



Departament de Projectes
d'Enginyeria

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Laboratorio de Modelización Ambiental

Estimación del consumo energético y de la emisión de CO₂ asociados a la producción, uso y disposición final de tuberías de PVC, PEHD, PP, fundición y hormigón

*Dr. José María Baldasano Recio
Dr. Pedro Jiménez Guerrero
María Gonçalves Ageitos
Dr. René Parra Narváez*

Report: PVC-Tub-200512-2

Barcelona, diciembre de 2005

Índice

1. Resumen.....	1
2. Antecedentes.....	5
2.1. <i>Objetivo y bases de cálculo.....</i>	<i>6</i>
2.2. <i>Contenido del documento.....</i>	<i>6</i>
3. El ciclo de vida de una tubería.....	8
4. Estimación del consumo de energía y de la emisión CO₂ atribuible a un tramo de tubería de 3 m de longitud.....	11
4.1. <i>Bases de cálculo.....</i>	<i>11</i>
4.1.1. <i>Dimensiones.....</i>	<i>11</i>
4.1.2. <i>Materiales.....</i>	<i>11</i>
4.2. <i>Escenarios analizados.....</i>	<i>13</i>
4.3. <i>La extracción y producción de materiales.....</i>	<i>15</i>
4.4. <i>El conformado de la tubería.....</i>	<i>16</i>
4.5. <i>Instalación y utilización de la tubería.....</i>	<i>17</i>
4.6. <i>El transporte.....</i>	<i>19</i>
4.7. <i>Factores de emisión.....</i>	<i>19</i>
5. Resultados y análisis comparativo.....	20
5.1. <i>Estimación de consumos energéticos y emisiones de CO₂ para tuberías 20</i>	
5.2. <i>Tuberías de conducción de agua potable.....</i>	<i>20</i>
5.3. <i>Tuberías de saneamiento.....</i>	<i>21</i>
6. Conclusiones.....	36
7. Referencias.....	39
8. Anexo 1. Consumo energético y emisiones de CO₂ asociadas en caso de considerar procesos de reciclado y disposición final de tuberías.....	41
8.1. <i>La desconstrucción.....</i>	<i>41</i>
8.2. <i>El reciclaje.....</i>	<i>41</i>
8.3. <i>La disposición final.....</i>	<i>41</i>
8.4. <i>Resultados y discusión.....</i>	<i>41</i>
8.5. <i>Conclusiones.....</i>	<i>61</i>

Lista de tablas

Tabla 4.1. Características de las tuberías tipo escogidas.	14
Tabla 4.2. Composición típica de hormigón para tuberías.	15
Tabla 4.3. Consumos energéticos de la extracción de recursos naturales y de la producción de materiales.	16
Tabla 4.4. Coeficientes de Hazen Williams empleados para el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías de abastecimiento (Hernández, 2000).	18
Tabla 4.5. Pérdidas de carga en una tubería de PVC biorientado DN110, correlación Prandlt-Colebrook-White para transportar un caudal de 0,012 m ³ s ⁻¹ . (Pipelife,2005)	18
Tabla 5.1. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de PVC para conducción de agua potable de 110 mm de diámetro nominal (sin uso de PVC reciclado).	22
Tabla 5.2. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de PVC biorientado para conducción de agua potable de 110 mm de diámetro nominal (sin uso de PVC reciclado).	22
Tabla 5.3. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de fundición dúctil para conducción de agua potable de 125 mm de diámetro nominal (sin uso de material reciclado).....	22
Tabla 5.4. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de fundición dúctil para conducción de agua potable de 125 mm de diámetro nominal (utilizando un 80% de material reciclado).....	23
Tabla 5.5. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de PEHD para conducción de agua potable de 125 mm de diámetro nominal (sin utilizar material reciclado).	23
Tabla 5.6. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de PVC para	

saneamiento de 315 mm de diámetro nominal (sin uso de material reciclado).....	23
Tabla 5.7. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de PVC para saneamiento de 315 mm de diámetro nominal (80% de PVC reciclado)...24	
Tabla 5.8 Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de PVC biorientado para saneamiento de 315 mm de diámetro nominal (sin PVC reciclado)..24	
Tabla 5.9. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de PE corrugado para saneamiento de 400 mm de diámetro nominal (sin material reciclado).....24	
Tabla 5.10. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de PE corrugado para saneamiento de 400 mm de diámetro nominal. (Con un 80% de material reciclado)25	
Tabla 5.11. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de PP corrugado para saneamiento de 400 mm de diámetro nominal (sin material reciclado).....25	
Tabla 5.12. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de PP corrugado para saneamiento de 400 mm de diámetro nominal. (Con un 80% de material reciclado).....25	
Tabla 5.13. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de hormigón en masa para saneamiento de 400 mm de diámetro nominal.....26	
Tabla 5.14. Consumo de energía estimado para cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de diferentes materiales.....33	
Tabla 5.15. Emisiones de CO ₂ estimadas para cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de diferentes materiales.....34	
Tabla 5.16. Consumo de energía y emisiones de CO ₂ atribuible a la producción y uso (50 años) de tuberías fabricadas con diferentes materiales. Resumen.35	

Tabla 8.1. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PVC para abastecimiento de 110 mm de diámetro nominal (sin uso de material reciclado).	42
Tabla 8.2 Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PVC biorientado para abastecimiento de 110 mm de diámetro nominal (sin uso de material reciclado).	42
Tabla 8.3. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de fundición dúctil para abastecimiento de 125 mm de diámetro nominal (sin utilización de material reciclado).	43
Tabla 8.4. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de fundición dúctil para abastecimiento de 125 mm de diámetro nominal (utilizando un 80% de material reciclado).	43
Tabla 8.5. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PEHD para abastecimiento de 125 mm de diámetro nominal (sin uso de material reciclado).	44
Tabla 8.6. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PVC para saneamiento de 315 mm de diámetro nominal (sin uso de material reciclado).	44
Tabla 8.7. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PVC para saneamiento de 315 mm de diámetro nominal (con un 80% de material reciclado).	45
Tabla 8.8. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PVC biorientado para saneamiento de 315 mm de diámetro nominal (sin material reciclado).	45
Tabla 8.9. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería	

de PE corrugado para saneamiento de 400 mm de diámetro nominal (sin utilización de material reciclado).	46
Tabla 8.10. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PE corrugado para saneamiento de 400 mm de diámetro nominal (con un 80% de material reciclado).	46
Tabla 8.11. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PP corrugado para saneamiento de 400 mm de diámetro nominal (sin uso de material reciclado).	47
Tabla 8.12. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PP corrugado para saneamiento de 400 mm de diámetro nominal (con un 80% de material reciclado).	47
Tabla 8.13. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de hormigón para saneamiento de 400 mm de diámetro nominal.	48
Tabla 8.14. Consumo de energía y emisiones de CO ₂ atribuible a la producción y uso (50 años) de tuberías fabricadas con diferentes materiales considerando procesos de desconstrucción, reciclado y disposición final de materiales. Resumen.	56
Tabla 8.15. Consumo de energía estimado para cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de abastecimiento de diferentes materiales. Referidos a tramos de 3 m de tubería.....	57
Tabla 8.16. Consumo de energía estimado para cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de saneamiento de diferentes materiales. Referidos a tramos de 3 m de tubería.....	58
Tabla 8.17. Emisiones de CO ₂ estimadas para cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de abastecimiento de diferentes materiales. Referidas a tramos de 3 m de tubería.	59
Tabla 8.18. Emisiones de CO ₂ estimadas para cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de saneamiento de diferentes materiales. Referidas a tramos de 3 m de tubería.	60

Lista de figuras

Figura 3.1. Esquema del ciclo de vida teórico de una tubería.....	8
Figura 3.2. Esquema del ciclo de vida de una tubería enterrada.	8
Figura 3.3. Esquema del ciclo de vida teórico de una tubería de PVC.....	10
Figura 4.1. Tuberías de diferentes materiales.....	12
Figura 5.1. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción y uso de 3 m de tubería de PVC DN110 para abastecimiento.	26
Figura 5.2. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción y uso de 3 m de tubería de PVC biorientado DN110 para abastecimiento.	27
Figura 5.3. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción y uso de 3 m de tubería de fundición dúctil DN125 para abastecimiento (sin uso de material reciclado).....	27
Figura 5.4. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción y uso de 3 m de tubería de fundición dúctil DN125 para abastecimiento (con un 80% de material reciclado).....	28
Figura 5.5. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción y uso de 3 m de tubería de PEHD DN125 para abastecimiento.	28
Figura 5.6. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción y uso de 3 m de tubería de PVC DN315 para saneamiento (sin uso de material reciclado).....	29
Figura 5.7. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción y uso de 3 m de tubería de PVC DN315 para saneamiento (con un 80% de material reciclado).	29
Figura 5.8. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción y uso de 3 m de tubería de PVC biorientado DN315 para saneamiento (sin material reciclado).....	30
Figura 5.9. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción y uso de 3 m de tubería de PE corrugado DN400 para saneamiento (sin uso de material reciclado).....	30

Figura 5.10. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PE corrugado DN400** para saneamiento (con un **80% de material reciclado**).....31

Figura 5.11. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PP corrugado DN400** para saneamiento (**sin uso de material reciclado**).....31

Figura 5.12. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PP corrugado DN400** para saneamiento (con un **80% de material reciclado**).....32

Figura 5.13. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de hormigón DN400** para saneamiento.....32

Figura 8.1. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PVC DN110** para abastecimiento (**sin utilizar PVC reciclado**).....48

Figura 8.2. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PVC biorientado DN110** para abastecimiento (**sin utilizar PVC reciclado**).....49

Figura 8.3. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de fundición dúctil DN125** para abastecimiento (**sin utilizar fundición reciclada**).....49

Figura 8.4. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de fundición dúctil DN125** para abastecimiento (con un **80% de fundición reciclada**).....50

Figura 8.5. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PEHD DN125** para abastecimiento (**sin uso de PEHD reciclado**).....51

Figura 8.6. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PVC DN315** para saneamiento (**sin uso de PVC reciclado**).....51

Figura 8.7. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PVC DN315 para saneamiento (con un 80% de PVC reciclado).....	52
Figura 8.8. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PVC biorientado DN315 para saneamiento (sin uso de PVC reciclado).	52
Figura 8.9. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PE corrugado DN400 para saneamiento (sin utilización de material reciclado).....	53
Figura 8.10. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PE corrugado DN400 para saneamiento (con un 80% de material reciclado .)	54
Figura 8.11. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PP corrugado DN400 para saneamiento (sin utilización de material reciclado).....	54
Figura 8.12. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de PP corrugado DN400 para saneamiento (con un 80% de material reciclado).....	55
Figura 8.13. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso y disposición final de residuos de 3 m de tubería de hormigón DN400 para saneamiento	55

1. Resumen

Las tuberías son un elemento fundamental en ingeniería y construcción. Se utilizan para la conducción de todo tipo de fluidos y el material constitutivo de las mismas depende del fin al que estén destinadas. Debido a esta gran variedad se ha querido acotar el marco de este estudio a los dos tipos de tuberías más comunes: las tuberías de conducción de agua potable y las tuberías de evacuación y saneamiento.

Se determinó el impacto ambiental de la elección del material constructivo de estos dos tipos de tuberías, para lo cual se realizó un análisis de ciclo de vida considerando las etapas de extracción y suministro de materiales, producción de la tubería, instalación y utilización, su reciclaje en los casos en los que sea posible y la disposición final de residuos.

Se han tomado como materiales referencia para realizar el estudio comparativo el policloruro de vinilo (PVC), el polietileno de alta densidad (PEHD), el polipropileno (PP), el hormigón y la fundición dúctil, por ser estos últimos los materiales históricamente más utilizados para los dos tipos de tuberías analizados. En el caso del PVC se han tenido en cuenta tuberías fabricadas con PVC convencional y con PVC biorientado (producto en el cual las cadenas de polímero son estiradas en dos direcciones del espacio proporcionando un material con mejores prestaciones)

Se ha considerado en todos los casos que se trata de tuberías enterradas con un periodo de vida útil promedio de 50 años con un protocolo de mantenimiento que supondría dos revisiones anuales. En el Anexo 1 se ha tenido en cuenta una etapa de recuperación o reciclado del material de la tubería, excepto en el caso del hormigón en el que se ha considerado que la totalidad de la tubería se lleva a disposición final.

La evaluación del impacto se ha realizado teniendo en cuenta dos indicadores fundamentales: (1) estimación del consumo energético; y (2) emisión de dióxido de carbono (CO₂) atribuibles a la fabricación, uso, reciclaje y disposición final de residuos, de las tuberías distribuidas en los dos grupos anteriormente citados: de conducción de agua potable y saneamiento.

Como base de cálculo se han tomado tramos de tubería de 3 m de longitud libres de accesorios para todos los casos.

La metodología empleada se basa en un procedimiento de contabilidad ambiental de consumos energéticos y emisiones de CO₂ en el que se han estimado dichos indicadores en cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de agua potable y de tuberías de saneamiento (extracción y suministro de materiales, producción de la tubería, transporte para su instalación y uso). Los resultados finales suponen la suma de los consumos de energía y de las emisiones de CO₂ equivalente para cada una de estas etapas.

Se han escogido tuberías de conducción de agua potable PN10 de 110 mm de diámetro nominal (DN) para PVC y PVC biorientado y los diámetros correspondientes en tuberías de fundición dúctil y PEHD que supongan un diámetro interno mayor o igual al de ésta, de forma que aseguren el transporte de un mismo caudal a igual o menor velocidad. Los diámetros nominales comerciales resultantes son de 125 mm tanto para tuberías de PEHD como para tuberías de fundición dúctil.

Se ha de tener en cuenta que la tubería de PVC biorientado DN110, presenta una capacidad hidráulica mayor que la de PVC convencional tomada como referencia, ya que el espesor del material es menor.

En el caso de tuberías de saneamiento, en las que la circulación del fluido tiene lugar a presión atmosférica y sin impulsión, se ha tomado como referencia una tubería de PVC DN315, con lo que resultan como elementos comparativos: tuberías de PVC biorientado de 315 mm de diámetro nominal, tuberías de PP corrugado y de PEHD corrugado de 400 mm de diámetro nominal y tuberías de hormigón en masa de 400 mm de diámetro nominal, sin tener en cuenta el diferente comportamiento a la deformación de las mismas.

Para las tuberías de PVC, PE corrugado y PP corrugado para saneamiento* y de fundición dúctil en abastecimiento, se ha analizado además la variación de los resultados en caso de la utilización de un 80% en peso de materiales reciclados para la fabricación de las tuberías.

Si se consideran tuberías de conducción de agua potable, la etapa más importante en cuanto a consumos energéticos y emisiones de CO₂ para todas ellas, excepto la de fundición dúctil con un 80% de material reciclado, es la de utilización de tubería, en la que se han tenido en cuenta los consumos y emisiones por bombeo de un caudal de 0,012 m³ s⁻¹, obtenido como el caudal circulante por una tubería de PVC DN110 para una velocidad típica de 1,5 m s⁻¹ de desplazamiento del fluido.

En el caso de las tuberías de saneamiento, el fluido no suele ser impulsado mediante bombeo, con lo cual el consumo energético de la etapa de utilización queda reducido a las operaciones de mantenimiento, cuya aportación se ha considerado despreciable frente al conjunto.

La etapa determinante del consumo energético y las emisiones de CO₂ a la atmósfera en este caso es la de extracción y suministro de materiales (supone en torno al 80% del total), excepto en el caso del hormigón. Incluso en los casos en los que se utiliza un 80% de material reciclado, esta etapa supone entre el 50 y el 70% del total. En el caso del hormigón la etapa de consumo energético más importante es la de producción de la tubería, constituyendo un 53% del total. Adquieren gran importancia en este caso las etapas intermedias de transporte debido al elevado peso específico del material.

* Según el Pliego de Prescripciones Técnicas para Tuberías de Abastecimiento no se puede utilizar PEHD ni PVC reciclados para tuberías destinadas a conducción de agua potable (MOPU, 1974)

En el caso de las **tuberías de conducción de agua potable**, la tubería de PVC biorientado es la que supone un menor consumo energético, 828 kWh, y unas emisiones de CO₂ menores, 363 kg de CO₂ para cada tramo de tubería de 3 m de longitud sin accesorios. La tubería de PVC convencional supone un consumo energético de 1 041 kWh, y la emisión de 452 kg de CO₂ por cada tramo de 3 m de tubería.

A continuación, la que presenta resultados más favorables es aquella construida con PEHD, que supone un consumo energético de 1 055 kWh y unas emisiones de CO₂ de 454 kg de CO₂, es decir, un 1,3% y un 0,4% más que la de PVC.

La tubería de fundición dúctil sin reciclado presenta los peores resultados desde la perspectiva del consumo energético y las emisiones de CO₂, siendo necesarios 1 620 kWh por cada 3 m de tubería y generándose unas emisiones de 681 kg de CO₂ a la atmósfera.

En lo que se refiere a **tuberías de saneamiento**, los mejores resultados de consumo energético corresponden a la tubería de PP corrugado DN400 que emplea un 80% de material reciclado para su fabricación, con un consumo energético por cada 3 m de tubería de 60 kWh y unas emisiones de 22 kg de CO₂ (un 77% y un 72% menores que el escenario base escogido: la tubería de PVC DN315 sin material reciclado).

Las tuberías de PE corrugado DN400 con un 80% de material reciclado suponen consumos de 64 kWh y una producción de 21 kg de CO₂ valores un 75% y un 73% menores que los correspondientes a las de PVC sin material reciclado, respectivamente.

A continuación se situarían las tuberías de PVC DN315 con un 80% de material reciclado, que implican un consumo energético de 69 kWh, y la emisión de 22 kg de CO₂ (un 74% y un 71% menores que si no se utilizase PVC reciclado para la elaboración de la tubería).

Tal y como se deriva de los resultados expuestos, el comportamiento de los tres materiales plásticos es muy similar respecto al escenario base, no apreciándose diferencias significativas ante la elección de uno u otro material.

En el caso de no considerar la utilización de material reciclado, y considerando los consumos energéticos en orden ascendente, se encontrarían las tuberías de PP corrugado que no incluyen material reciclado, las tuberías de PE corrugado sin material reciclado, las tuberías de PVC biorientado, las tuberías de PVC sin material reciclado y las tuberías de hormigón DN400. En cuanto a las emisiones de CO₂ asociadas en orden ascendente se encuentran las tuberías de PE corrugado, las tuberías de PP corrugado, las tuberías de PVC biorientado, las de PVC convencional y por último las de hormigón, que llevan asociadas un consumo energético de 345 kWh y 129 kg de CO₂.

Se ha de tener en cuenta que aunque actualmente el uso de PVC reciclado en la fabricación de tuberías de PVC biorientado no es habitual, sí se trata de un material 100% reciclable cuya reutilización se presenta como probable en un futuro.

La introducción de material reciclado en la fabricación de este tipo de tuberías produciría una reducción del consumo energético en lo que respecta a la extracción y suministro de materiales. En el caso de tuberías para saneamiento se ha visto que esta etapa es determinante en lo que respecta al consumo energético y las emisiones de CO₂, con lo que la introducción de material reciclado en su fabricación, unido al bajo peso específico del material, podría dar lugar a cambios significativos en los resultados.

2. Antecedentes

Las tuberías constituyen un elemento básico en obras de ingeniería: industrias, viviendas, redes de abastecimiento, etc. Proporcionan una serie de servicios entre los que se podrían destacar:

- Distribución de todo tipo de fluidos
 - agua potable
 - gas natural y otros fluidos calefactores
 - aguas de saneamiento y residuales
 - fluidos industriales
- Sistemas de calefacción
- Sistemas de riego

Las características de la tubería dependerán de su utilización, de las propiedades del fluido que deba transportar y su destino final. En este estudio se considerarán fundamentalmente las tuberías para transporte de agua potable, a presión, y las tuberías para transporte de aguas de saneamiento y residuales, a superficie libre.

Para la selección de un tipo determinado de tubería se tienen en cuenta los materiales más utilizados y conocidos, el uso de materiales y los costes de construcción y mantenimiento.

Los parámetros que definen la tubería son el material constructivo, el diámetro nominal y el espesor de la misma, así como determinados parámetros asociados con estos como pueden ser la rugosidad de las paredes de la misma, la capacidad hidráulica o la presión nominal que puede soportar.

En los últimos años, con la implementación paulatina de legislación ambiental más restrictiva en materia de emisiones a la atmósfera (contaminantes primarios y gases de efecto invernadero), la promoción de la eficiencia energética, la producción más limpia y el uso de las mejores técnicas disponibles, existe interés por analizar de manera objetiva el impacto ambiental desde la perspectiva de un análisis de ciclo de vida debido a la extracción de materias primas, fabricación, uso y disposición final de residuos, de tuberías fabricadas con diferentes materiales.

En la distribución de agua potable los materiales tradicionalmente más utilizados son la fundición dúctil o el cobre. En la actualidad existen otro tipo de materiales acondicionados para este tipo de fin, como son el polietileno de alta densidad (PEHD) o el PVC (Krähling y Spindler, 2005).

En el caso de las tuberías de saneamiento se distinguen aquellas conformadas in situ y las prefabricadas. En este último caso los materiales habitualmente más utilizados son el hormigón, el PVC y el PE y PP corrugados.

Tanto en un caso como el otro se está introduciendo actualmente el PVC biorientado, un material cuya disposición estructural a nivel molecular en dos

direcciones del espacio le proporciona características mejoradas respecto del PVC convencional.

2.1. Objetivo y bases de cálculo

En este documento se presenta una estimación del consumo energético y de la emisión de dióxido de carbono (CO₂) atribuibles a la fabricación, uso, reciclaje y disposición final de residuos, de tuberías fabricadas con PVC, PVC biorientado, PEHD, PE corrugado, PP corrugado, hormigón y fundición dúctil

Este enfoque se basa en la consideración de todas las etapas de un estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), aunque el alcance se focaliza en los dos aspectos antes indicados.

Con el fin de hacer posible un análisis que permita obtener resultados comparativos, se escoge una unidad de análisis (la unidad funcional en un estudio de ACV) de cada uno de los tipos básicos: tuberías de saneamiento y tuberías de conducción de agua potable.

Como base de cálculo se escogieron tramos de tubería estándar de 3 m de los diferentes materiales.

Para conducción de agua potable se estudiaron tuberías de PVC y PVC biorientado de DN 110 mm, de PEHD de 125 mm y de fundición dúctil de 125 mm.

Para saneamiento se tomaron tuberías de PVC y PVC biorientado de DN 315 mm, de PE corrugado de DN 400 mm, de PP corrugado de DN 400 mm y de hormigón en masa de DN 400 mm.

El criterio seguido a la hora de escoger los anteriores diámetros fue la conservación de una capacidad hidráulica mínima para todas las tuberías. Se tomaron como referencia las tuberías de PVC escogidas tanto para conducción de agua potable como para saneamiento, se supuso una velocidad de circulación del fluido típica ($1,5 \text{ m s}^{-1}$ en abastecimiento, 5 m s^{-1} para tuberías plásticas y 3 m s^{-1} para tuberías de hormigón en saneamiento) y a partir del caudal obtenido para las tuberías de PVC se determinaron los diámetros comerciales para tuberías del resto de materiales que permitiesen transportar este caudal. Se consideraron tuberías de los diferentes materiales con un diámetro interno mayor o igual que la tubería de PVC base, de forma que la velocidad de circulación del fluido para un mismo caudal fuese igual o menor que la velocidad en la tubería de PVC.

2.2. Contenido del documento

Se describen las etapas que conforman el ciclo de vida de la tubería, así como las hipótesis de cálculo y escenarios para el análisis comparativo. Se indican las magnitudes de los consumos energéticos más significativos, así

como la conformación de las fuentes de energía que definen los factores de emisión de CO₂.

Se incluyen los resultados obtenidos en detalle y de manera resumida. Se analizan las estimaciones obtenidas identificando en orden ascendente, las alternativas con menores consumos energéticos y emisiones de CO₂.

3. El ciclo de vida de una tubería

La Figura 3.1 presenta el ciclo de vida típico de una tubería, enfocada al uso de energía y las correspondientes emisiones atmosféricas de CO₂. Se ha de tener en cuenta, que en el caso de tuberías enterradas las etapas de reciclaje y disposición final no suelen tener lugar, normalmente se procede al abandono de la tubería (Figura 3.2).

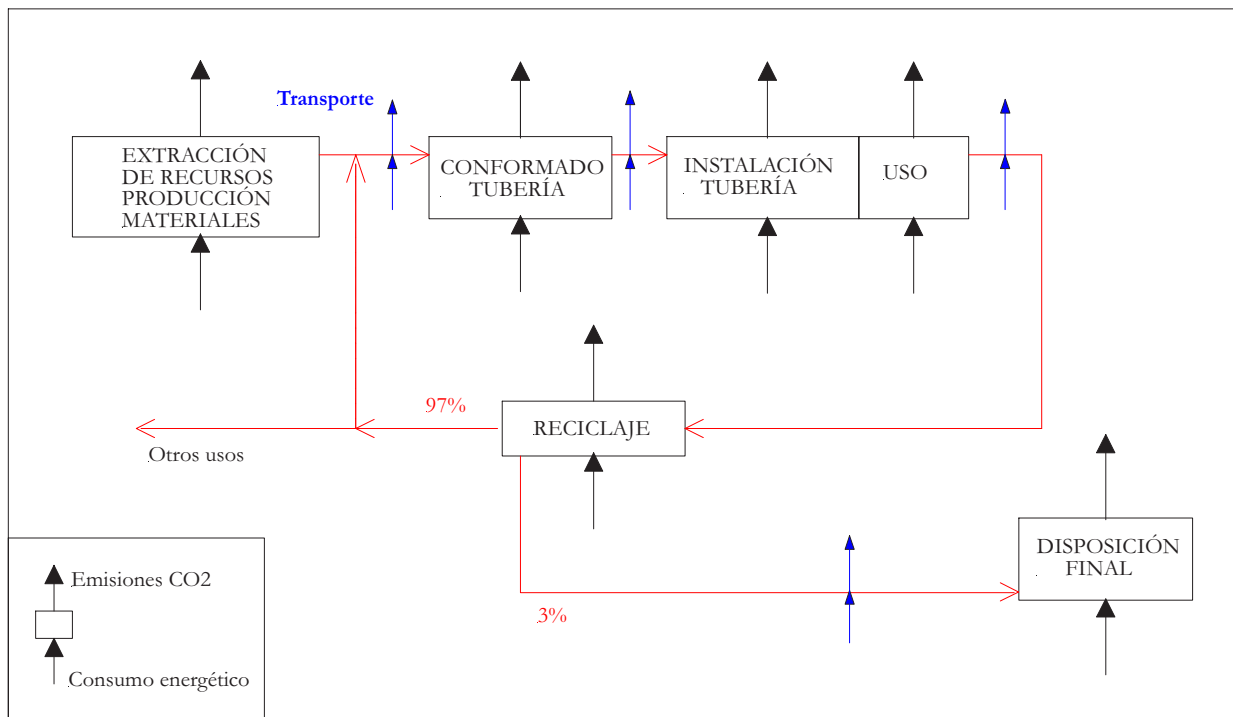


Figura 3.1. Esquema del ciclo de vida teórico de una tubería

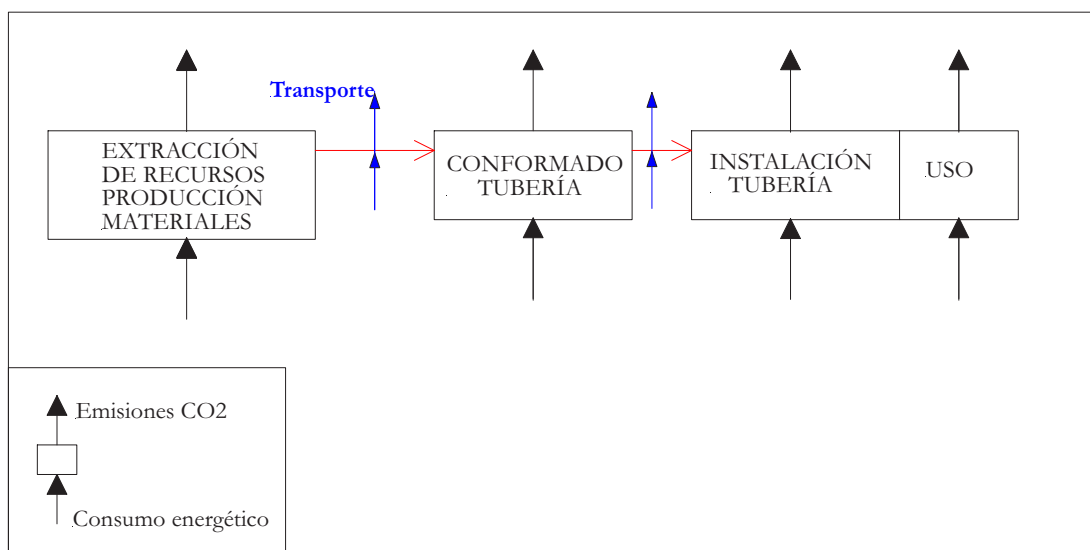


Figura 3.2. Esquema del ciclo de vida de una tubería enterrada.

La metodología empleada se basa en un procedimiento de contabilidad ambiental de consumos energéticos y emisiones de CO₂ en el que se han estimado dichos indicadores en cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de agua potable y de tuberías de saneamiento (extracción y suministro de materiales, producción de la tubería, transporte para su instalación, uso, disposición en vertedero; y también transporte a reciclaje y reciclaje cuando sea el caso). Los resultados finales suponen la suma de los consumos de energía y de las emisiones de CO₂ equivalente para cada una de estas etapas.

La primera etapa comprende la fase de extracción de materias primas y el conformado de la tubería.

La segunda etapa consiste en el proceso de instalación de la tubería. Se considera un tramo de tubería enterrada, es decir, hay que considerar la excavación de la zanja, la colocación de la tubería y el relleno con lecho de arena.

La etapa de uso de la tubería depende del material utilizado, pero en general supone un largo periodo de tiempo. Como vida media se ha considerado un periodo de 50 años para todas las tuberías.

En general, durante este tiempo de vida es necesario realizar inspecciones periódicas y actividades de mantenimiento. Se considera que las revisiones y operaciones de mantenimiento necesarias se realizan conforme a un programa establecido, que supone dos revisiones por año.

Por otro lado la diferente rugosidad de los materiales y los diferentes procesos de envejecimiento que sufren (generación de incrustaciones, etc.) suponen que las pérdidas de carga a lo largo de la tubería sean diferentes, lo cual habrá de tenerse en cuenta en el periodo de utilización de la misma.

Desde un punto de vista teórico las últimas etapas del ciclo de vida corresponderían a la etapa de retirada de la tubería y reciclaje del material en los casos que fuese posible y disposición final en vertedero. Esta situación tiene lugar en realidad exclusivamente en tuberías de abastecimiento y evacuación de edificios situadas al aire, escasas en número comparadas con las tuberías de abastecimiento y saneamiento enterradas. En este caso se suelen abandonar las tuberías que quedan obsoletas. En este estudio no se han tenido en cuenta las etapas de reciclaje y disposición final de residuos (como ya se ha comentado anteriormente, a modo ilustrativo se incluyen en el Anexo 1)

La Figura 3.3 presenta en detalle, las etapas de conformado y utilización de las tuberías de PVC. La resina de PVC, se mezcla con determinados aditivos para la obtención de polvo. Esta mezcla que se somete a un proceso de extrusión en caliente por medio del cual se elabora la tubería.

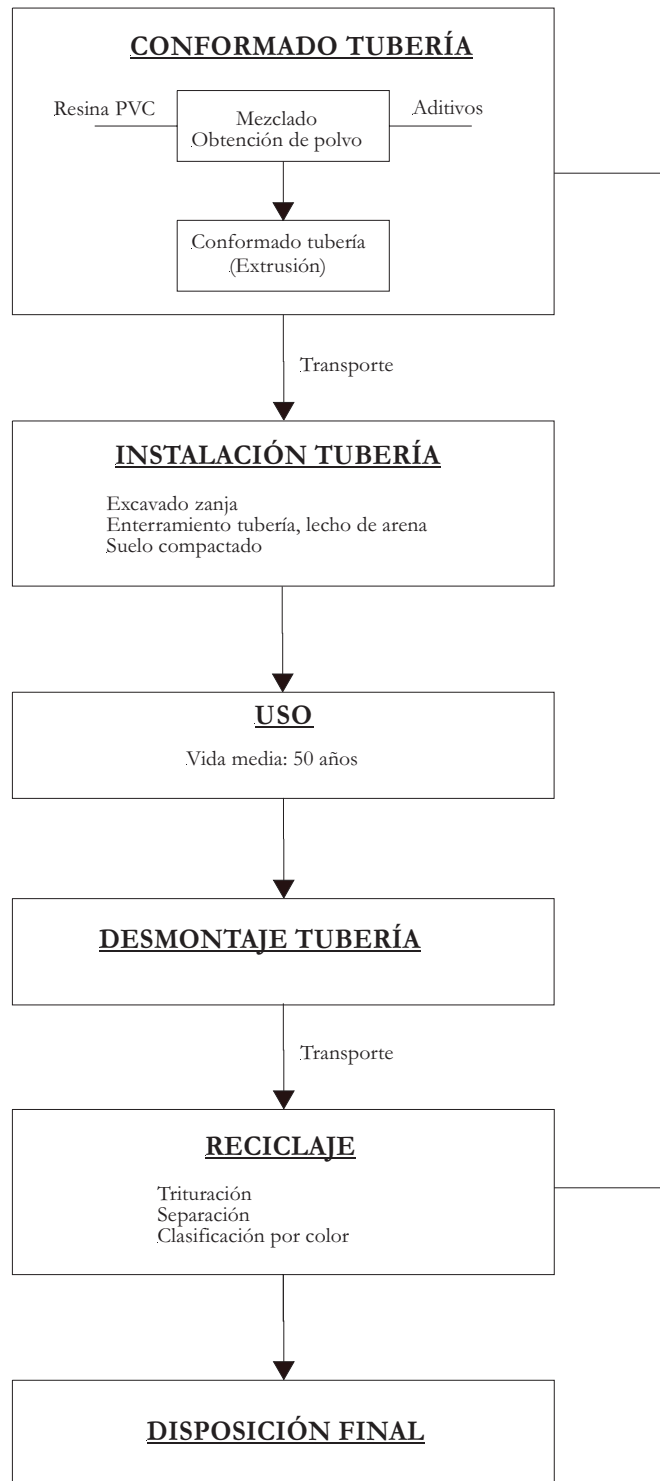


Figura 3.3. Esquema del ciclo de vida teórico de una tubería de PVC

4. Estimación del consumo de energía y de la emisión CO₂ atribuible a un tramo de tubería de 3 m de longitud

4.1. Bases de cálculo

4.1.1. Dimensiones

Se analizan dos tipos fundamentales de tuberías: de transporte de agua potable y de saneamiento, se escogerá como base de cálculo un tramo de tubería estándar de 3 m de longitud sin accesorios.

4.1.2. Materiales

El análisis se centra en la estimación del consumo de energía y las correspondientes emisiones de CO₂ para los dos tipos de tubería considerados. Los materiales de construcción escogidos han sido:

Abastecimiento:

- PVC
- PVC biorientado
- Polietileno de alta densidad (PEHD)
- Hierro fundido

Saneamiento:

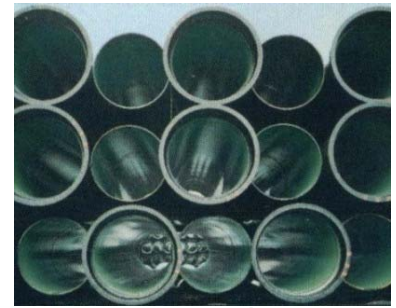
- PVC
- PVC biorientado
- Polietileno (PE) corrugado
- Polipropileno (PP) corrugado
- Hormigón



PVC



PEHD



FUNDICIÓN



PVC biorientado



PVC



PE/PP corrugado



HORMIGÓN

Figura 4.1. Tuberías de diferentes materiales.

4.2. Escenarios analizados

Se analizan los siguientes casos:

a) TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE

- 1) 3 m de tubería de PVC de 110 mm de diámetro que no incluye PVC reciclado.
- 2) 3 m de tubería de PVC biorientado de 110 mm de diámetro nominal que no incluye material reciclado
- 3) 3 m de tubería de PEHD de 125 mm de diámetro nominal que no incluye material reciclado.
- 4) 3 m de tubería de fundición dúctil para conducción de agua potable de 125 mm de diámetro nominal.
- 5) 3 m de tubería de fundición dúctil para conducción de agua potable de 125 mm de diámetro nominal en la que se incluye un 80% de material reciclado.

b) TUBERÍAS DE SANEAMIENTO

- 1) 3 m de tubería de PVC de 315 mm de diámetro nominal que no incluye PVC reciclado.
- 2) 3 m de tubería de PVC de 315 mm de diámetro nominal en la que se incluye un 80% de PVC reciclado.
- 3) 3 m de tubería de PVC biorientado de 315 mm de diámetro nominal que no incluye material reciclado.
- 4) 3 m de tubería de hormigón en masa de 400 mm de diámetro en la que no se incluye ningún componente reciclado.
- 5) 3 m de tubería de PEHD corrugado de 400 mm de diámetro nominal que no incluye PEHD reciclado.
- 6) 3 m de tubería de PEHD corrugado de 400 mm de diámetro nominal en la que se incluye un 80% de PEHD reciclado.
- 7) 3 m de tubería de PP corrugado de 400 mm de diámetro nominal que no incluye PP reciclado.
- 8) 3 m de tubería de PP corrugado de 400 mm de diámetro nominal en la que se incluye un 80% de PP reciclado.

Se ha tenido en cuenta en este caso el Pliego de Prescripciones Técnicas para tuberías de abastecimiento (MOPU, 1974), que indica la prohibición de utilizar PVC y PEHD reciclados para tuberías de conducción de agua potable.

En el caso de las tuberías para transporte de agua potable se ha escogido como caso base una tubería de PVC de 110 mm de diámetro nominal que puede soportar una presión nominal de 10 atm. En el caso de las tuberías de saneamiento (MOPU, 1986), en las que el fluido circula a presión atmosférica, se ha escogido como caso base una tubería de PVC de DN 315 mm (UNE 53 332/81).

Suponiendo una velocidad de circulación media típica, de 1,5 m s⁻¹ para abastecimiento y de 5 m s⁻¹ para saneamiento, se ha estimado el caudal circulante por dicha tubería y se han empleado como elementos comparativos tuberías del resto de materiales que permitan transportar ese caudal a la misma velocidad o a velocidades menores en caso de no existir diámetros comerciales apropiados. En el caso de la tubería de hormigón en saneamiento se ha buscado obtener velocidades en torno a 3 m s⁻¹ por ser la velocidad media típica de estas tuberías. Resultando los casos base descritos anteriormente y especificados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Características de las tuberías tipo escogidas.

Material	DN (mm)	D int (mm)	E (mm)	Dext (mm)	v (m s ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	Peso (kg m ⁻¹ tubería)	
TUBERÍAS DE ABASTECIMIENTO								
PN 10	PVC	110	99,4	5,3	110	1,5	0,012	2,7
	PVC biorientado	110	105,2	2,4	110	1,4	0,012	1,1 (6)
	PEHD	125	102,2	11,4	125	1,4	0,012	3,8
	Fundición dúctil	125	125,6	9,2 (3)	144	0,9	0,012	21,6 (5)
TUBERÍAS DE SANEAMIENTO								
P atm	PVC	315 (1)	299,6	7,7	315	5,0	0,35	11,5
	PVC biorientado	315 (1)	301,2	6,9	315	5,0	0,35	9,4 (6)
	PP corrugado	400 (1)	343	28,5(4)	400	3,8	0,35	9,8
	PEHD corrugado	400 (1)	343	28,5 (4)	400	3,8	0,35	9,8
	Hormigón	400 (2)	400	42	484	2,8	0,35	134,1

(1) Diámetro nominal = diámetro externo de la tubería (MOPU, 1974)

(2) Diámetro nominal = diámetro interno de la tubería (MOPU, 1974)

(3) 3 mm de mortero cemento + 6,2 mm pared tubería fundición dúctil.

(4) Espesor aparente. El espesor real de la pared de la tubería es de 2,3 mm.

(5) 18,9 kg m⁻¹ fundición + 2,7 kg m⁻¹ cemento

(6) Para el cálculo del peso por metro de tubería de PVC biorientado se ha tomado una densidad media entre los valores establecidos por la norma UNE 53020 (1350-1460 kg m⁻³)

4.3. La extracción y producción de materiales

Se realiza una estimación de la energía requerida para la extracción de recursos naturales y transporte hasta la fábrica.

Para el caso de las tuberías de PVC se utiliza el consumo energético y la emisión de CO₂ presentadas en el documento "Estimación del consumo energético y de la emisión de CO₂ asociados a la producción unitaria de PVC" (Baldasano y Parra, 2005). Se utilizan los valores del criterio de cálculo que considera la obtención conjunta de PVC y sosa cáustica. El consumo energético de la fabricación de PVC asciende a 7,19 kWh kg⁻¹ y el factor de emisión de CO₂ asociado es 2,04 t CO₂ t⁻¹.

En el caso de tuberías de PEHD se consideran los valores medios estimados para la obtención de este polímero en Europa, que suponen 6,23 kWh kg⁻¹ y unas emisiones de 1,60 kg CO₂ kg⁻¹ (APME, 2004). El consumo energético para la obtención de PP es de 5,55 kWh kg⁻¹ y las emisiones de CO₂ asociadas de 1,70 kg CO₂ kg⁻¹.

En el caso del hormigón en masa la composición típica para la fabricación de tuberías es de un 10-15% en volumen de cemento Pórtland, entre un 60 y un 75% de agregado (arena y grava) y entre un 15 y un 20% de agua. Teniendo en cuenta que la relación agua cemento máxima permitida por la norma ASTM C76 es de 0,53 y debe estar comprendida entre 0,33 y 0,45 se ha escogido la composición media reflejada en la Tabla 4.2 (Fernández, 1989). Para estimar el consumo energético de producción del hormigón en masa se toma como referencia el valor 0,26 kWh kg⁻¹ (Baird *et al.*, 1997), se considera que de esta energía proviene en un 70% de fuel o gasóleo y en un 30% del mix eléctrico español para el cálculo de las emisiones de CO₂ correspondientes, resultando 0,083 kg CO₂ kg⁻¹ hormigón.

Tabla 4.2. Composición típica de hormigón para tuberías.

	Composición (% vol)	Composición (% masa)
Cemento	12,5	16,3
Agregado (arena/grava)	67,5	76,3
Agua	17,5	7,5

Para la fundición dúctil se asume un consumo energético de 6,70 kWh kg⁻¹, obtenido a partir del consumo energético de producción (5,03 kWh kg⁻¹) del documento europeo BREF del hierro y del acero (EPA, 2004), considerando que este último valor es un 75% del consumo energético de extracción, transporte y producción del acero. Se asume que la energía utilizada se compone en un 92% de hulla y 8% de electricidad. Los consumos energéticos de los materiales se resumen en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Consumos energéticos de la extracción de recursos naturales y de la producción de materiales.

Material	Consumo de energía (kWh kg ⁻¹)	Fuente
PVC	7,19	(Baldasano y Parra, 2005)
PEHD	6,23	(APME, 2004). Eco-profile Polyolefins (APME, 2004). Eco-profile Conversion processes for polyolefins
PP	5,55	(APME, 2004). Eco-profile Polyolefins (APME, 2004). Eco-profile Conversion processes for polyolefins
Fundición dúctil	6,70	(EPA, 2004)
Hormigón	0,26	(Baird <i>et al.</i> , 1997)

4.4. El conformado de la tubería

Las tuberías de PVC se fabrican por extrusión. El consumo energético asociado a este proceso se ha estimado en 0,45 kWh (kg PVC)⁻¹, que suponen 1,2 kWh m⁻¹ en el caso de tuberías para el transporte de agua potable y 5,2 kWh m⁻¹ en el caso de las de saneamiento.

El proceso de producción de tuberías de PVC biorientado supone un consumo energético de 0,8 kWh kg⁻¹, lo que implica un aporte de 0,9 kWh m⁻¹ en abastecimiento y de 8,3 kWh m⁻¹ en saneamiento.

Se estima que para la fabricación de tuberías de PEHD, PP y PE corrugado por extrusión se emplean 0,8 kWh (kg material)⁻¹, de lo cual resulta un gasto energético de 2,1 kWh m⁻¹ tubería de PEHD para agua potable y de 7,8 kWh m⁻¹ tanto para la tubería de PE corrugado como para la de PP corrugado aplicables a saneamiento.

El procesado de las tuberías de hormigón se realiza normalmente por centrifugación o vibración. Las tuberías de fundición dúctil se procesan por centrifugación o mediante fundido vertical. Se ha considerado que el consumo energético de estos procesos a escala industrial es equiparable al necesario para la extrusión del PVC, con lo cual se ha tomado un valor de 0,45 kWh (kg material)⁻¹. De ahí se obtiene que para la fabricación de 1 metro de tubería de hormigón DN400 es necesario consumir 60,4 kWh m⁻¹ y para las tuberías de fundición dúctil DN125 se necesitan 12,7 kWh m⁻¹.

En todos los casos se considera que la energía utilizada en el proceso de producción es eléctrica, lo que supone un factor de emisión de CO₂ de 0,443 kg de CO₂ kWh⁻¹, de acuerdo al mix eléctrico español para el año 2002.

4.5. Instalación y utilización de la tubería.

En este estudio se consideran tuberías enterradas. Para la instalación de la tubería se habrá de excavar una zanja, proceder a introducir la tubería en un lecho de arena y compactar el suelo. Las dimensiones de la zanja a excavar dependerán del tamaño de la tubería. Debido a que se está trabajando con diámetros nominales similares para cada uno de los tipos de tubería analizados, se ha estimado que comparativamente el gasto energético destinado a la instalación de las tuberías será el mismo.

La instalación de tuberías de PEHD para conducción de agua potable, en las que el fluido puede circular a presión, precisa de una etapa de termosoldado de los distintos tramos de tubería. Se ha estimado el consumo energético correspondiente a esta operación basado en tramos de tubería de 12 m de longitud y tomando como referencia un equipo comercial que permite soldar tuberías de hasta 200 mm de diámetro, resultando 0,07 kWh m⁻¹ (<http://www.ahmcelroy.com/products.htm>).

Para todos los materiales utilizados se supone el mismo tiempo de vida medio, 50 años, y que se sigue un protocolo de inspecciones análogo. Se considera que el consumo energético asociado al mantenimiento será el mismo independientemente de la tubería considerada.

Al considerar tuberías de transporte de agua potable, que llevan asociado un coste de impulsión de fluido, hay que tener en cuenta que los diferentes materiales presentan una rugosidad distinta, que conlleva unas pérdidas de carga diferentes. Además en el caso de la fundición dúctil es frecuente la aparición de incrustaciones con el tiempo lo que disminuiría el radio efectivo de la tubería y el incremento de las pérdidas de carga.

Para estimar los consumos energéticos y emisiones por utilización de tubería de abastecimiento de agua potable se ha tomado como base una velocidad típica de circulación de 1,5 m s⁻¹. Se ha calculado el caudal correspondiente para la tubería de PVC DN110, resultando 0,012 m³ s⁻¹. Se han estimado los consumos energéticos por bombeo para impulsar este caudal en los diferentes tipos de tuberías de abastecimiento. Se ha supuesto una media de 8 h de funcionamiento de la bomba por día, como base de cálculo. Se han considerado tramos rectos de tubería libres de accesorios, situados en horizontal de manera que los costes de bombeo corresponden exclusivamente con aquellos necesarios para vencer las pérdidas de carga. Se han estimado estas últimas de acuerdo a la ecuación de Hazen-Williams, los coeficientes considerados para cada material se presentan en la Tabla 4.4. Para el caso de la tubería de PVC biorientado se ha utilizado un ábaco proporcionado por una casa comercial (Pipelife, 2005), en el que las pérdidas de carga aparecen tabuladas según la fórmula de Prandtl-Colebrook-White para agua limpia a 20°C. Los datos escogidos se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.4. Coeficientes de Hazen Williams empleados para el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías de abastecimiento (Hernández, 2000).

Material	Coeficiente de Hazen Williams
PVC	150
PEHD	140
Fundición dúctil con revestimiento interior de mortero cemento, nueva	100

Tabla 4.5. Pérdidas de carga en una tubería de PVC biorientado DN110, correlación Prandlt-Colebrook-White para transportar un caudal de 0,012 m³ s⁻¹. (Pipelife,2005)

Pérdida de carga (m/km)	DN 110	D int 105,2 mm
	Q (m ³ s ⁻¹)	V(m s ⁻¹)
16,00	0,012	1,4

En tuberías de fundición se producen procesos de envejecimiento y formación de incrustaciones que suponen un aumento de las pérdidas de carga, lo que implica una disminución del coeficiente de Hazen Williams. Se ha supuesto para estimar los consumos energéticos por bombeo una variación lineal de dicho coeficiente, considerando que al cabo de 50 años el valor que alcanza supone un 46% del inicial.

El consumo energético medio de una bomba que trabaje con una tubería de PVC DN110 bajo las hipótesis planteadas en el párrafo anterior es de 327 kWh m⁻¹. El PVC biorientado presenta una rugosidad menor que el PVC convencional, el consumo energético por impulsión se estima en 267 kWh m⁻¹. Para el PEHD DN125 se obtiene un consumo de 324 kWh m⁻¹. La tubería de fundición, donde se ha tenido en cuenta una variación lineal de la rugosidad con el tiempo, implica un consumo energético de 397 kWh m⁻¹. Las velocidades de circulación del fluido en la tubería de PEHD y de fundición son menores que en el caso del PVC, 1,4 y 0,9 m s⁻¹, debido a que las secciones de paso son mayores. En el caso de la fundición dúctil se han considerado procesos de envejecimiento y generación de incrustaciones a lo largo del tiempo de vida, lo que supone que los consumos por bombeo sean mayores que en las otras tuberías a pesar de que la velocidad de circulación del fluido sea menor.

En tuberías destinadas a saneamiento no se ha planteado este problema, el fluido circula a presión atmosférica y en gran número de casos no se utilizan sistemas de impulsión.

4.6. El transporte

Se asume que el transporte en la conexión de las diferentes etapas del ciclo de vida, se realiza con camiones de carga que consumen gasóleo, y que tienen una demanda energética de 0,00073 kWh km⁻¹ kg⁻¹ (WEC, 2004). Este valor es aplicable a Europa Occidental.

Se consideró un recorrido medio de 100 km para todos los desplazamientos necesarios: transporte de las materias primas hasta la planta de producción, transporte de la tubería hasta el lugar de la instalación y transporte para la disposición de los residuos en vertedero.

4.7. Factores de emisión

La Tabla 4.4 presenta los factores de emisión de CO₂ base que se utilizan en cada etapa, según la composición o tipo del suministro energético ya indicados para cada caso.

Tabla 4.4. Factores de emisión de CO₂.

Fuente de energía / combustible	Factor de emisión		
	† C TJ ⁻¹ (IPCC, 1996)	† CO ₂ TJ ⁻¹	† CO ₂ MWh ⁻¹
Mix eléctrico español			0,443*
Producción de PVC en Hispavic - Vinilis (Martorell)			0,284*¶
Gasóleo / fuelóleo	20,2	74,1	0,267
Gas natural	15,3	56,1	0,202
Carbón (hulla)	26,2	96,1	0,346

* Deducidos en el documento: "Estimación del consumo energético y de la emisión de CO₂ asociados a la producción unitaria de PVC, JM Baldasano y R. Parra. Enero de 2005".

¶ Corresponde al criterio de cálculo que considera como objetivo la obtención conjunta de PVC y sosa cáustica.

5. Resultados y análisis comparativo

5.1. Estimación de consumos energéticos y emisiones de CO₂ para tuberías

Las Tablas 5.1 a 5.13 muestran la estimación de los consumos energéticos y de las correspondientes emisiones de CO₂ asociados a los casos base presentados en el Apartado 4.2. Las tablas incluyen los valores estimados para cada una de las etapas del ciclo de vida de una tubería. En las Figuras 5.1 a 5.13 se representa esquemáticamente el ciclo de vida para cada caso con los valores de consumo energético y emisiones de CO₂ estimados.

Los resultados se presentan de manera resumida en las Tablas 5.14 a 5.16.

5.2. Tuberías de conducción de agua potable

La etapa que presenta un mayor consumo energético y unas emisiones de CO₂ más importantes es la de utilización de tubería, debido a los consumos por bombeo a lo largo de un período de 50 años.

En el caso de las tuberías plásticas, PVC, PVC biorientado y PEHD, el peso de esta etapa se encuentra entre el 92% y el 95%, suponiendo 980 kWh para las tuberías de PVC, 801 kWh para el PVC biorientado y 973 kWh para las tuberías de PEHD. Esta aportación es relativamente menor para tuberías de fundición, en las que adquiere importancia la etapa de extracción y suministro de materiales, aporta el 73% del consumo total para tuberías de material nuevo y el 90% para tuberías con un 80% de material reciclado (1191 kWh para cada tramo de 3 m de tubería en ambos casos).

Desde el punto de vista de los indicadores ambientales considerados, la tubería que presenta mejores resultados es la de PVC biorientado DN110, que conlleva asociados un consumo energético de 828 kWh y unas emisiones de 363 kg de CO₂. El PVC convencional implica un consumo de energía y unas emisiones de CO₂ un 20% mayores, del orden de 1041 kWh y 452 kg de CO₂.

A continuación se encuentra la tubería de PEHD DN125, con un consumo de energía un 1,3% mayor que el caso base (PVC convencional), de 1 055 kWh y la emisión de 454 kg de CO₂ (un 0,4% más que la tubería de PVC).

Si se usa material reciclado en la elaboración tubería de fundición, el consumo energético es un 26% mayor que el de la tubería de PVC, suponiendo 1 316 kWh y la emisión de 581 kg de CO₂.

El caso más desfavorable corresponde a las tuberías de fundición dúctil sin material reciclado, en las que el consumo energético es de 1 620 kWh, del orden de un 56% mayor que en el caso base (PVC convencional DN110). Para este tipo de tuberías las emisiones de CO₂ asociadas al ciclo de vida suponen 681 kg CO₂.

5.3. Tuberías de saneamiento

La etapa de extracción y suministro de materiales es la que supone un mayor consumo energético para todas las tuberías estudiadas (superior al 80% para tuberías de material nuevo y al 60% en aquellas que llevan material reciclado), excepto la de hormigón, en donde adquiere importancia la etapa de producción de la tubería (53%). La siguiente etapa en importancia en cuanto a consumo energético es la de producción de la tubería.

Desde el punto de vista de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, la importancia relativa de cada una de las etapas se mantiene.

Los casos más favorables de entre los estudiados corresponden a las tuberías plásticas que contienen un 80% de material reciclado. En primer lugar se encontraría el PP corrugado (60 kWh y 22 kg de CO₂), a continuación el PE corrugado (64 kWh con unas emisiones de 21 kg de CO₂ asociadas) y por último el PVC (69 kWh y unas emisiones de 22 kg de CO₂). El peso del metro de tubería es un factor determinante en este caso. Tanto la tubería de PE como la de PP corrugado pesan un 15% menos por metro que la de PVC.

Para la producción de tuberías de PVC biorientado no se suele introducir material reciclado, por tanto no se ha considerado esta posibilidad entre los casos del estudio.

A continuación se encuentran las tuberías de PP corrugado DN400, PE corrugado DN400, PVC biorientado DN315 y PVC DN315 que no presentan material reciclado en su composición, suponiendo un consumo energético de 191 kWh, 211 kWh, 223 kWh y 262 kWh y con unas emisiones de 61 kg, 59 kg, 67 kg y 77 kg de CO₂ por cada tramo de 3 m de tubería respectivamente.

El consumo energético de las tuberías de PP, PE y PVC con material reciclado se reduce entre un 74 y un 77% respecto de la tubería de PVC sin material reciclado, presentando todas las tuberías plásticas un comportamiento muy similar.

En cuanto a las emisiones de CO₂, el resultado es más favorable para la tubería de PE corrugado.

En lo que respecta a los materiales plásticos los valores obtenidos se encuentran dentro del mismo rango. La principal diferencia que se observa en la Tabla 5.14 corresponde a los diferentes escenarios en los que se utiliza material nuevo en la fabricación de la tubería o, por el contrario, se emplea un 80% de material reciclado para su elaboración.

Como caso más desfavorable se encuentra la tubería de hormigón DN400 que supone un consumo energético de 345 kWh y la emisión de 129 kg de CO₂.

Tabla 5.1. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de **PVC para conducción de agua potable de 110 mm** de diámetro nominal (**sin uso de PVC reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	56,7	5,4	16,1	3,6
Transporte de materiales hasta la planta de producción	0,6	0,1	0,2	0,0
Producción de tubería de PVC	3,6	0,4	1,6	0,4
Transporte de tubería para su instalación	0,6	0,1	0,2	0,0
Instalación	--	0,0	--	0,0
Uso tubería (50 años)	979,8	94,1	433,9	96,0
TOTAL	1041,3	100,0	451,9	100,0

Tabla 5.2. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de **PVC biorientado para conducción de agua potable de 110 mm** de diámetro nominal (**sin uso de PVC reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	23,9	2,9	6,8	1,9
Transporte de materiales hasta la planta de producción	0,2	0,0	0,1	0,0
Producción de tubería de PVC	2,7	0,3	1,2	0,3
Transporte de tubería para su instalación	0,2	0,0	0,1	0,0
Instalación	--	0,0	--	0,0
Uso tubería (50 años)	800,9	96,7	354,7	97,8
TOTAL	828,0	100,0	362,8	100,0

Tabla 5.3. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de **fundición dúctil para conducción de agua potable de 125 mm** de diámetro nominal (**sin uso de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	390,6	24,1	138,1	20,3
Transporte de materiales hasta la planta de producción	4,7	0,3	1,3	0,2
Producción de tubería de fundición	29,1	1,8	12,9	1,9
Transporte de tubería para su instalación	4,7	0,3	1,3	0,2
Instalación	-	0,0	-	0,0
Mantenimiento tubería (bombeo)	1191,2	73,5	527,5	77,5
TOTAL	1620,4	100,0	681,1	100,0

Tabla 5.4. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de **fundición dúctil para conducción de agua potable de 125 mm** de diámetro nominal (utilizando un **80% de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	86,3	6,6	38,2	6,6
Transporte de materiales hasta la planta de producción	4,7	0,4	1,3	0,2
Producción de tubería de fundición	29,1	2,2	12,9	2,2
Transporte de tubería para su instalación	4,7	0,4	1,3	0,2
Instalación	-	0,0	-	0,0
Mantenimiento tubería (bombeo)	1191,2	90,5	527,5	90,8
TOTAL	1316,1	100,0	581,2	100,0

Tabla 5.5. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de **PEHD para conducción de agua potable de 125 mm** de diámetro nominal (**sin utilizar material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	71,5	6,8	18,4	4,0
Transporte de materiales hasta la planta de producción	0,8	0,1	0,2	0,0
Producción de tubería de fundición	9,2	0,9	4,1	0,9
Transporte de tubería para su instalación	0,8	0,1	0,2	0,0
Instalación (soldadura de tramos de tubería)	0,2	0,0	0,1	0,0
Mantenimiento tubería	972,6	92,2	430,7	94,9
TOTAL	1055,2	100,0	453,7	100,0

Tabla 5.6. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de **PVC para saneamiento de 315 mm** de diámetro nominal (**sin uso de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales para el PVC	241,6	92,1	68,7	89,3
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,5	1,0	0,7	0,9
Producción de tubería de PVC	15,6	5,9	6,9	9,0
Transporte de tubería para su instalación	2,5	1,0	0,7	0,9
TOTAL	262,2	100,0	76,9	100,0

Tabla 5.7. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de **PVC para saneamiento de 315 mm** de diámetro nominal (**80% de PVC reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	48,4	70,1	13,8	62,6
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,5	3,7	0,7	3,1
Producción de tubería de PVC	15,6	22,5	6,9	31,3
Transporte de tubería para su instalación	2,5	3,7	0,7	3,1
TOTAL	69,0	100,0	22,0	100,0

Tabla 5.8 Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de **PVC biorientado para saneamiento de 315 mm** de diámetro nominal (**sin PVC reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	196,8	88,1	55,9	83,5
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,1	0,9	0,5	0,8
Producción de tubería de PVC	22,5	10,1	10,0	14,9
Transporte de tubería para su instalación	2,1	0,9	0,5	0,8
TOTAL	223,4	100,0	67,0	100,0

Tabla 5.9. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de **PE corrugado para saneamiento de 400 mm** de diámetro nominal (**sin material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales para el PE	183,2	86,8	47,0	80,3
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,1	1,0	0,6	1,0
Producción de tubería de PE corrugado	23,5	11,1	10,4	17,8
Transporte de tubería para su instalación	2,1	1,0	0,6	1,0
TOTAL	211,0	100,0	58,6	100,0

Tabla 5.10. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de **PE corrugado para saneamiento de 400 mm** de diámetro nominal. (Con un **80% de material reciclado**)

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales para el PE	36,6	56,8	9,4	44,9
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,1	3,3	0,6	2,7
Producción de tubería de PE corrugado	23,5	36,5	10,4	49,7
Transporte de tubería para su instalación	2,1	3,3	0,6	2,7
TOTAL	64,4	100,0	21,0	100,0

Tabla 5.11. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de **PP corrugado para saneamiento de 400 mm** de diámetro nominal (**sin material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales para el PP	163,2	85,4	50,0	81,2
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,1	1,1	0,6	0,9
Producción de tubería de PP corrugado	23,5	12,3	10,4	16,9
Transporte de tubería para su instalación	2,1	1,1	0,6	0,9
TOTAL	191,0	100,0	61,5	100,0

Tabla 5.12. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de tubería de **PP corrugado para saneamiento de 400 mm** de diámetro nominal. (Con un **80% de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales para el PP	32,6	54,0	10,0	46,4
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,1	3,6	0,6	2,7
Producción de tubería de PP corrugado	23,5	38,9	10,4	48,3
Transporte de tubería para su instalación	2,1	3,6	0,6	2,7
TOTAL	60,4	100,0	21,6	100,0

Tabla 5.13. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, instalación y utilización de 3 m de **tubería de hormigón en masa para saneamiento de 400 mm** de diámetro nominal.

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales para el hormigón	105,1	30,5	33,6	25,9
Transporte de materiales hasta la planta de producción	29,4	8,5	7,8	6,1
Producción de tubería de hormigón	181,1	52,5	80,2	62,0
Transporte de tubería para su instalación	29,4	8,5	7,8	6,1
TOTAL	345,0	100,0	129,4	100,0

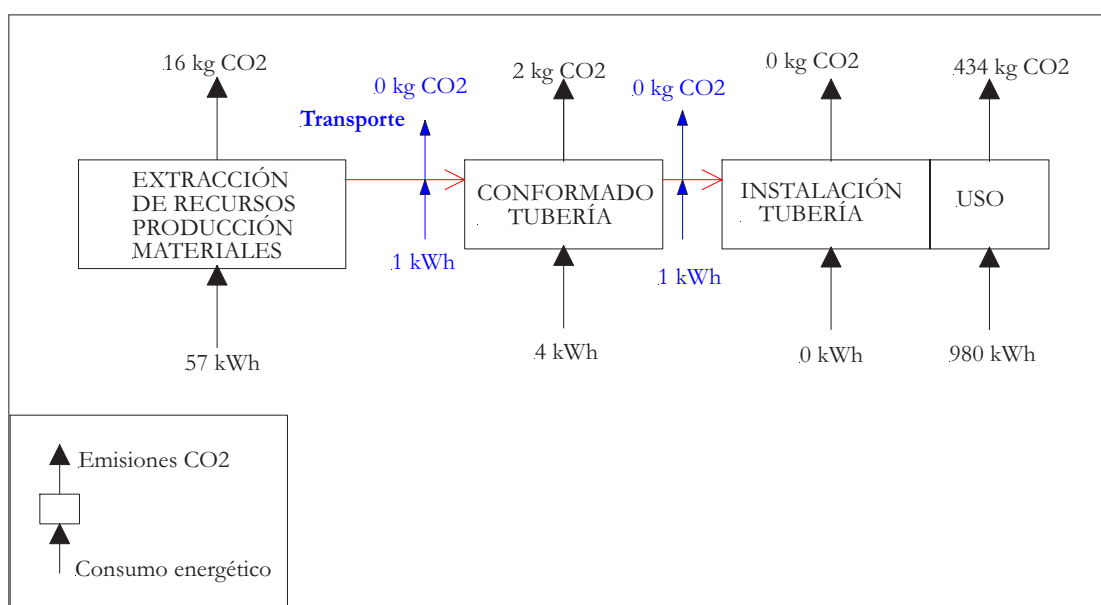


Figura 5.1. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PVC DN110** para abastecimiento.

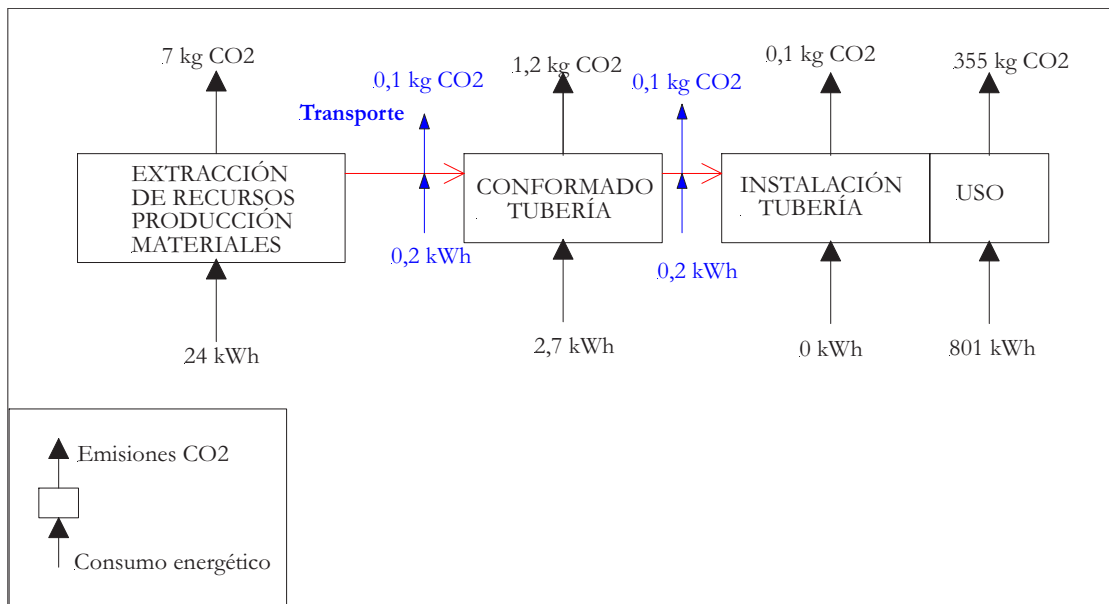


Figura 5.2. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PVC biorientado DN110** para abastecimiento.

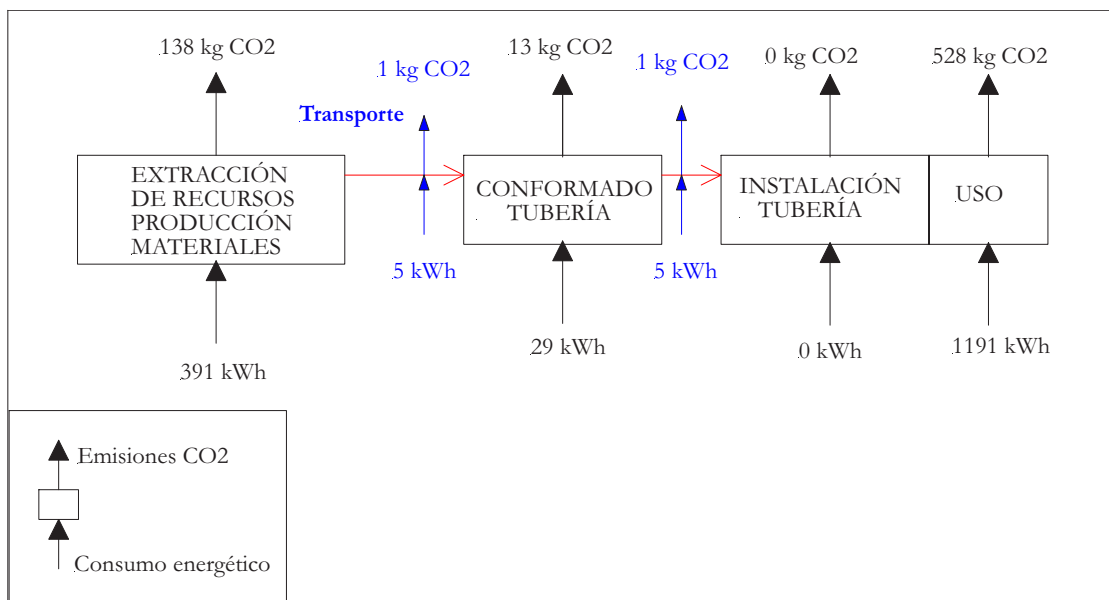


Figura 5.3. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de fundición dúctil DN125** para abastecimiento (sin uso de material reciclado).

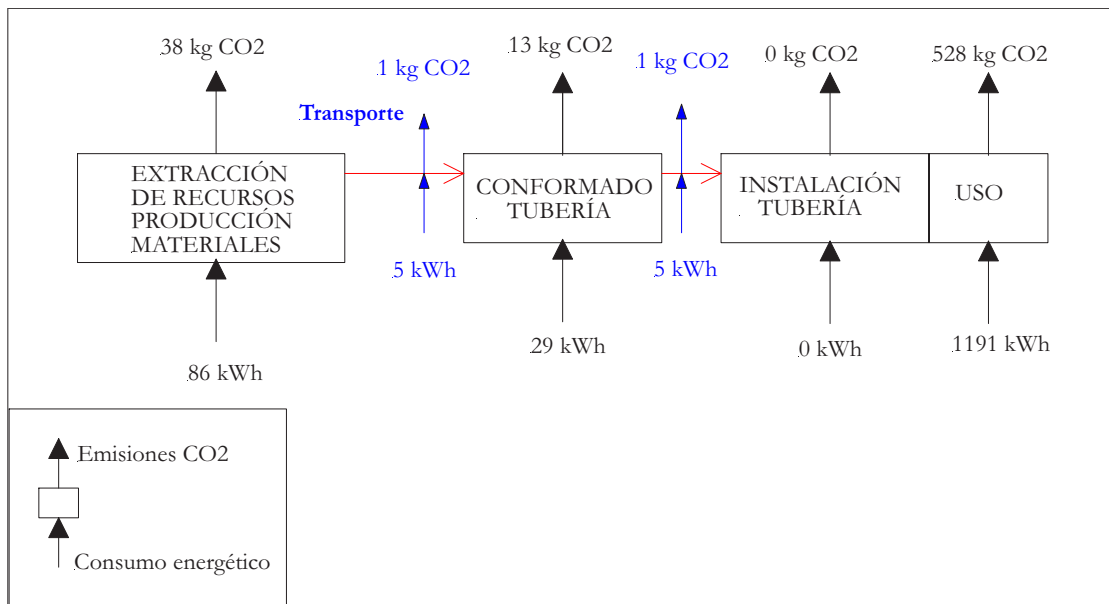


Figura 5.4. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de fundición dúctil DN125** para abastecimiento (con un **80% de material reciclado**).

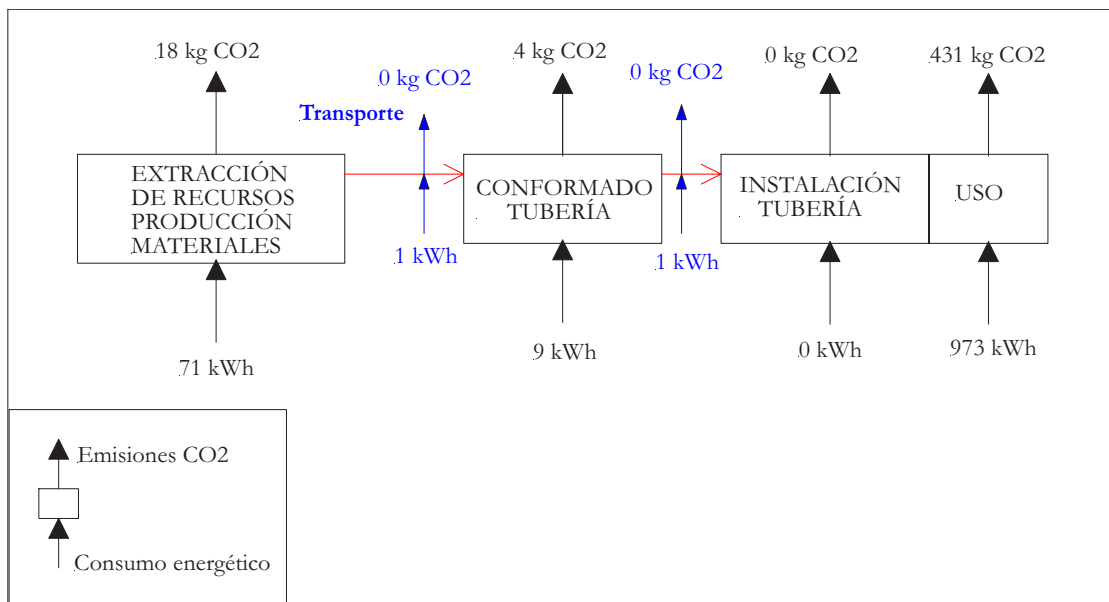


Figura 5.5. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PEHD DN125** para abastecimiento.

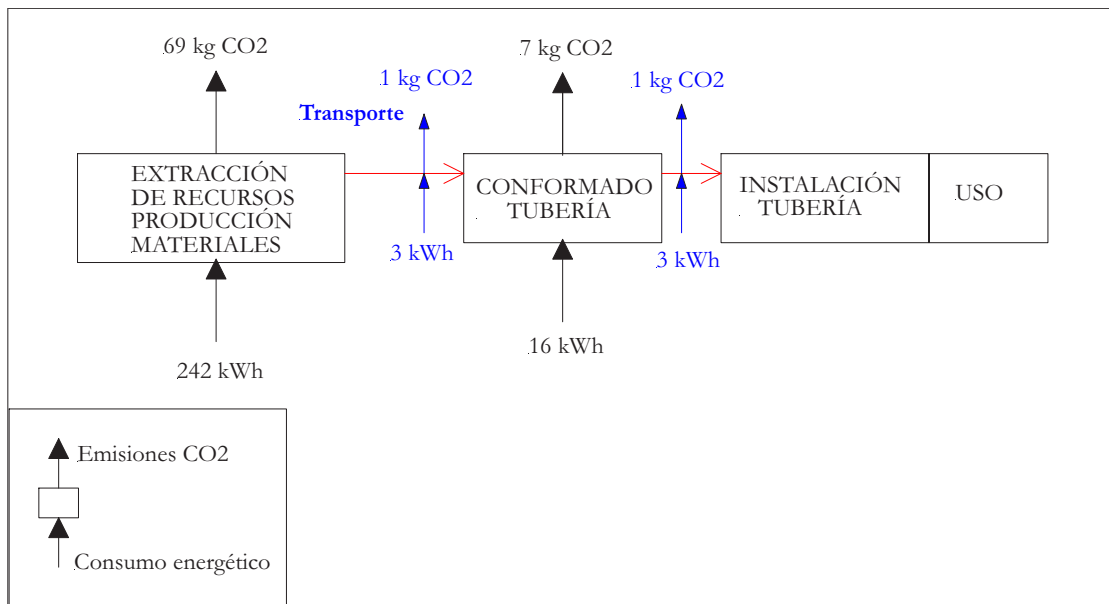


Figura 5.6. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PVC DN315** para saneamiento (sin uso de material reciclado).

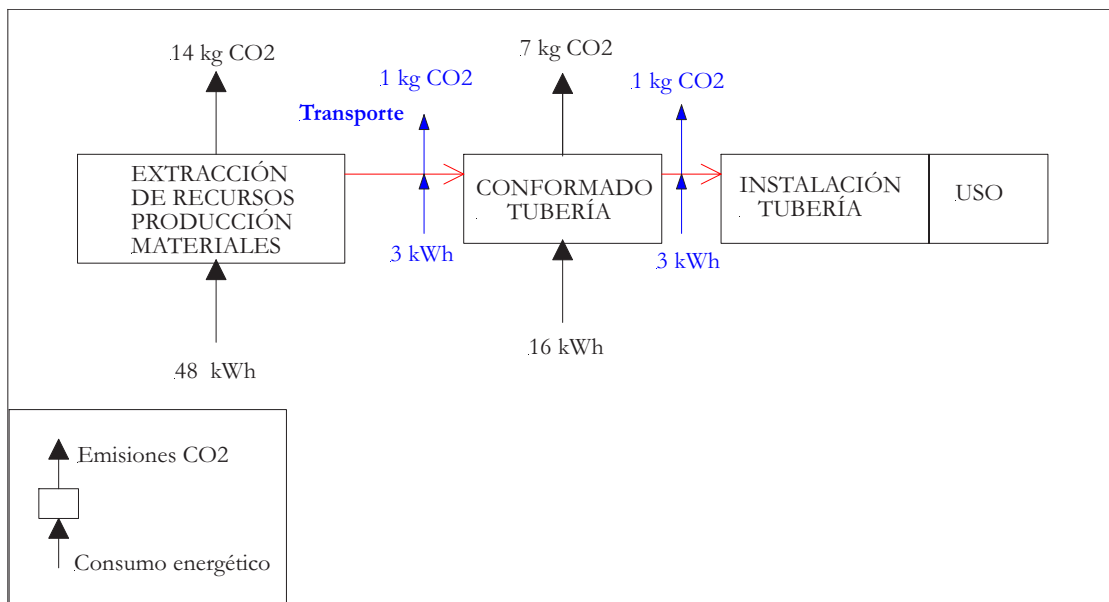


Figura 5.7. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PVC DN315** para saneamiento (con un **80% de material reciclado**).

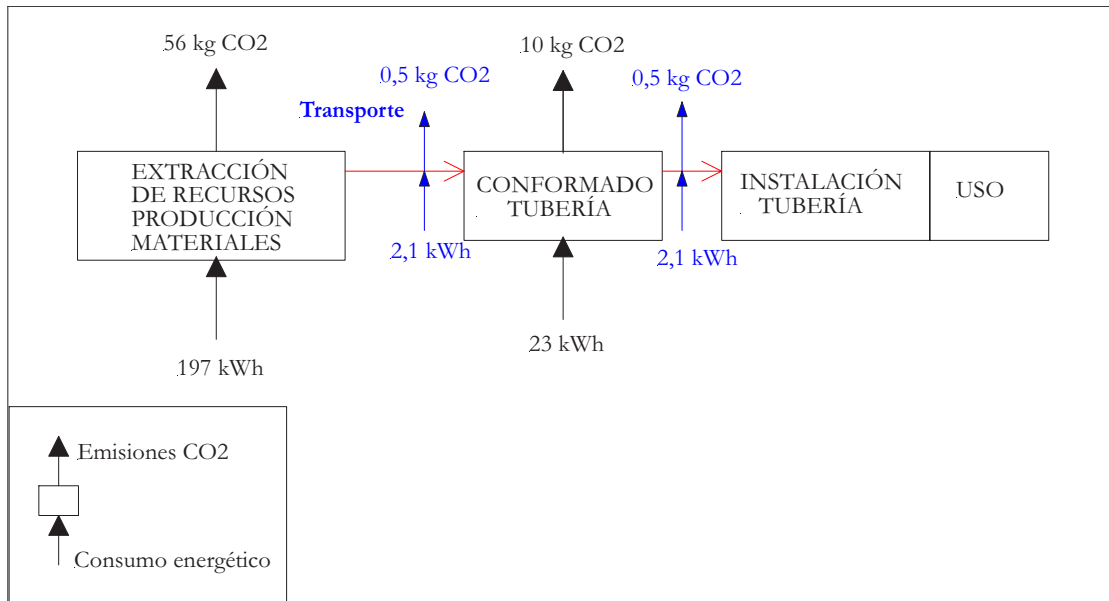


Figura 5.8. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PVC biorientado DN315** para saneamiento (sin material reciclado)

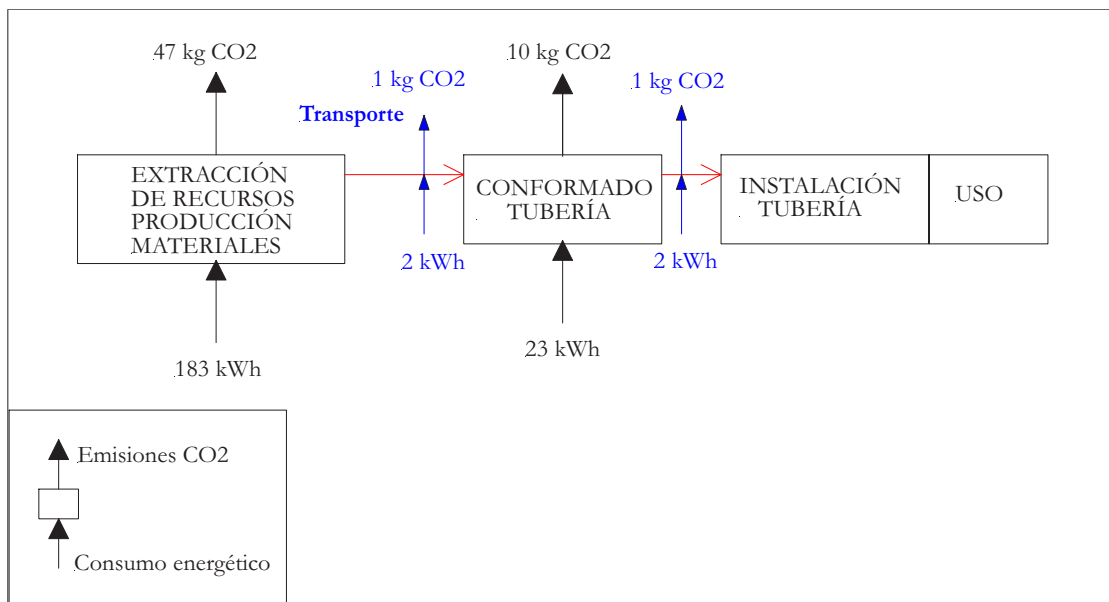


Figura 5.9. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PE corrugado DN400** para saneamiento (sin uso de material reciclado).

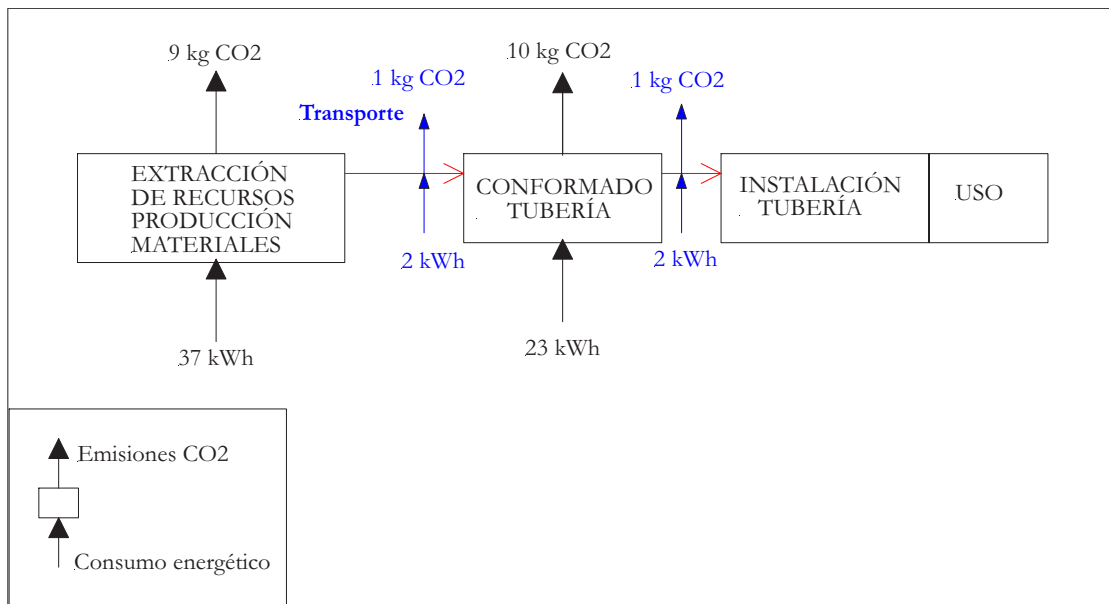


Figura 5.10. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PE corrugado DN400** para saneamiento (con un **80% de material reciclado**).

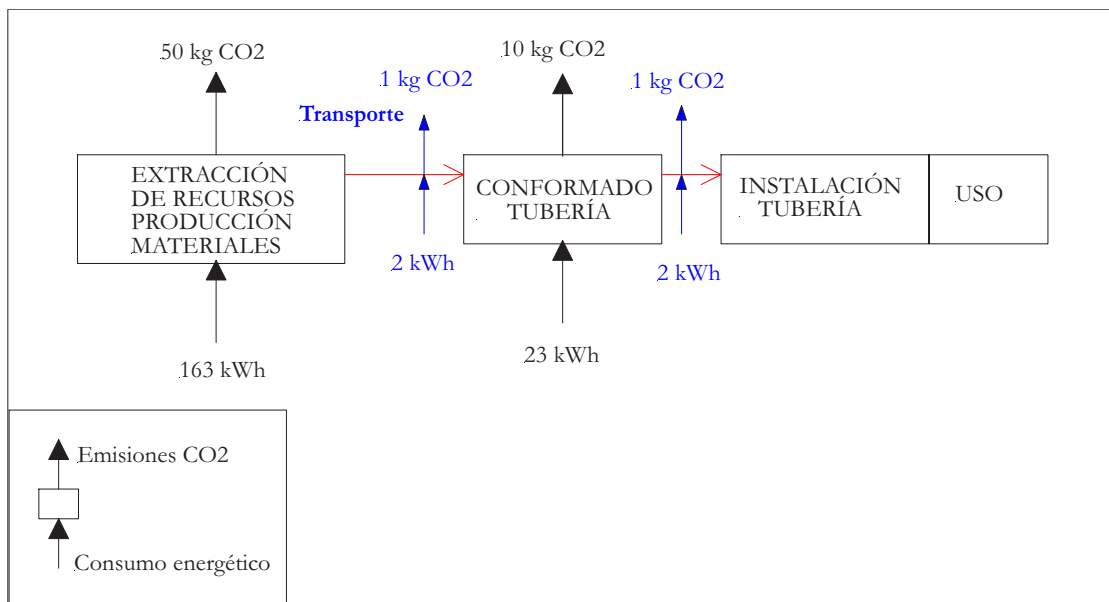


Figura 5.11. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PP corrugado DN400** para saneamiento (**sin uso de material reciclado**).

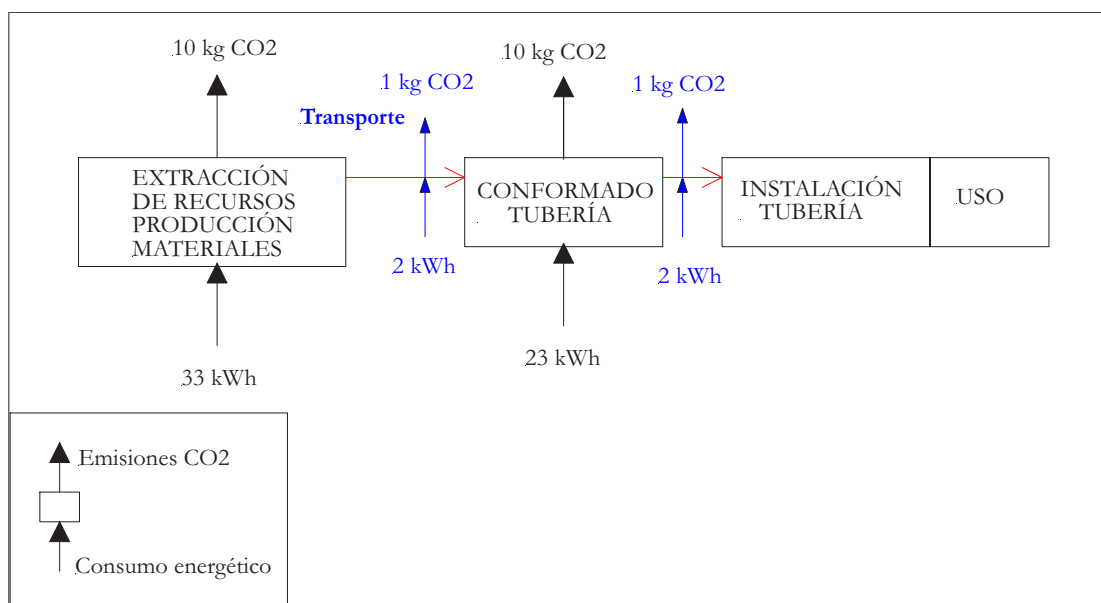


Figura 5.12. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de PP corrugado DN400** para saneamiento (con un **80% de material reciclado**).

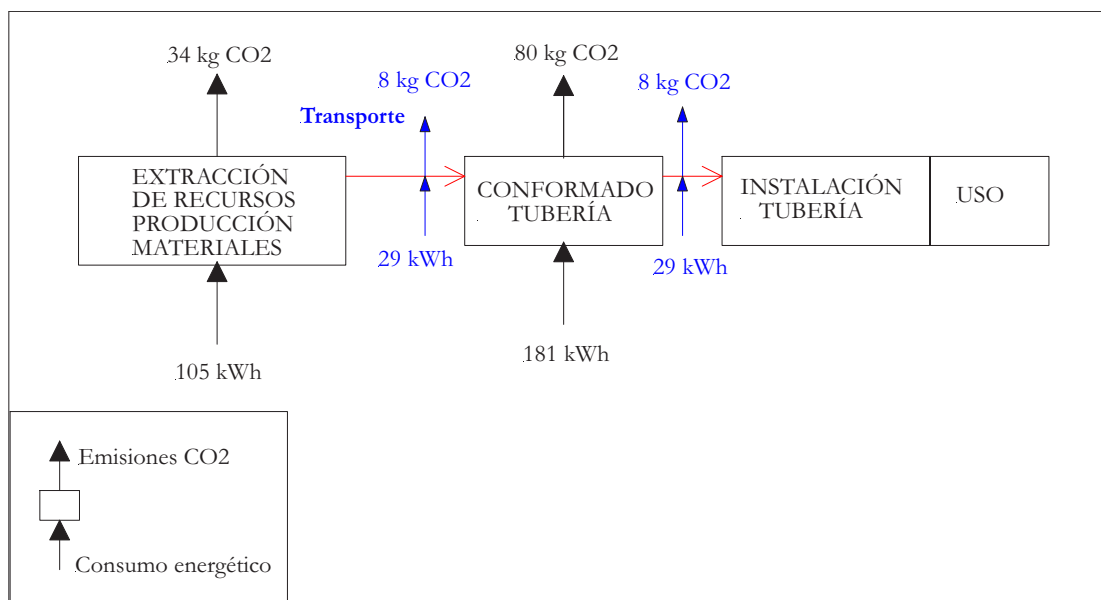


Figura 5.13. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción y uso de **3 m de tubería de hormigón DN400** para saneamiento.

Las tablas 5.14 a 5.16 presentan un resumen del consumo energético y las emisiones de CO₂ correspondientes a cada uno de los casos base analizados.

Tabla 5.14. Consumo de energía estimado para cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de diferentes materiales.

Base de cálculo: 3 m de tubería	Consumo de energía (kWh)							
	Abastecimiento							
Material	PVC DN110	PVC biorientado DN110	PEHD DN125	Fundición DN125	Fundición DN125 (80% reciclado)			
Extracción y suministro de materiales	56,7	23,9	71,5	390,6	86,3			
Transporte de materiales hasta la planta de producción	0,6	0,2	0,8	4,7	4,7			
Producción de tubería	3,6	2,7	9,2	29,1	29,1			
Transporte de tubería para su instalación	0,6	0,2	0,8	4,7	4,7			
Instalación	despreciable	despreciable	0,2	despreciable	despreciable			
Uso tubería (50 años)	979,8	800,9	972,6	1191,2	1191,2			
TOTAL	1041,3	828,0	1055,2	1620,4	1316,1			
Material	Saneamiento							
	PVC DN315	PVC DN315 (80% reciclado)	PVC biorientado DN315	Hormigón DN400	PE corrugado DN400	PE corrugado DN400 (80% reciclado)	PP corrugado DN 400	PP corrugado DN400 (80% reciclado)
Extracción y suministro de materiales	241,6	48,4	196,8	105,1	183,2	36,6	163,2	32,6
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,5	2,5	2,1	29,4	2,1	2,1	2,1	2,1
Producción de tubería	15,6	15,6	22,5	181,1	23,5	23,5	23,5	23,5
Transporte de tubería para su instalación	2,5	2,5	2,1	29,4	2,1	2,1	2,1	2,1
TOTAL	262,2	69,0	223,4	345,0	211,0	64,4	191,0	60,4

Tabla 5.15. Emisiones de CO₂ estimadas para cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de diferentes materiales.

Base de cálculo: 3 m de tubería	Emisiones de CO ₂ (kg de CO ₂)							
	Abastecimiento							
Material	PVC DN110	PVC biorientado DN110	PEHD DN125	Fundición DN125	Fundición DN125 (80% reciclado)			
Extracción y suministro de materiales	16,1	6,8	18,4	138,1	38,2			
Transporte de materiales hasta la planta de producción	0,2	0,1	0,2	1,3	1,3			
Producción de tubería	1,6	1,2	4,1	12,9	12,9			
Transporte de tubería para su instalación	0,2	0,1	0,2	1,3	1,3			
Instalación	despreciable	despreciable	0,1	despreciable	despreciable			
Uso tubería (50 años)	433,9	354,7	430,7	527,5	527,5			
TOTAL	451,9	362,8	453,7	681,1	581,2			
Material	Saneamiento							
	PVC DN315	PVC DN315 (80% reciclado)	PVC biorientado DN315	Hormigón DN400	PE corrugado DN400	PE corrugado DN400 (80% reciclado)	PP corrugado DN 400	PP corrugado DN400 (80% reciclado)
Extracción y suministro de materiales	68,7	13,8	55,9	33,6	47,0	9,4	50,0	10,0
Transporte de materiales hasta la planta de producción	0,7	0,7	0,5	7,8	0,6	0,6	0,6	0,6
Producción de tubería	6,9	6,9	10,0	80,2	10,4	10,4	10,4	10,4
Transporte de tubería para su instalación	0,7	0,7	0,5	7,8	0,6	0,6	0,6	0,6
TOTAL	76,9	22,0	67,0	129,4	58,6	21,0	61,5	21,6

Tabla 5.16. Consumo de energía y emisiones de CO₂ atribuible a la producción y uso (50 años) de tuberías fabricadas con diferentes materiales. Resumen.

Base de cálculo: 3 m de tubería sin accesorios (Material reciclado % peso)	DN	Peso tubería	v	Coef. Hazen Williams	Consumo energético	Emisiones CO ₂	Variación Consumo Energético Respecto Caso Base	Variación Emisiones CO ₂ Respecto Caso Base
	mm	kg m ⁻¹	m s ⁻¹		kWh	kg CO ₂	%	%
TUBERÍAS DE ABASTECIMIENTO								
PVC biorientado	110	1,1	1,4	--(1)	828,0	362,8	-20,48	-19,73
PVC	110	2,7	1,5	150	1041,3	451,9	0,00	0,00
PEHD	125	3,8	1,4	140	1055,2	453,7	1,33	0,38
Fundición hierro (80% material reciclado)	125	21,6	0,9	100 (2)	1316,1	581,2	26,39	28,59
Fundición hierro	125	21,6	0,9	100 (2)	1620,4	681,1	55,61	50,69
TUBERÍAS DE SANEAMIENTO								
PP corrugado (80% material reciclado)	400	9,8	3,8	-	60,4	21,6	-81,15	-74,23
PE corrugado (80% material reciclado)	400	9,8	3,8	-	64,4	21,0	-79,54	-75,02
PVC (80% material reciclado)	315	11,5	5,0	-	69,0	22,0	-77,70	-73,63
PP corrugado	400	9,8	3,8	-	191,0	61,5	-28,65	-20,62
PE corrugado	400	9,8	3,8	-	211,0	58,6	-20,61	-24,56
PVC biorientado	315	10,4	5,0	-	223,4	67,0	-17,4	-14,8
PVC	315	11,5	5,0	-	262,2	76,9	0,00	0,00
Hormigón	400	134,1	2,8		345,0	129,4	33,26	70,43

(1). Las pérdidas de carga en la tubería a lo largo de 50 años se han estimado a partir de la correlación de Prandlt Colebrook White (Pipelife, 2005).

(2) Valor considerado para tubería nueva.

6. Conclusiones

En este documento se presentan las estimaciones del consumo energético y de las emisiones de CO₂ asociadas a la producción y utilización de tuberías.

Se han considerado como base para el estudio dos tipos ampliamente utilizados de tuberías, las tuberías para conducción de agua potable y las tuberías de saneamiento. Se han escogido como materiales de referencia en el primer caso el PVC, el PVC biorientado, el polietileno de alta densidad y la fundición dúctil, y para el segundo caso el PVC, el PVC biorientado, el polietileno corrugado, el polipropileno corrugado y el hormigón en masa.

La metodología empleada se basa en un procedimiento de contabilidad ambiental de consumos energéticos y emisiones de CO₂ en el que se han estimado dichos indicadores en cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de agua potable y de tuberías de saneamiento. Los resultados finales suponen la suma de los consumos de energía y de las emisiones de CO₂ equivalente para cada una de estas etapas.

Para realizar las estimaciones se han considerado tramos de tubería de 3 m de longitud libres de accesorios, en las que para una misma capacidad hidráulica los valores de velocidad de circulación del fluido se mantuviesen dentro de los rangos habituales.

Para el caso de la conducción de agua potable se ha tomado como referencia una tubería de PVC de 110 mm de diámetro nominal PN10. Como elementos comparativos se han escogido: una tubería de PVC biorientado de 110 mm de diámetro nominal, una tubería de PEHD de 125 mm de diámetro nominal y una tubería de fundición dúctil de 125 mm de diámetro nominal.

Para las tuberías de saneamiento se ha escogido como tubería tipo una tubería de PVC de 315 mm de diámetro. Como elementos comparativos se han escogido: una tubería de PVC biorientado DN315, una tubería de hormigón DN400, una tubería de PP corrugado DN400 y una de PE corrugado DN400.

La elección se realizó en base a la capacidad hidráulica de las mismas, de forma que para una velocidad de circulación típica en la tubería de PVC (1,5 m s⁻¹ para abastecimiento y 5 m s⁻¹ para saneamiento), se estimó el caudal circulante (0,012 m³ s⁻¹ para la tubería de abastecimiento y 0,35 m³ s⁻¹ para la tubería de saneamiento) y se consideraron tuberías comercialmente disponibles con diámetros que permitan el transporte de este caudal a velocidades iguales o menores que la tubería de PVC, teniendo en cuenta que para el caso particular del hormigón la velocidad típica de circulación es de 3 m s⁻¹.

Este informe abarca todas las etapas de un Análisis de Ciclo de Vida, aunque analizan solamente los dos aspectos ambientales antes indicados; y busca que los resultados sean representativos para la Península Ibérica, tanto en lo que se refiere a los consumos como a la configuración de las fuentes energéticas.

Para ello se ha priorizado la información de esta zona; sin embargo, el análisis se complementa con información del ámbito europeo o internacional.

Entre las magnitudes básicas utilizadas en este documentos se incluye al factor de emisión de CO₂ del mix eléctrico de España del año 2002, así como los respectivos valores del consumo de energía y de las emisiones de CO₂ asociadas a la producción del PVC en la planta de Hispavic-Vinilis en Martorell.

Los resultados obtenidos para **tuberías de abastecimiento** indican que la etapa determinante de los consumos energéticos y las emisiones de CO₂ para todas las tuberías es la etapa de uso de la tubería, en la que se han tenido en cuenta los consumos por bombeo durante el periodo de vida media asignado a todas las tuberías: 50 años. A continuación la etapa con una aportación más importante es la de extracción y suministro de materiales.

La tubería que presenta mejores resultados en este caso es la tubería de PVC biorientado DN110, seguida de la tubería de PVC convencional DN110 y la de PEHD DN125, que supone un consumo energético y unas emisiones de CO₂ del orden de un 1,4% y 0,4% mayores que el caso base (PVC convencional), respectivamente. El caso más desfavorable corresponde a tuberías de fundición dúctil sin uso de material reciclado, con un consumo de energía un 56% mayor y la emisión de un 51% más de CO₂.

Para las **tuberías de saneamiento** se observan los mejores resultados en términos de consumo energético y emisiones de CO₂ para la tubería que contiene un 80% de PP corrugado reciclado, 77 y 72% menores que para el caso de referencia (la tubería de PVC DN315 sin material reciclado). A continuación encontraríamos la tubería de PE corrugado con un 80% de material reciclado, seguida de la tubería de PVC con un 80% de material reciclado. Sin embargo, el comportamiento de las tuberías plásticas respecto a los indicadores ambientales considerados es muy similar.

Los valores de consumos energéticos y emisiones de CO₂ para las tuberías plásticas con material reciclado están muy próximos, reduciéndose entre un 72 y un 77% respecto de los valores obtenidos para la tubería de PVC sin uso de material reciclado. En orden creciente de consumos energéticos y emisiones de CO₂ asociadas encontramos las tuberías de PP corrugado sin material reciclado y de PE corrugado sin material reciclado, las tuberías de PVC biorientado DN315 y las de PVC DN315 sin material reciclado y, por último, las tuberías de hormigón DN400, que suponen un consumo energético un 32% mayor y unas emisiones de CO₂ un 68% mayores que para el caso del PVC.

Se ha de tener en cuenta que aunque actualmente el uso de PVC reciclado en la fabricación de tuberías de PVC biorientado no es habitual, sí se trata de un material 100% reciclable cuya reutilización se presenta como probable en un futuro. La introducción de material reciclado en la fabricación de este tipo de tuberías produciría una reducción del consumo energético en lo que respecta a la extracción y suministro de materiales. En el caso de tuberías para saneamiento se ha visto que esta etapa es determinante en lo que respecta al consumo energético y las emisiones de CO₂, con lo que la introducción de

material reciclado en su fabricación, unido al bajo peso específico del material, podría dar lugar a cambios significativos en los resultados.

7. Referencias

- 1 APME, 2004. Association of Plastics Manufacturers in Europe, (<http://www.apme.org/>, octubre de 2004).
- 2 Asensio, F., 1992. Biblioteca ATRIUM de las Instalaciones. Agua. Tomos 1 y 3. Barcelona. Océano Centrum.
- 3 Baird, G., *et al.*, 1997. The energy embodied in building materials -updated New Zealand coefficients and their significance. IPENZ Transactions, vol 24. n°1/CE.1997. pp. 51-54.
- 4 Baldasano, J.M., Parra, R., 2005. Estimación del consumo energético y de la emisión de CO₂ asociados a la producción unitaria de PVC. Estudio de la planta de Hispavic - Vinilis en Martorell (España).
- 5 Choate, A. , Ferland, H., 2004. Waste Management and Energy Savings: Benefits by the Numbers. U.S. EPA (<http://yosemite.epa.gov>, diciembre de 2004).
- 6 ECO PROFILES of the European plastics industry, 2003. APME (Association of Plastics Manufacturers (PlasticsEurope)), Brussels.
- 7 EPA, 2004. About Brefs. Environmental Protection Agency (<http://www.epa.ie/Licensing/IPPCLicensing/BREFDocuments/>, diciembre de 2004)
- 8 Fernández, M., 1989. Hormigón. Revista de obras públicas. E. T. S. Ingenieros de Caminos.
- 9 Hernández, A., 2000. Abastecimiento y distribución de agua. Servicio de Publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. Paraninfo Thomson Learning, Madrid, 914 pp.
- 10 IPCC, 1996. *Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Ginebra, Suiza.
- 11 Krähling, H., Spindler, J., 2005. Sustainable pipeline systems. The life cycle perspective (www.vinnolit.de/neu/PipesustainSystems.pdf, abril 2005).
- 12 MOPU, 1974. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para tuberías de abastecimiento de Agua. Orden del Ministerio de Obras Públicas de 28 de Julio de 1974.
- 13 MOPU, 1986. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para tuberías de Saneamiento de Poblaciones. Orden del Ministerio de Obras Públicas de 15 de Septiembre de 1986.
- 14 Pipelife, 2005. Documentación técnica del PVC biorientado. (http://www.pipelife.com/web/es_new/t2w_es.nsf, Noviembre 2005)

15 WEC, 2004. Total Energy Use Characteristics, del Global Transport and Energy Development: The Scope for Change, WEC (<http://www.worldenergy.org>, diciembre de 2004)

8. Anexo 1. Consumo energético y emisiones de CO₂ asociadas en caso de considerar procesos de reciclado y disposición final de tuberías.

Como se ha comentado a lo largo del documento en la actualidad no es habitual desenterrar las tuberías enterradas para proceder a su desconstrucción, reciclado o disposición final.

Debido a que este tipo de operaciones sí se llevan a cabo en tuberías instaladas al aire y a que puede que en un futuro la práctica habitual cambie y se proceda al desenterramiento de tuberías, se ha querido complementar el presente estudio suponiendo que las etapas de desconstrucción, reciclado y disposición final de residuos tienen lugar. (ver Figura 3.1. Esquema del ciclo de vida teórico de una tubería)

8.1. La desconstrucción

Esta actividad, que se entiende como el desmantelamiento de la tubería con la intención de aprovechar al máximo los materiales mediante reciclaje, podría demandar solamente mano de obra y tal vez un bajo consumo energético. Se asume que el consumo energético de esta fase no es relevante.

8.2. El reciclaje

Se asume que un 97% del PVC, del PEHD, del PP corrugado, del PE corrugado y de la fundición dúctil es reciclable. El restante 3% constituyen residuos que se depositan en vertedero. En el caso del hormigón se considera que se lleva en su totalidad a vertedero.

Para el reciclaje del PVC, el polietileno y el polipropileno se utiliza un consumo eléctrico de 0,25 kWh kg⁻¹. Para el reciclaje de la fundición se toma como referencia el valor para el acero, que supone un consumo eléctrico de 5,03 kWh kg⁻¹ (EPA, 2004), correspondiente al consumo energético para la fundición de acero, que indica el BREF europeo.

8.3. La disposición final

Se asume un consumo energético de 0,155 kWh por cada kg de residuo depositado en vertedero (Choate and Ferland, 2004). Se considera que la energía proviene en un 100% de gasóleo.

8.4. Resultados y discusión.

Las Tablas 8.1 a la 8.13 y las Figuras 8.1 a 8.13 presentan los resultados obtenidos para cada una de las etapas del ciclo de vida teórico de tuberías, en cuanto a consumos energéticos y a emisiones de CO₂. Estos resultados se presentan de forma resumida en las tablas 8.14 a 8.18.

Tabla 8.1. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **PVC para abastecimiento de 110 mm** de diámetro nominal (**sin uso de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales para el PVC	56,7	5,4	16,1	3,6
Transporte de materiales hasta la planta de producción	0,6	0,1	0,2	0,0
Producción de tubería de PVC	3,6	0,3	1,6	0,4
Transporte de tubería para su instalación	0,6	0,1	0,2	0,0
Uso de tubería (50 años)	979,8	93,9	433,9	95,8
Transporte de tubería para reciclado	0,6	0,1	0,2	0,0
Reciclaje	1,9	0,2	0,9	0,2
Transporte para disposición final en vertedero	0,03	0,0	0,01	0,0
Disposición final en vertedero	0,1	0,0	0,02	0,0
TOTAL	1043,9	100,0	453,0	100,0

Tabla 8.2 Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **PVC biorientado para abastecimiento de 110 mm** de diámetro nominal (**sin uso de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales para el PVC	23,9	2,9	6,8	1,9
Transporte de materiales hasta la planta de producción	0,2	0,0	0,1	0,0
Producción de tubería de PVC	2,7	0,3	1,2	0,3
Transporte de tubería para su instalación	0,2	0,0	0,1	0,0
Uso de tubería (50 años)	800,9	96,6	354,7	97,6
Transporte de tubería para reciclado	0,2	0,0	0,1	0,0
Reciclaje	0,8	0,1	0,4	0,1
Transporte para disposición final en vertedero	0,01	0,0	0,00	0,0
Disposición final en vertedero	0,03	0,0	0,01	0,0
TOTAL	829,1	100,0	363,2	100,0

Tabla 8.3. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **fundición dúctil para abastecimiento de 125 mm** de diámetro nominal (**sin utilización de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	390,6	23,8	138,1	20,0
Transporte de materiales hasta la planta de producción	4,7	0,3	1,3	0,2
Producción de tubería de fundición	29,1	1,8	12,9	1,9
Transporte de tubería para su instalación	4,7	0,3	1,3	0,2
Uso de tubería (50 años)	1191,2	72,6	527,5	76,6
Transporte de tubería para reciclado	4,7	0,3	1,3	0,2
Reciclaje	13,8	0,8	6,1	0,9
Transporte para disposición final en vertedero	0,7	0,0	0,2	0,0
Disposición final en vertedero	1,5	0,1	0,4	0,1
TOTAL	1641,1	100,0	689,0	100,0

Tabla 8.4. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **fundición dúctil para abastecimiento de 125 mm** de diámetro nominal (utilizando un **80% de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	86,3	6,5	38,2	6,5
Transporte de materiales hasta la planta de producción	4,7	0,4	1,3	0,2
Producción de tubería de fundición	29,1	2,2	12,9	2,2
Transporte de tubería para su instalación	4,7	0,4	1,3	0,2
Uso de tubería (50 años)	1191,2	89,1	527,5	89,5
Transporte de tubería para reciclado	4,7	0,4	1,3	0,2
Reciclaje	13,8	1,0	6,1	1,0
Transporte para disposición final en vertedero	0,7	0,1	0,2	0,0
Disposición final en vertedero	1,5	0,1	0,4	0,1
TOTAL	1336,8	100,0	589,1	100,0

Tabla 8.5. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **PEHD para abastecimiento de 125 mm** de diámetro nominal (**sin uso de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	71,5	6,8	18,4	4,0
Transporte de materiales hasta la planta de producción	0,8	0,1	0,2	0,0
Producción de tubería de PEHD	9,2	0,9	4,1	0,9
Transporte de tubería para su instalación	0,8	0,1	0,2	0,0
Instalación de tubería (termosoldado del PEHD)	0,2	0,0	0,1	0,0
Uso de tubería (50 años)	972,6	91,9	430,7	94,6
Transporte de tubería para reciclado	0,8	0,1	0,2	0,0
Reciclaje	2,8	0,3	1,2	0,3
Transporte para disposición final en vertedero	0,03	0,0	0,01	0,0
Disposición final en vertedero	0,05	0,0	0,01	0,0
TOTAL	1058,9	100,0	455,2	100,0

Tabla 8.6. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **PVC para saneamiento de 315 mm** de diámetro nominal (**sin uso de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales para el PVC	241,6	88,4	68,7	84,4
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,5	0,9	0,7	0,8
Producción de tubería de PVC	15,6	5,7	6,9	8,5
Transporte de tubería para su instalación	2,5	0,9	0,7	0,8
Transporte de tubería para reciclado	2,5	0,9	0,7	0,8
Reciclaje	8,2	3,0	3,6	4,5
Transporte para disposición final en vertedero	0,1	0,0	0,03	0,0
Disposición final en vertedero	0,3	0,1	0,1	0,1
TOTAL	273,4	100,0	81,3	100,0

Tabla 8.7. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **PVC para saneamiento de 315 mm de diámetro nominal** (con un **80% de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales para el PVC	48,4	60,4	13,8	52,1
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,5	3,2	0,7	2,5
Producción de tubería de PVC	15,6	19,4	6,9	26,1
Transporte de tubería para su instalación	2,5	3,2	0,7	2,5
Transporte de tubería para reciclado	2,5	3,2	0,7	2,5
Reciclaje	8,2	10,2	3,6	13,8
Transporte para disposición final en vertedero	0,1	0,2	0,03	0,1
Disposición final en vertedero	0,3	0,3	0,1	0,3
TOTAL	80,1	100,0	26,4	100,0

Tabla 8.8. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **PVC biorientado para saneamiento de 315 mm de diámetro nominal** (sin material reciclado).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales para el PVC	196,8	84,6	55,9	79,2
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,1	0,9	0,5	0,8
Producción de tubería de PVC	22,5	9,7	10,0	14,1
Transporte de tubería para su instalación	2,1	0,9	0,5	0,8
Transporte de tubería para reciclado	2,1	0,9	0,5	0,8
Reciclaje	6,7	2,9	3,0	4,2
Transporte para disposición final en vertedero	0,1	0,0	0,03	0,0
Disposición final en vertedero	0,2	0,1	0,1	0,1
TOTAL	232,5	100,0	70,6	100,0

Tabla 8.9. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **PE corrugado para saneamiento de 400 mm** de diámetro nominal (**sin utilización de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	183,2	83,1	47,0	75,4
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,1	1,0	0,6	0,9
Producción de tubería de PE corrugado	23,5	10,7	10,4	16,7
Transporte de tubería para su instalación	2,1	1,0	0,6	0,9
Transporte de tubería para reciclado	2,1	1,0	0,6	0,9
Reciclaje	7,1	3,2	3,2	5,1
Transporte para disposición final en vertedero	0,1	0,0	0,02	0,0
Disposición final en vertedero	0,1	0,1	0,04	0,1
TOTAL	220,5	100,0	62,4	100,0

Tabla 8.10. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **PE corrugado para saneamiento de 400 mm** de diámetro nominal (con un **80% de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	36,6	49,6	9,4	38,0
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,1	2,9	0,6	2,3
Producción de tubería de PE corrugado	23,5	31,8	10,4	42,1
Transporte de tubería para su instalación	2,1	2,9	0,6	2,3
Transporte de tubería para reciclado	2,1	2,9	0,6	2,3
Reciclaje	7,1	9,6	3,2	12,8
Transporte para disposición final en vertedero	0,1	0,1	0,02	0,1
Disposición final en vertedero	0,1	0,2	0,04	0,1
TOTAL	73,9	100,0	24,8	100,0

Tabla 8.11. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **PP corrugado para saneamiento de 400 mm** de diámetro nominal (**sin uso de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	163,2	81,4	50,0	76,5
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,1	1,1	0,6	0,9
Producción de tubería de PP corrugado	23,5	11,7	10,4	15,9
Transporte de tubería para su instalación	2,1	1,1	0,6	0,9
Transporte de tubería para reciclado	2,1	1,1	0,6	0,9
Reciclaje	7,1	3,6	3,2	4,8
Transporte para disposición final en vertedero	0,1	0,0	0,02	0,0
Disposición final en vertedero	0,1	0,1	0,04	0,1
TOTAL	200,5	100,0	65,3	100,0

Tabla 8.12. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **PP corrugado para saneamiento de 400 mm** de diámetro nominal (con un **80% de material reciclado**).

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	32,6	46,7	10,0	39,4
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,1	3,1	0,6	2,3
Producción de tubería de PP corrugado	23,5	33,6	10,4	41,1
Transporte de tubería para su instalación	2,1	3,1	0,6	2,3
Transporte de tubería para reciclado	2,1	3,1	0,6	2,3
Reciclaje	7,1	10,2	3,2	12,5
Transporte para disposición final en vertedero	0,1	0,1	0,02	0,1
Disposición final en vertedero	0,1	0,2	0,0	0,1
TOTAL	69,9	100,0	25,3	100,0

Tabla 8.13. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de 3 m de tubería de **hormigón para saneamiento de 400 mm** de diámetro nominal.

	Consumo de energía		Emisión CO ₂	
	kWh	%	kg	%
Extracción y suministro de materiales	105,1	24,1	33,6	21,8
Transporte de materiales hasta la planta de producción	29,4	6,7	7,8	5,1
Producción de tubería de PP corrugado	181,1	41,5	80,2	52,1
Transporte de tubería para su instalación	29,4	6,7	7,8	5,1
Transporte para disposición final en vertedero	29,4	6,7	7,8	5,1
Disposición final en vertedero	62,5	14,3	16,7	10,8
TOTAL	436,9	100,0	153,9	100,0

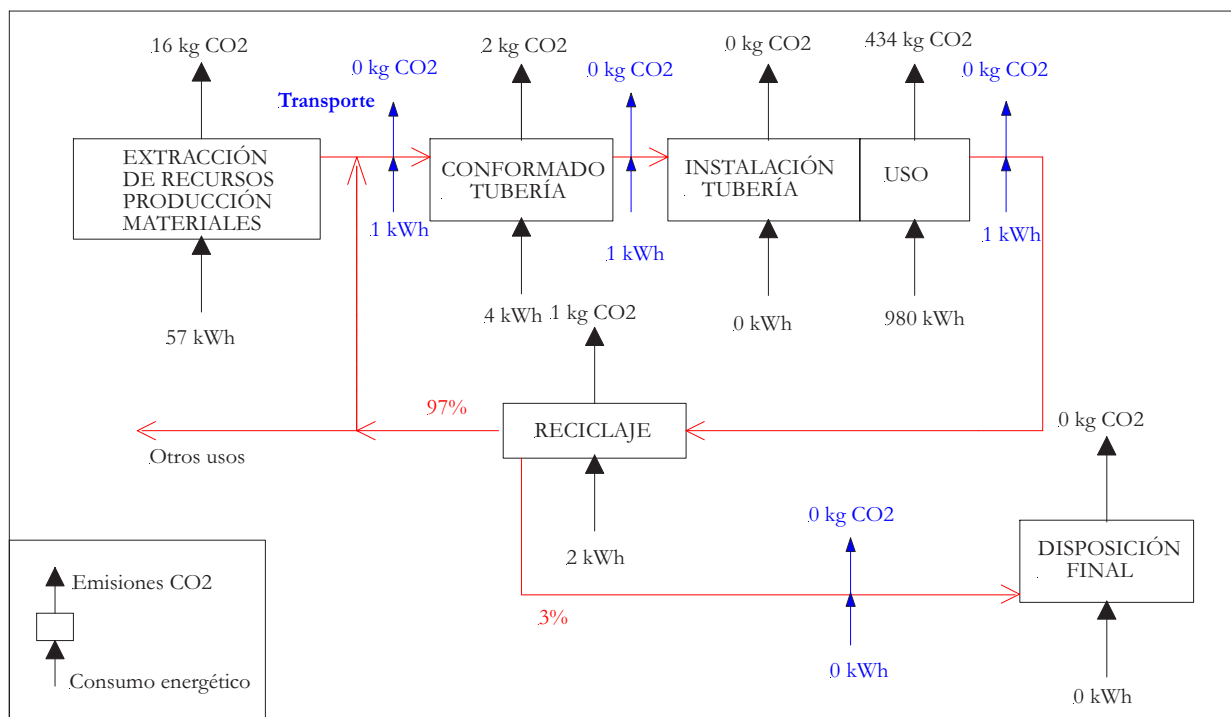


Figura 8.1. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PVC DN110** para abastecimiento (**sin utilizar PVC reciclado**).

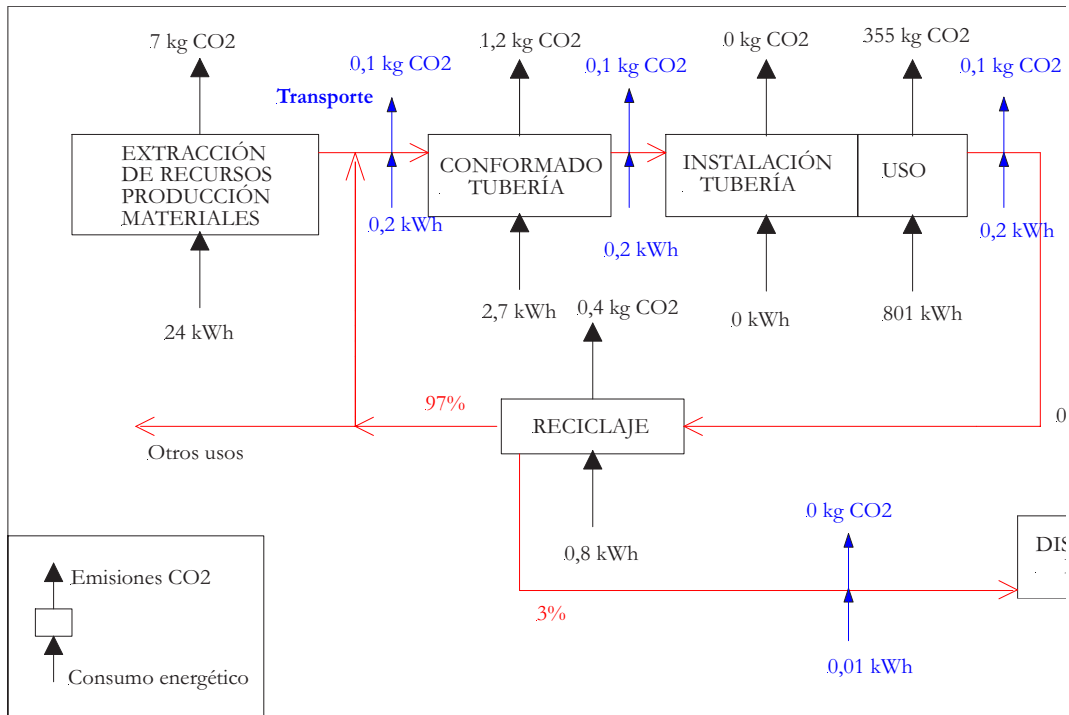


Figura 8.2. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PVC biorientado DN110** para abastecimiento (sin utilizar PVC reciclado).

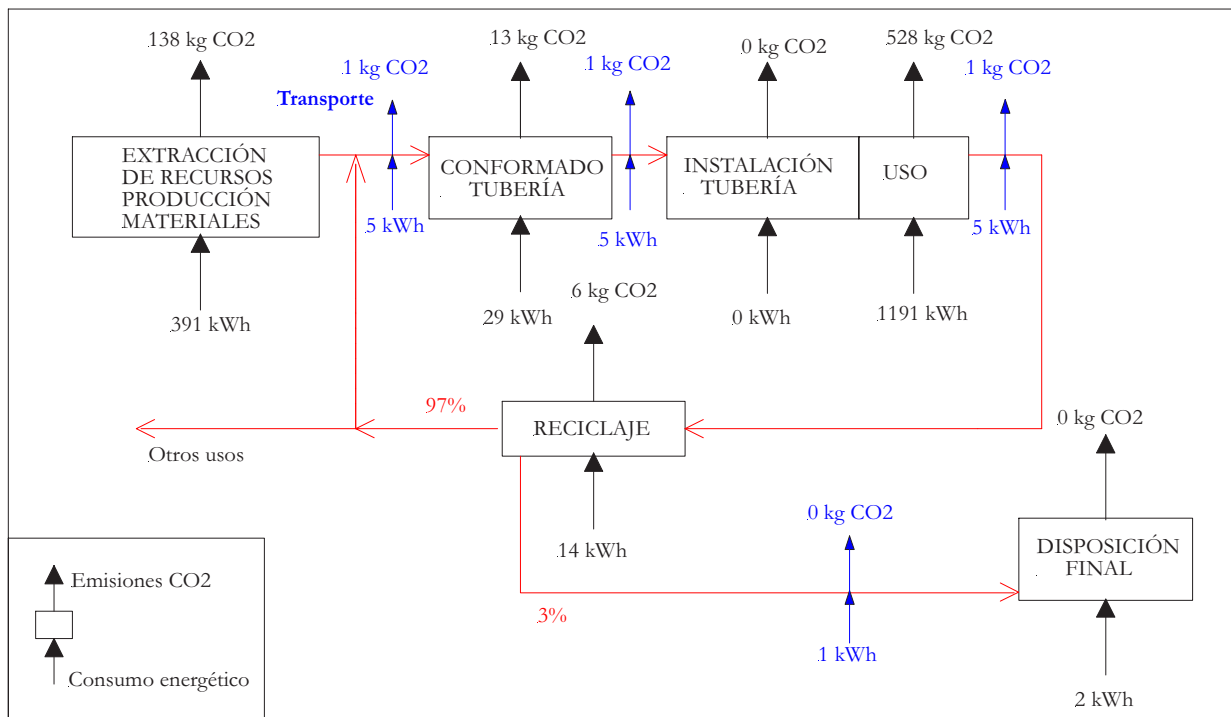


Figura 8.3. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de fundición**

dúctil DN125 para abastecimiento (sin utilizar fundición reciclada).

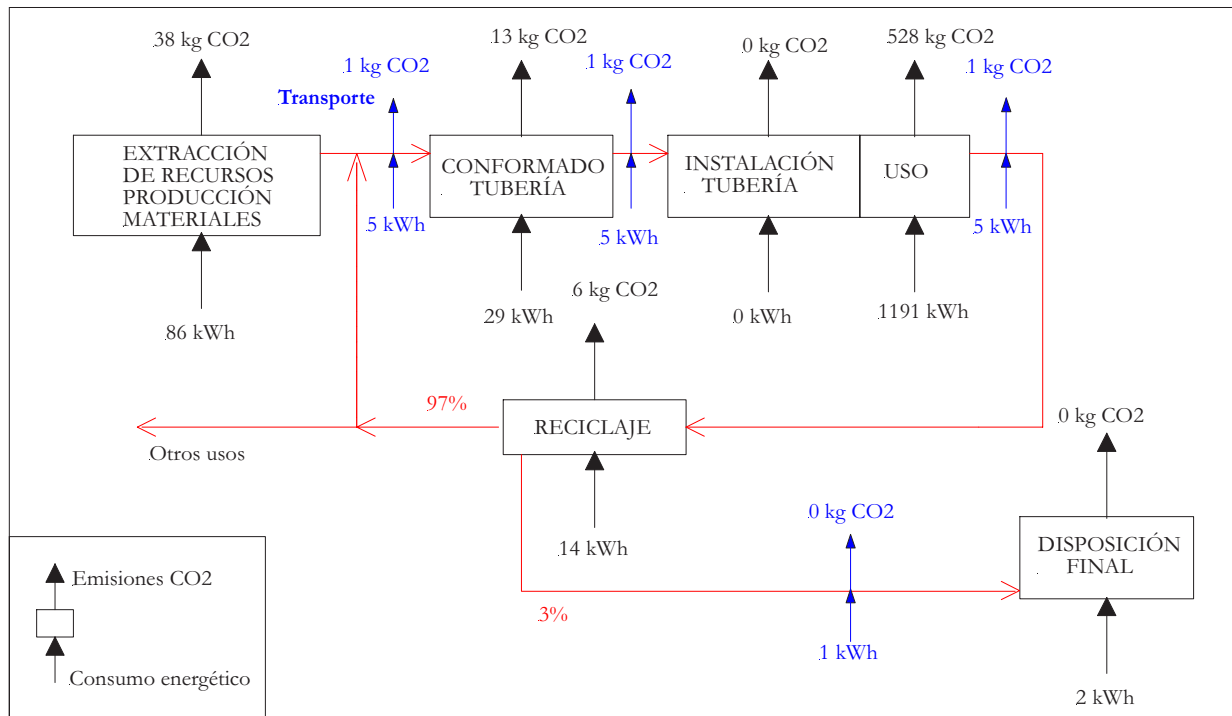


Figura 8.4. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de fundición dúctil DN125 para abastecimiento (con un 80% de fundición reciclada).**

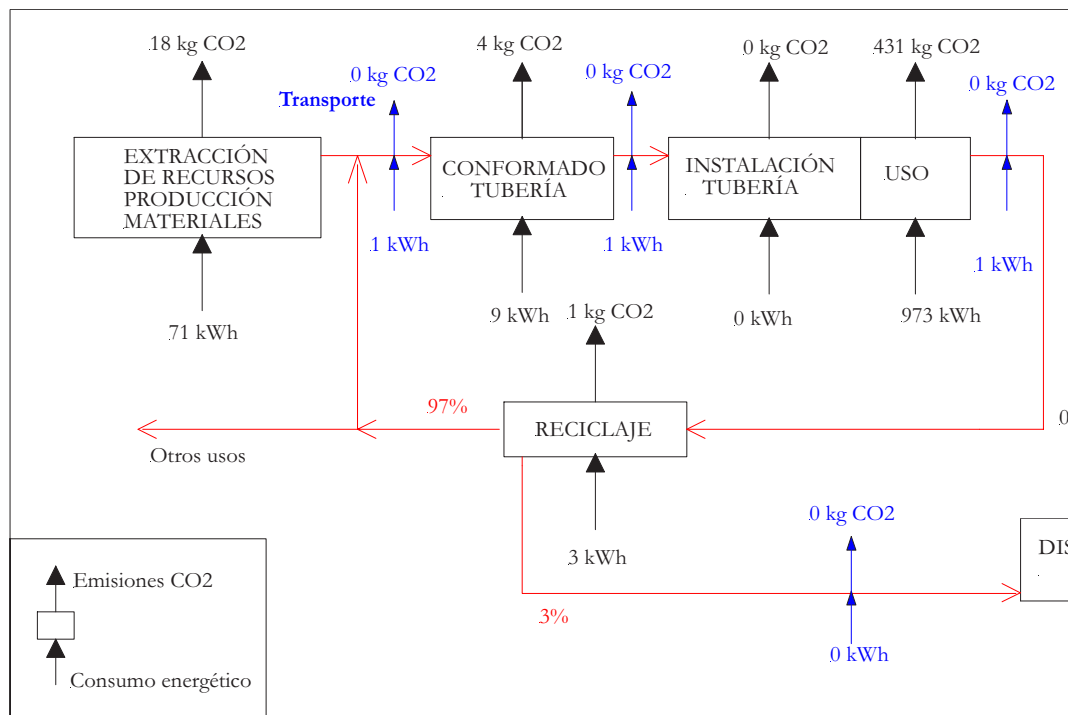


Figura 8.5. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PEHD DN125** para abastecimiento (**sin uso de PEHD reciclado**).

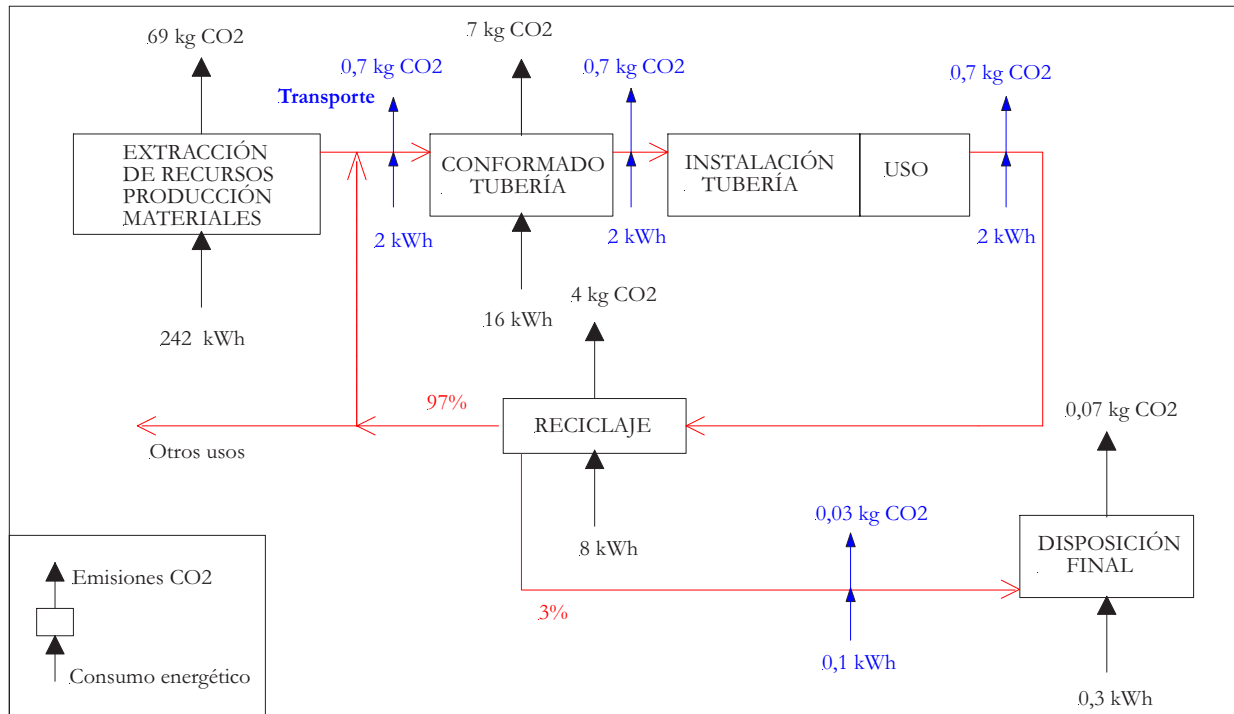


Figura 8.6. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PVC DN315** para saneamiento (**sin uso de PVC reciclado**).

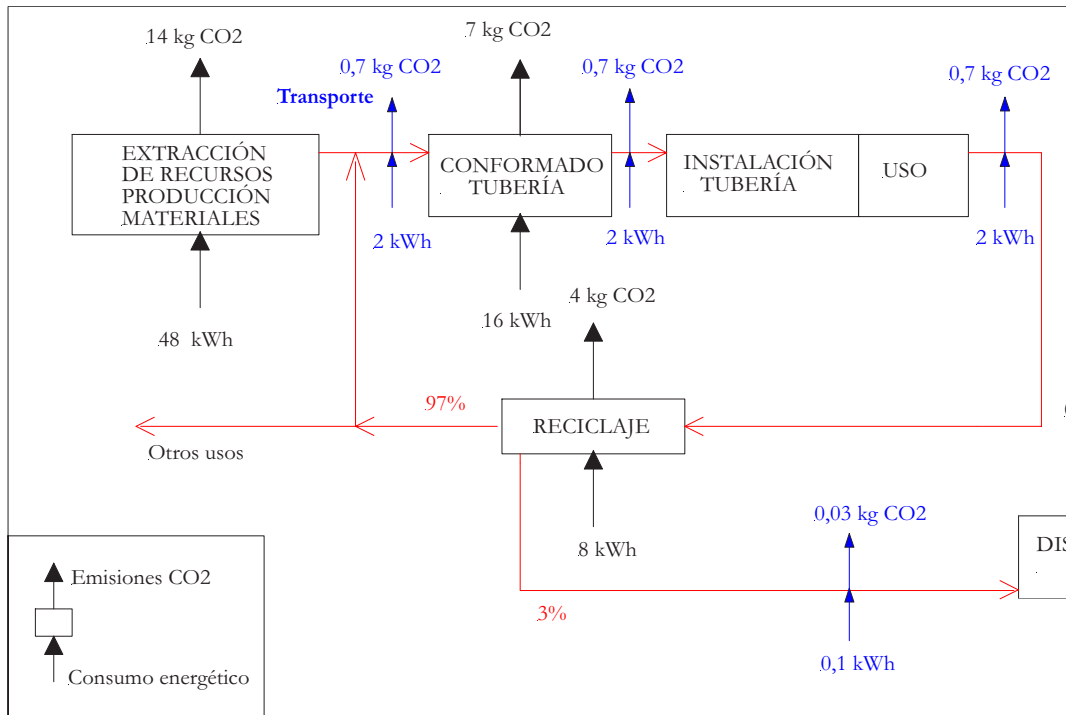


Figura 8.7. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PVC DN315** para saneamiento (con un **80% de PVC reciclado**).

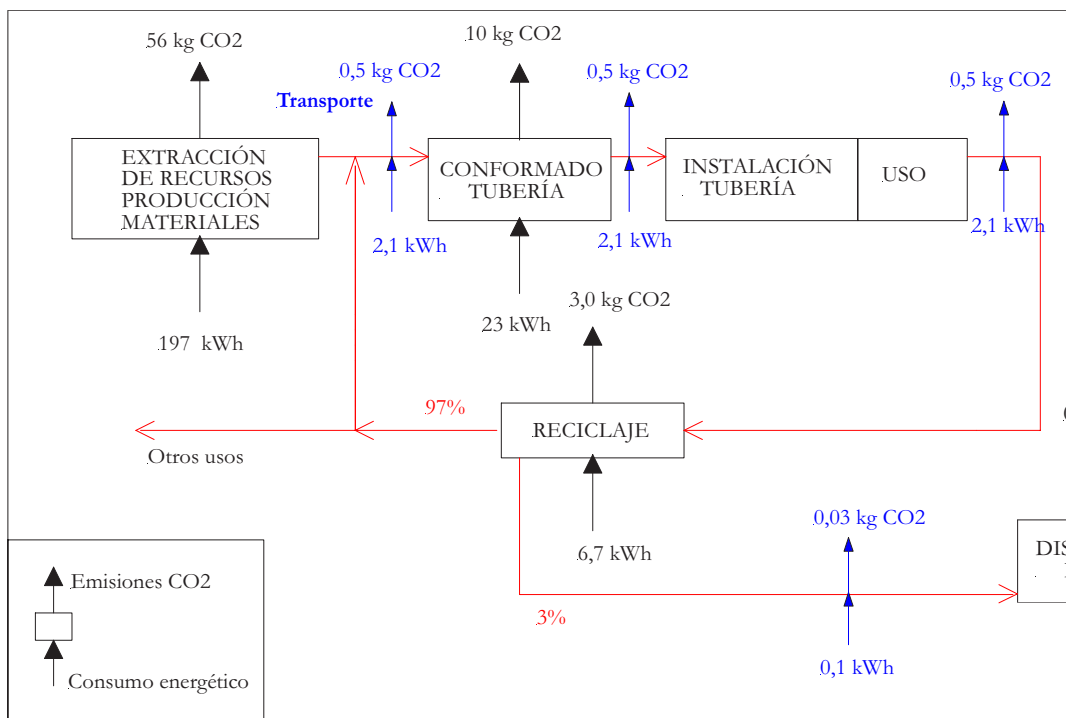


Figura 8.8. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PVC biorientado DN315** para saneamiento (**sin uso de PVC reciclado**).

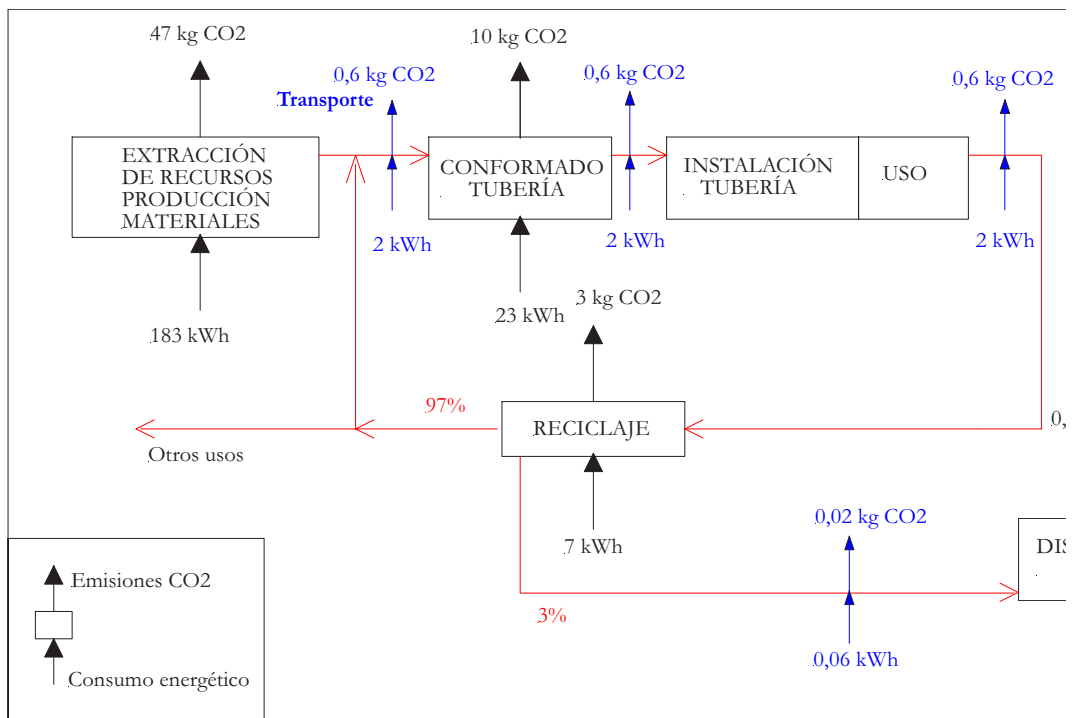


Figura 8.9. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PE corrugado DN400** para saneamiento (sin utilización de material reciclado).

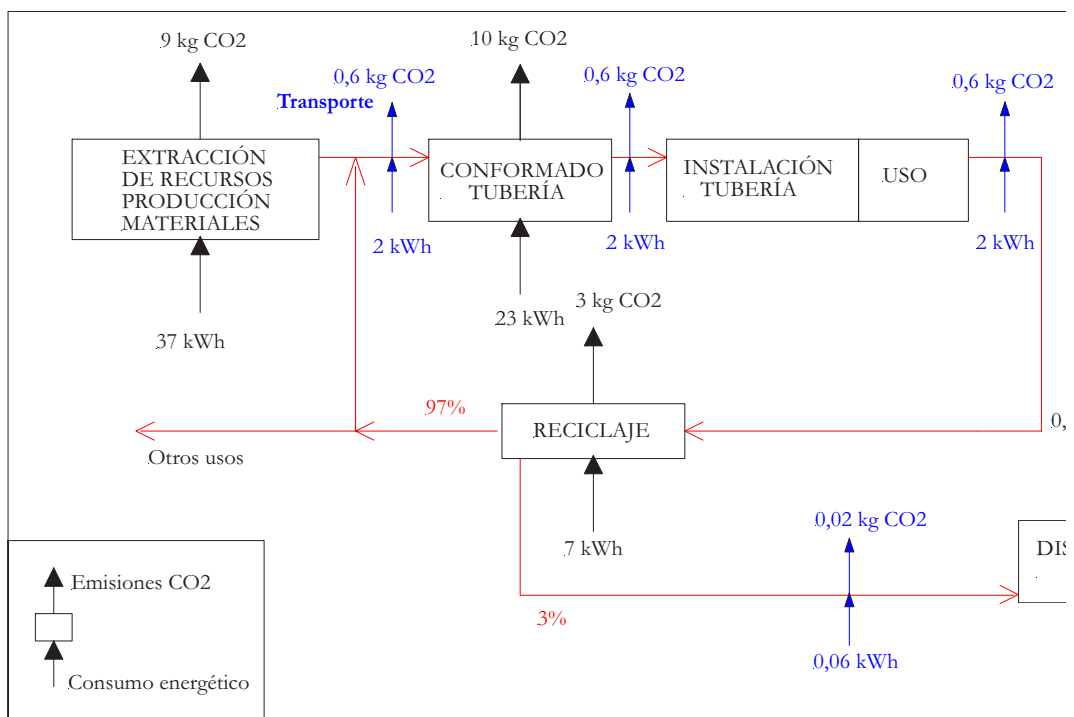


Figura 8.10. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PE corrugado DN400** para saneamiento (con un **80% de material reciclado**.)

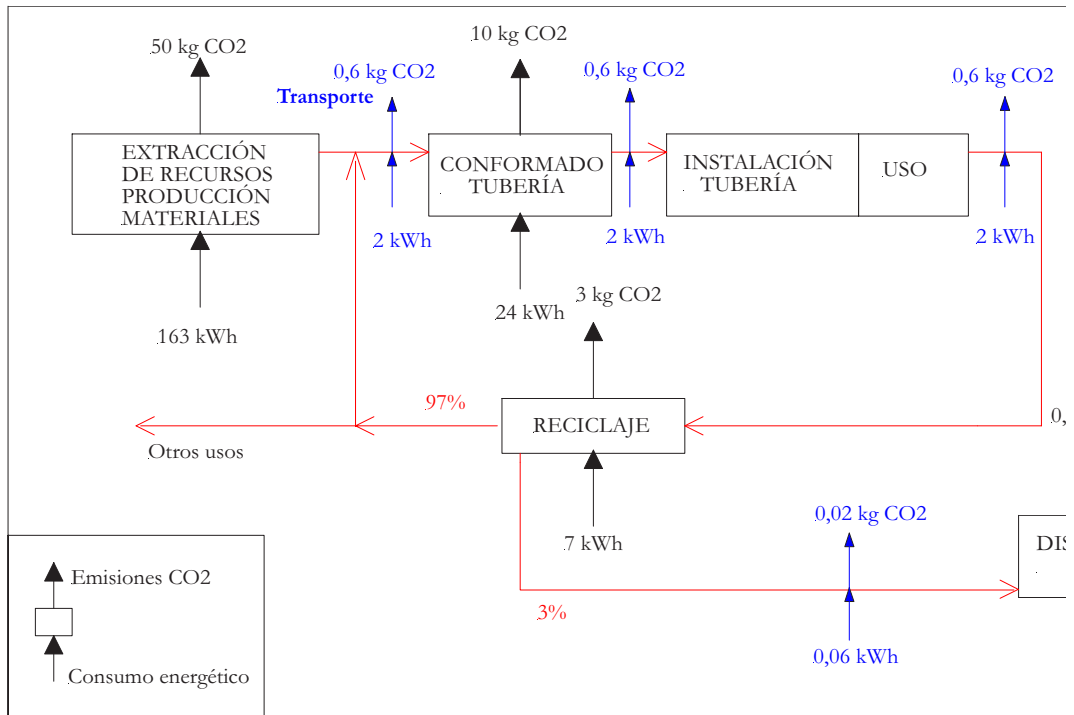


Figura 8.11. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PP corrugado DN400** para saneamiento (sin utilización de material reciclado).

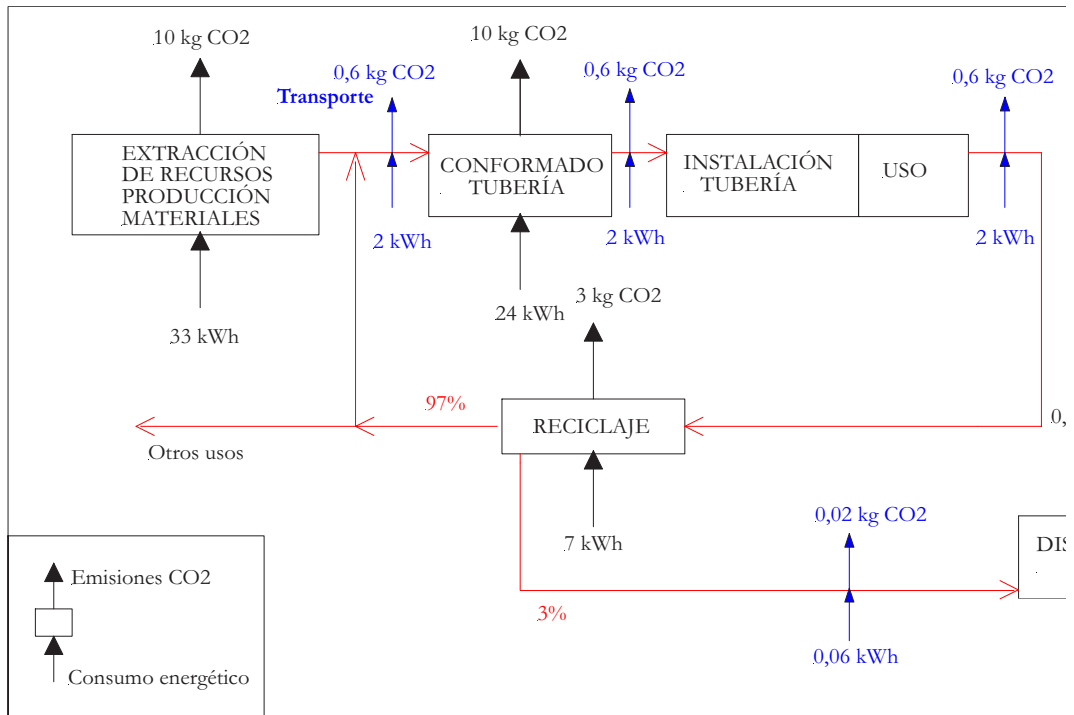


Figura 8.12. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de **3 m de tubería de PP corrugado DN400** para saneamiento (con un **80% de material reciclado**).

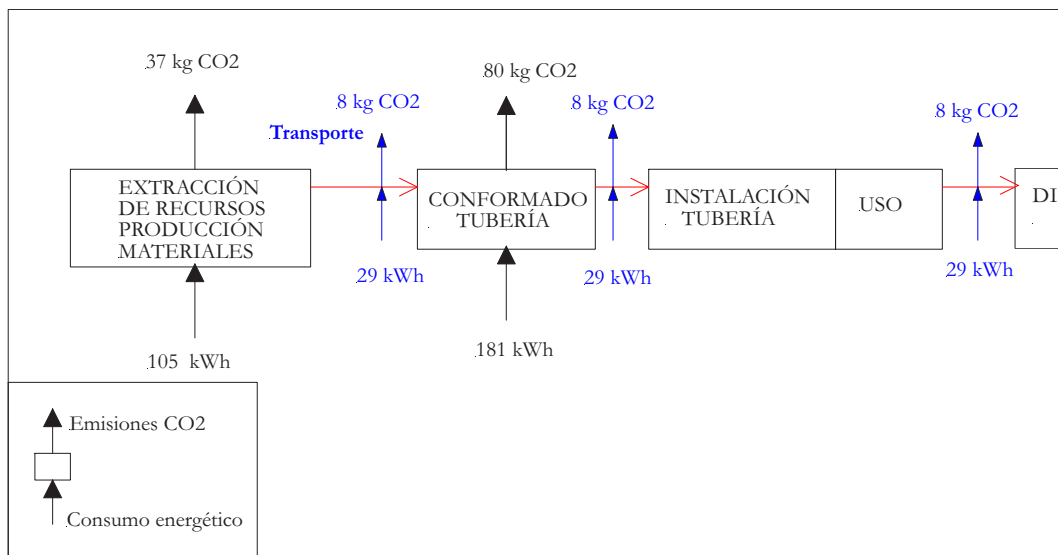


Figura 8.13. Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso y disposición final de residuos de **3 m de tubería de hormigón DN400** para saneamiento.

Tabla 8.14. Consumo de energía y emisiones de CO₂ atribuible a la producción y uso (50 años) de tuberías fabricadas con diferentes materiales considerando procesos de desconstrucción, reciclado y disposición final de materiales.
Resumen.

Base de cálculo: 3 m de tubería sin accesorios (Material reciclado % peso)	DN	Peso tubería	v	Coef. Hazen Williams	Consumo energético	Emisiones CO ₂	Variación Consumo Energético Respecto Caso Base	Variación Emisiones CO ₂ Respecto Caso Base
	mm	kg m ⁻¹	m s ⁻¹		kWh	kg CO ₂	%	%
TUBERÍAS DE ABASTECIMIENTO								
PVC biorientado	110	1,1	1,4	--(1)	829,1	363,2	-20,58	-19,81
PVC	110	2,7	1,5	150	1043,9	453,0	0,00	0,00
PEHD	125	3,8	1,4	140	1058,9	455,2	1,43	0,48
Fundición hierro (80% material reciclado)	125	21,6	0,9	100 (2)	1336,8	589,1	28,06	30,05
Fundición hierro	125	21,6	0,9	100 (2)	1641,1	689,0	57,20	52,10
TUBERÍAS DE SANEAMIENTO								
PP corrugado (80% material reciclado)	400	9,8	3,8	-	69,9	25,3	-74,42	-68,84
PE corrugado (80% material reciclado)	400	9,8	3,8	-	73,9	24,8	-72,96	-69,57
PVC (80% material reciclado)	315	11,5	5,0	-	80,1	26,4	-70,68	-67,51
PP corrugado	400	9,8	3,8	-	200,5	65,3	-26,67	-19,68
PE corrugado	400	9,8	3,8	-	220,5	62,4	-19,36	-23,30
PVC biorientado	315	10,4	5,0	-	232,5	70,6	-14,96	-13,20
PVC	315	11,5	5,0	-	273,4	81,3	0,00	0,00
Hormigón	400	134,1	2,8		436,9	153,9	59,81	89,28

(1). Para calcular las pérdidas de carga en la tubería a lo largo de 50 años se ha utilizado la correlación de Prandtl-Colebrook-White (Pipelife, 2005).

(2) Valor considerado para tubería nueva.

Tabla 8.15. Consumo de energía estimado para cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de abastecimiento de diferentes materiales. Referidos a tramos de 3 m de tubería.

3 m de tubería de abastecimiento	Consumo de energía (kWh)				
	PVC DN110	PVC biorientado DN110	PEHD DN125	Fundición de hierro DN125	Fundición de hierro DN125 con 80% material reciclado
Extracción y suministro de materiales	56,7	23,9	71,5	390,6	86,3
Transporte de materiales hasta la planta de producción	0,6	0,2	0,8	4,7	4,7
Producción de tubería	3,6	2,7	9,2	29,1	29,1
Transporte de tubería para su instalación	0,6	0,2	0,8	4,7	4,7
Instalación	despreciable	despreciable	0,2	despreciable	despreciable
Uso tubería (50 años)	979,8	800,9	972,6	1191,2	1191,2
Transporte de tubería para reciclado	0,6	0,2	0,8	4,7	4,7
Reciclaje	1,9	0,8	2,8	13,8	13,8
Transporte para disposición final en vertedero	0,0	0,01	0,0	0,7	0,7
Disposición final en vertedero	0,1	0,03	0,1	1,5	1,5
TOTAL	1043,9	829,1	1058,9	1641,1	1336,8

Tabla 8.16. Consumo de energía estimado para cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de saneamiento de diferentes materiales. Referidos a tramos de 3 m de tubería.

3 m de tubería de saneamiento	Consumo de energía (kWh)							
	PVC DN315	PVC DN315 80% material reciclado	PVC biorientado DN315	Hormigón DN400	PEHD DN400	PEHD DN400 80% de material reciclado	PP corrugado DN 400	PP corrugado DN400 80% de material reciclado
Extracción y suministro de materiales	241,6	48,4	196,8	105,1	183,2	36,6	163,2	32,6
Transporte de materiales hasta la planta de producción	2,5	2,5	2,1	29,4	2,1	2,1	2,1	2,1
Producción de tubería	15,6	15,6	22,5	181,1	23,5	23,5	23,5	23,5
Transporte de tubería para su instalación	2,5	2,5	2,1	29,4	2,1	2,1	2,1	2,1
Transporte de tubería para reciclado	2,5	2,5	2,1	--	2,1	2,1	2,1	2,1
Reciclaje	8,2	8,2	6,7	--	7,1	7,1	7,1	7,1
Transporte para disposición final en vertedero	0,1	0,1	0,1	29,4	0,1	0,1	0,1	0,1
Disposición final en vertedero	0,3	0,3	0,2	62,5	0,1	0,1	0,1	0,1
TOTAL	273,4	80,1	232,5	436,9	220,5	73,9	200,5	69,9

Tabla 8.17. Emisiones de CO₂ estimadas para cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de abastecimiento de diferentes materiales. Referidas a tramos de 3 m de tubería.

3 m de tubería de abastecimiento	Emisiones de CO ₂ (kg CO ₂)				
	PVC DN110	PVC biorientado DN110	PEHD DN125	Fundición de hierro DN125	Fundición de hierro DN125 con 80% material reciclado
Extracción y suministro de materiales	16,1	6,8	18,4	138,1	38,2
Transporte de materiales hasta la planta de producción	0,2	0,1	0,2	1,3	1,3
Producción de tubería	1,6	1,2	4,1	12,9	12,9
Transporte de tubería para su instalación	0,2	0,1	0,2	1,3	1,3
Instalación	despreciable	despreciable	0,1	despreciable	despreciable
Uso tubería (50 años)	433,9	354,7	430,7	527,5	527,5
Transporte de tubería para reciclado	0,2	0,1	0,2	1,3	1,3
Reciclaje	0,9	0,4	1,2	6,1	6,1
Transporte para disposición final en vertedero	0,0	0,00	0,0	0,2	0,2
Disposición final en vertedero	0,0	0,01	0,0	0,4	0,4
TOTAL	453,0	363,2	455,2	689,0	589,1

Tabla 8.18. Emisiones de CO₂ estimadas para cada una de las etapas del ciclo de vida de tuberías de saneamiento de diferentes materiales. Referidas a tramos de 3 m de tubería.

3 m de tubería de saneamiento	Emisiones de CO ₂ (kg CO ₂)							
	PVC DN315	PVC DN315 80% material reciclado	PVC biorientado DN315	Hormigón DN400	PEHD DN400	PEHD DN400 80% de material reciclado	PP corrugado DN 400	PP corrugado DN400 80% de material reciclado
Extracción y suministro de materiales	68,7	13,8	55,9	33,6	47,0	9,4	50,0	10,0
Transporte de materiales hasta la planta de producción	0,7	0,7	0,5	7,8	0,6	0,6	0,6	0,6
Producción de tubería	6,9	6,9	10,0	80,2	10,4	10,4	10,4	10,4
Transporte de tubería para su instalación	0,7	0,7	0,5	7,8	0,6	0,6	0,6	0,6
Transporte de tubería para reciclado	0,7	0,7	0,5	--	0,6	0,6	0,6	0,6
Reciclaje	3,6	3,6	3,0	--	3,2	3,2	3,2	3,2
Transporte para disposición final en vertedero	0,0	0,0	0,0	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Disposición final en vertedero	0,1	0,1	0,1	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	81,3	26,4	70,6	153,9	62,4	24,8	65,3	25,3

8.5. Conclusiones

El hecho de considerar los procesos de desenterramiento de tuberías, reciclado en los casos en que es posible y disposición final en vertedero no invierte el orden en cuanto a importancia de las emisiones de CO₂ y consumos de energía de las tuberías.

Es decir, en abastecimiento aquella que proporciona mejores resultados sigue siendo la tubería de PVC biorientado DN110, que presenta un consumo de energía y unas emisiones de CO₂ un 20% menor que el caso base (PVC convencional DN110).

A continuación se encuentran la tubería de PVC DN110 y la tubería de PEHD DN125, esta última consume un 1,4% más de energía y emite un 0,5% más de CO₂ que la tubería de PVC tomada como base. Como caso más desfavorable aparece la tubería de fundición dúctil DN125, cuyo consumo energético es un 57,2% mayor.

En el caso de tuberías de saneamiento de nuevo el caso más favorable corresponde a la tubería de PP corrugado con un 80% de material reciclado. En general los materiales plásticos presentan mejores resultados que el hormigón, cuyo consumo energético y emisiones de CO₂ son del orden del 60% y el 90% mayores, respectivamente, que para la tubería de PVC DN315 tomada como base.