre, óxidos de plomo, tolueno. Además el hollín contiene cantidades importantes de hidrocarburos aromáticos policíclicos, altamente cancerígenos. El zinc, en concreto, es particularmente tóxico para la fauna acuática. También tiene el peligro de que muchos de estos compuestos son solubles en el agua por lo que pasan a la cadena trófica y de ahí a los seres humanos.

Tabla V-7. Análisis mineral de la ceniza de un neumático (% en peso)

| COMPUESTO   | %     |
|---|-------|
| Dióxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )                | 22,00 |
| Dióxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 9,09  |
| Óxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )     | 1,45  |
| Óxido de Calcio (CaO)                                 | 10,61 |
| Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> )                | 2,57  |
| Óxido de Magnesio (MgO)                               | 1,35  |
| Óxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)                    | 1,10  |
| Óxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)                   | 0,92  |
| Óxido de Azufre (VI) (SO <sub>3</sub> )               | 15,68 |
| Óxido de Fósforo (V) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>    | 1,03  |
| Óxido de Zinc (ZnO)                                   | 34,50 |

Ventajas:

- Utilizar NFU en vez de otro tipo de combustibles resulta ser muy ventajosa para el medio ambiente por las siguientes razones:
- Bajo contenido de humedad respecto a otro tipo de combustibles, por lo que no es necesario un sistema de secado previo a la entrada del horno.
- Contenido en azufre bajo, lo que supone una reducción de las emisiones de SO<sub>x</sub> respecto a los combustibles convencionales.
- Disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto a otro tipo de combustibles debido al origen renovable del contenido de caucho natural del neumático.

Los neumáticos fuera de uso poseen un elevado poder calorífico, de tal manera que les convierte en unos buenos combustibles para instalaciones industriales de grandes consumos energéticos. La utilización del neumático fuera de uso como combustible aprovecha la energía térmica que produce la combustión de sus componentes, derivados del petróleo gran parte de ellos. Se estima que una tonelada de neumáticos puede ahorrar 0.7 toneladas de fuel. Dependiendo del tipo de sistema de horno, los combustibles alternativos pueden sustituir los combustibles fósiles hasta en un 25% sin mayores problemas importantes asociados con el proceso de cocción del clíker y con la calidad.

Al quemar los neumáticos en las cementeras, estos cauchos emiten sustancias contaminantes. En el proceso de producción de cemento, donde es necesario el uso de combustibles, normalmente se utilizaba el petróleo, pero la energía de los neumáticos, como fuente calórica

resulta mucho más barata, así como otros combustibles alternativos como son los aceites industriales o los residuos.

La combustión de los neumáticos generan productos muy perjudiciales para la salud como son el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, óxidos de zinc, benceno, fenoles, óxidos de plomo o tolueno, que se dispersan en el aire. El zinc resulta altamente tóxico para la fauna acuática y, además, existe el peligro de que, al ser muchos de estos componentes solubles en el agua, pasan a la cadena trófica y van a parar, finalmente, a los seres humanos.

En general, el uso de neumáticos desechados como combustible en hornos cementerios reduce la producción de óxidos de nitrógeno y dióxidos de azufre, en relación a los carbones normalmente utilizados en la fabricación del cemento, ya que tienen un menor contenido de éstos elementos.

El azufre del neumático se incorpora a la cal de calcinación en forma de carbonato cálcico, que es una materia prima en la fabricación del cemento. Toda la ceniza se absorbe en la estructura cristalina del clínker; de esta forma, no hay residuos procedentes del neumático en los hornos de cemento. Un elevado contenido de cenizas provoca un menor flujo de materias primas que pasan por el precalentador del horno, aumentando la temperatura del gas de escape, con lo cual se tiene una mayor pérdida térmica. En este sentido los neumáticos presentan ventaja frente al carbón.

#### EMISIONES TRAS LA INCINERACIÓN NEUMÁTICO

Reducción de los óxidos de nitrógeno y del SO<sub>2</sub>, por el menor contenido en azufre que el combustible tradicional

No existe ninguna teoría que permita identificar con exactitud el efecto en las emisiones causadas por el uso de neumáticos desechados en los hornos de cemento. Estos sólo pueden obtenerse por medio de una medición real durante un ensayo.

Disminución de 1,83 Mt del CO<sub>2</sub> emitido, ya que el contenido de carbono en neumático es menor que en otro tipo de combustibles fósiles usados para tal fin. Esto supone una posible disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> en la combustión del neumático debido al caucho natural.

A continuación se recoge la experiencia internacional que permite estimar la tendencia esperada en el peor de los casos para cada una de las emisiones.

#### Óxidos de nitrógeno y otros compuestos nitrogenados

La formación de NOx es una inevitable consecuencia de la alta temperatura de combustión (llama del orden de 2.000°C). Es formado principalmente por el aire de combustión (NOx térmico). Si bien una parte del contenido de nitrógeno en los neumáticos podría teóricamente provocar la formación de NOx combustible, este efecto es superpuesto por otras influencias más importantes como, por ejemplo, el tamaño de la llama. Además ésta posibilidad se ve reducida dado los menores contenidos de nitrógeno en el neumático frente al carbón.

#### Dióxido de azufre y otros compuestos sulfurosos (SOx)

El azufre entra en el proceso como componente de los combustibles y de las materias primas (en este caso, como sulfatos o sulfuros). El azufre que entra como sulfuro en las materias primas es parcialmente evaporado (~30%) en las primeras etapas del proceso, y emitido directamente a la atmósfera en su mayor parte. El resto del azufre que entra por las materias primas y el total

aportado por los combustibles será capturado íntegramente en el clínker y no aparecerá en las emisiones.

En general, los hornos de vía seca, trabajando con materias primas no altas en azufre, no presentan problemas significativos de emisiones de SOx y su generación se ve reducida por el uso de neumáticos desechados al contener estos menores porcentajes que el carbón. La emisión de SO<sub>2</sub> es influenciada en mayor grado por sulfuro volátil en la mezcla de crudo que por combustible alternativo. El total aportado por los neumáticos es capturado en el clínker y no aparecerá en las emisiones. En general, los hornos de vía seca con intercambiador, trabajando con materias primas no altas en azufre, no tendrán problema significativo de emisiones de SOx.

#### Monóxido de carbono (CO)

La combustión en el quemador secundario de neumáticos a menudo produce una emisión mayor de CO. Una elevada tasa de combustión y/o valores máximos de la tasa de alimentación (neumáticos enteros) puede provocar problemas al ingresar aire falso que haga bajar la temperatura en el precalcinador.

#### Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

La emisión de CO<sub>2</sub> se sitúa entre 800 y 900 kg/t de clínker. Casi un 60% de esta emisión proviene del proceso de calcinación, y es por tanto inevitable. El resto, deriva de la combustión de los combustibles. La emisión de CO<sub>2</sub> en la combustión de los neumáticos representa un porcentaje bajo en relación al aportado por las materias primas. Su formación es inherente al proceso de calcinación, y es por tanto inevitable. Cabe señalar, que los cambios de tecnología, la mejora de la eficiencia de los procesos de combustión ha reducido más del 30% las emisiones asociadas de CO<sub>2</sub> en los últimos 25 años.

#### Compuestos orgánicos (hidrocarburos)

Por lo general, no es de esperar ninguna correlación frente a la incineración de neumáticos, sin embargo, mediciones con métodos sensibles pueden ser necesarias en el marco del proyecto. Pueden evitarse varios problemas desde el principio, si se dedica suficiente atención a perfeccionar la incineración a altas temperaturas y si los neumáticos se utilizan sólo en el quemador primario bajo condiciones de funcionamiento normales.

#### Metales y compuestos metálicos

El proceso cementero tiene una gran capacidad para capturar los metales que entran con los materiales o los combustibles. Los metales son absorbidos en el clínker o en el polvo recogido en el filtro. Está ampliamente demostrado que el uso de combustibles alternativos como los neumáticos, no conduce a un incremento significativo de los metales en el cemento ni en el polvo del horno, y que tampoco se ven afectadas las emisiones cuando se limitan las entradas de los volátiles (el neumático tiene bajísimos contenidos de Cd y Tl, y no contiene Hg). El moderno sistema de reducción de la emisión de partículas en los gases de la chimenea es garantía de la reducción de las emisiones de metales.

## Compuestos orgánicos volátiles (COVs)

Las emisiones de compuestos orgánicos pueden ocurrir en las primeras etapas del proceso, al volatilizarse la materia orgánica presente en las materias primas al entrar en contacto con los gases calientes. En la industria del cemento, estas emisiones no son indicadoras de combustión incompleta (dada la muy alta temperatura, largos tiempos de residencia y condiciones de exceso de oxígeno del proceso). La cantidad de emisiones de compuestos orgánicos es tan pequeña, que no representa un aumento perceptible de riesgo para la salud pública o el medioambiente. La descarga de gases típica de un horno de cemento contiene menos de una décima parte de los hidrocarburos presentes en los gases de descarga de un automóvil.

## Partículas

Las principales fuentes de partículas son los hornos, los molinos de materias primas, enfriadores de clínker y molinos de cemento. En todos estos procesos, grandes volúmenes de gases fluyen a través de materiales polvorrientos, y el producto final también es un polvo fino. La naturaleza del polvo recogido en los tres focos principales es: materias primas en las emisiones particuladas del horno, finos de clínker en el enfriador y producto final (cemento) en los molinos de cemento. La eficiencia de los modernos electrofiltros y filtros de mangas permiten reducir las emisiones de partículas de los focos principales a niveles muy bajos.

Fuentes secundarias de emisión de partículas son los almacenes y sistemas de manejo de los materiales, así como las calles al interior de la planta. Esta contaminación difusa es reducida dentro de cementos Bío Bío a niveles de mínimo impacto para la calidad del aire, por medio del empleo de aspiradoras móviles que recorren constantemente el interior de la planta.

Tabla V-8. Energía contenida y emisión de CO<sub>2</sub> de diversos combustibles

| COMBUSTIBLE | ENERGÍA (GJ/t) | EMISIONES (kgCO <sub>2</sub> /t) | FACTOR RELACIÓN EMISIONES/ENERGÍA (kg CO <sub>2</sub> /GJ) |
|-------------|----------------|----------------------------------|--|
| Neumáticos  | 32,0           | 2.270                            | 85   |
| Carbón      | 27,0           | 2.430                            | 90   |
| Coque Pet   | 32,4           | 3.240                            | 100  |
| Diésel      | 46,0           | 3.220                            | 70   |
| Gas Natural | 39,0           | 1.989                            | 51   |
| Madera      | 10,2           | 1.122                            | 110  |

Tabla V-9. Análisis de las cenizas de un neumático

| COMPUESTO   | %     |
|---|-------|
| Dióxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )                | 22,00 |
| Dióxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 9,09  |
| Óxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )     | 1,45  |
| Óxido de Calcio (CaO)                                 | 10,61 |
| Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> )                | 2,57  |
| Óxido de Magnesio (MgO)                               | 1,35  |
| Óxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)                    | 1,10  |
| Óxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)                   | 0,92  |
| Óxido de Azufre VI (SO <sub>3</sub> )                 | 15,68 |
| Óxido de Fósforo V (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )   | 1,03  |
| Óxido de Zinc   | 34,50 |

## V.6 OTRAS TÉCNICAS

### V.6.1 AISLAMIENTO TÉRMICO

El aislamiento térmico es necesario para garantizar la seguridad, reducir las pérdidas de energéticas (calor-frio) y para aumentar la sostenibilidad de los procesos.

Para reducir la pérdida o ganancia de calor y por lo tanto reducir la cantidad de energía necesaria para mantener el equilibrio del proceso y por lo tanto ahorrar de costes.

Optimizando el aislamiento se reducen los costes de instalación proporcionando el máximo ahorro de energía durante la vida útil de la instalación.

Se reducen los impactos en el medioambiente optimizando la eficiencia de aislamiento para maximizar el potencial de ahorro de CO<sub>2</sub> (reducción de costos de emisión de CO<sub>2</sub>), así como proporcionar una protección contra futuros costes de la energía.

El uso de materiales y sistemas innovadores de aislamiento, tales como los sistemas de baja emisividad, ayudan a proporcionar el máximo ahorro de energía potencial a la vez que mejoran la protección del medio ambiente en el equipo industrial.

### V.6.2 PLACAS SOLARES

Los paneles solares o también llamados placas solares tienen la función de convertir la energía que nos proporciona el Sol en electricidad.

Los paneles solares están formados por numerosas celdas solares. Las celdas solares son pequeñas células hechas de silicio cristalino o arseniuro de galio, es decir, las celdas son cristales de silicio o cristales de arseniuro de galio que son materiales semiconductores (es decir, materiales que pueden comportarse como conductores de electricidad o como aislantes, depende del estado en que se encuentren. Estos materiales se mezclan con otros como por ejemplo el fósforo o el boro para darles al silicio o al arseniuro de galio una carga positiva o negativa. Solamente si estas celdas tienen carga positiva y negativa pueden generar electricidad, de lo contrario no generarían electricidad.

Cuando esas celdas cristalinas cargadas positiva y negativamente se exponen a la luz del Sol directamente producen corriente. La energía del sol mueve los electrones de la parte de la celda que le sobran hacia la parte de la celda que le faltan (donde hay huecos). Este movimiento de electrones es la corriente eléctrica, por lo tanto ya hemos conseguido generar corriente eléctrica de un punto a otro. Todas juntas hacen que se produzca un campo eléctrico en el panel solar.

Una vez colocado el panel, éste ya podrá recibir la luz directa del Sol. El Sol es la fuente más poderosa de energía para la Tierra. Sabemos que el Sol emite muchas partículas diferentes hacia la Tierra y los paneles solares están diseñados de tal manera que sólo absorban los fotones que emite el Sol, que son las partículas que reaccionarán con el silicio y el arseniuro generando electricidad en el panel.

Existen tres tipos de paneles solares:

- Paneles Solares Fotovoltaicos: Pueden generar suficiente energía para abastecer las necesidades de los hogares.
- Paneles Solares Térmicos: Estos paneles se recomienda usarlos en viviendas que tengan recepción directa del Sol con altas temperaturas y que tengan un espacio suficiente para colocarlos ya que son mayores que los anteriores porque si no serían eficientes. Actúan de la misma forma que los fotovoltaicos pero aparte contienen un

líquido que absorbe el calor. Estos paneles convierten la energía del Sol en energía térmica.

- **Paneles Solares Termodinámicos:** Éstos últimos son los que se están utilizando cada vez más en los hogares debido a que son más eficientes, más baratos y se pueden utilizar aparte para muchas más cosas. Su principal ventaja es que pueden absorber energía a pesar de que llueva o esté nublado o sea de noche, etc. Estos paneles se basan en los principios fundamentales de la termodinámica, es decir, que pueden absorber cualquier tipo de energía de cualquier ambiente siempre y cuando la temperatura exterior no baje de los 0 grados. Están fabricados de aluminio y contienen unos canales por donde circula un líquido refrigerante, es decir, un líquido de bajo punto de ebullición que es capaz de absorber grandes cantidades de calor al producirse en él un cambio de estado (gas, líquido o sólido).

La principal utilidad de los paneles solares más conocida para los hogares que suelen colocarse en los techos de las casas es suministrar energía a los electrodomésticos, para proporcionar luz, calentar agua, etc.

La principal ventaja de utilizar paneles solares es que producen energía limpia y renovable, sin tener que recurrir a los recursos fósiles y energía nuclear. La energía solar no produce apenas contaminación y, sin embargo, el uso de recursos fósiles libera grandes cantidades de gases tóxicos hacia la atmósfera. Los paneles solares también ayudan a ahorrar energía e instalar un sistema renovable en casa es bastante rápido, aparte que el mantenimiento de estos paneles solares es mínimo y su vida es bastante larga. Aunque al principio puede resultar algo caro, en cuestión de años se habrá recuperado la inversión inicial.

Por otro lado, las desventajas principales son las siguientes:

- Al principio son caros aunque luego se recupere el dinero a lo largo de su utilización.
- Otra desventaja de los paneles solares, sobre todo los Fotovoltaicos es que dependen del clima.
- El espacio es otra de las desventajas, ya que para que los paneles solares funcionen con eficiencia necesitan cubrir bastante espacio. Por ejemplo, para una casa pequeña, el espacio que necesitan los paneles solares sería desproporcionado en comparación con la propia casa y sus elementos.

### Características Físicas

| Modelo | Dimensiones (mm) | Kg.  |
|--------|------------------|------|
| A-240P | 1645 x 990 x 40  | 21,5 |
| A-245P | 1645 x 990 x 40  | 21,5 |
| A-250P | 1645 x 990 x 40  | 21,5 |
| A-255M | 1645 x 990 x 40  | 21,5 |
| A-260M | 1645 x 990 x 40  | 21,5 |
| A-265M | 1645 x 990 x 40  | 21,5 |
| A-290P | 1965 x 990 x 40  | 24   |
| A-295P | 1965 x 990 x 40  | 24   |
| A-300P | 1965 x 990 x 40  | 24   |
| A-305M | 1965 x 990 x 40  | 24   |
| A-310M | 1965 x 990 x 40  | 24   |
| A-315M | 1965 x 990 x 40  | 24   |

### Características Físicas

Especificaciones eléctricas medidas en (STC: 1 kW/m<sup>2</sup>, 25 °C±2 °C y AM 1,5)\*

|        | Nº de células | Potencia nominal (0/+5W) | Corriente en Punto de Máxima Potencia (Imp) | Tensión en Punto de Máxima Potencia (VmP) | Corriente de Cortocircuito (Isc) | Tensión de Circuito Abierto (Voc) | Máxima tensión del sistema |
|--------|---------------|--------------------------|---|---|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| A-240P | 60            | 240 W                    | 8,21 A                                      | 29,21 V                                   | 8,73 A                           | 37,16 V                           | 1000 V                     |
| A-245P | 60            | 245 W                    | 8,33 A                                      | 29,37 V                                   | 8,82 A                           | 37,38 V                           | 1000 V                     |
| A-250P | 60            | 250 W                    | 8,45 A                                      | 29,53 V                                   | 8,91 A                           | 37,60 V                           | 1000 V                     |
| A-255M | 60            | 255 W                    | 8,34 A                                      | 30,57 V                                   | 8,89 A                           | 37,76 V                           | 1000 V                     |
| A-260M | 60            | 260 W                    | 8,44 A                                      | 30,79 V                                   | 8,99 A                           | 37,90 V                           | 1000 V                     |
| A-265M | 60            | 265 W                    | 8,54 A                                      | 31,03 V                                   | 9,04 A                           | 38,40 V                           | 1000 V                     |
| A-290P | 72            | 290 W                    | 8,07 A                                      | 35,93 V                                   | 8,67 A                           | 44,67 V                           | 1000 V                     |
| A-295P | 72            | 295 W                    | 8,14 A                                      | 36,23 V                                   | 8,78 A                           | 44,82 V                           | 1000 V                     |
| A-300P | 72            | 300 W                    | 8,21 A                                      | 36,52 V                                   | 8,89 A                           | 44,97 V                           | 1000 V                     |
| A-305M | 72            | 305 W                    | 8,31 A                                      | 36,71 V                                   | 8,84 A                           | 44,89 V                           | 1000 V                     |
| A-310M | 72            | 310 W                    | 8,40 A                                      | 36,91 V                                   | 8,92 A                           | 45,15 V                           | 1000 V                     |
| A-315M | 72            | 315 W                    | 8,49 A                                      | 37,10 V                                   | 9,00 A                           | 45,41 V                           | 1000 V                     |

Los datos eléctricos y mecánicos están sujetos a variaciones sin previo aviso.

\*Especificaciones eléctricas medidas en STC. NOCT: 47±2 °C.

Tolerancias medida STC: ±3 % (VmP); ±10 % (Isc, Voc, Imp, Vmp).

Figura V-18. Características físicas de paneles fotovoltaicos. Catálogo ATERSA

### V.6.3 TECNOLOGÍAS DE REGENERACIÓN

Esta técnica se basa en la desvulcanización, una ruptura selectiva de los enlaces químicos entrecruzados del azufre en el caucho vulcanizado, se produce la despolimerización de la cadena principal, la ruptura de los enlaces químicos entrecruzados de carbono, por lo tanto, las prestaciones mecánicas del caucho disminuyen comparando con las prestaciones iniciales.

Las principales técnicas de desvulcanización son las siguientes:

1. Desvulcanización química
2. Desvulcanización mediante microondas
3. Desvulcanización por ultrasonidos
4. Desvulcanización microbiológica
5. Desvulcanización mecanoquímica

6. Desvulcanización termomecánica
7. Desvulcanización mediante el proceso De-Link R
8. Desvulcanización mediante uso de productos vegetales renovables

Ventajas:

- Consigue una descomposición de los componentes del neumático
- Permite reutilizar los componentes de caucho de los NFU para la fabricación de distintos elementos.

Desventajas:

- Caucho obtenido con propiedades físicas inferiores al original
- Es importante tener en cuenta una óptima elección de la materia prima y condiciones de proceso.