

GUÍA DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LA INDUSTRIA DE FUNDICIÓN

PRESENTACIÓN

En la actualidad la economía peruana se plantea y desarrolla mayormente bajo un modelo tradicional, que corresponde a lo que denominamos “economía lineal”, donde el crecimiento económico se basa en un esquema que implica producir, utilizar y tirar. Este modelo lineal tiene un impacto directo en la degradación de los ecosistemas, la pérdida de la biodiversidad, la intensificación de los efectos del cambio climático, y el aumento en la contaminación en el suelo, agua y aire, lo que representa un riesgo para el bienestar de las generaciones futuras.

Estas consecuencias ambientales, tiene un impacto directo en la economía, la escasez de los recursos que aumenta los costos de las materias primas, el aumento del riesgo en las inversiones por los escenarios climáticos, pero también los requisitos a los mercados internacionales que cada vez son más exigentes, requieren de una nueva mirada del modelo tradicional.

Es así como la economía circular se presenta como una oportunidad para el crecimiento, haciendo un uso eco eficiente de los recursos naturales, a partir del cambio en los patrones de producción y consumo, con un enfoque de transición justa y de aplicación efectiva en el territorio, para lo cual, es necesaria la participación de todos los actores de la economía.

La economía circular en el sector fundición supone la reducción de los costos de producción debido a un uso eficiente de los recursos, la reutilización y reciclaje de materias primas (como es el caso de la arena de moldeo y la chatarra), el uso eficiente de la energía, la reducción de las emisiones de CO₂ y ciertos contaminantes al ambiente, y la disminución de volúmenes de residuos para su disposición final. Asimismo, incentiva el uso de tecnologías limpias y promueve la innovación para la creación de nuevos productos y servicios, cada vez con mayores oportunidades de acceder a mercados más exigentes, lo que decanta en la mejora de la productividad y competitividad.

En el Perú, el sector de manufactura ha liderado los esfuerzos en la transición hacia una economía circular, conscientes que, para mejorar la productividad y competitividad de dicho sector, es necesario promover e implementar medidas para que los modelos de negocios actuales y los nuevos, incorporen a la economía circular como una estrategia empresarial, que les permite reducir los riesgos y maximizar las oportunidades.

Siendo así, la aplicación de la economía circular en las cadenas de valor productivas, debe ponerse en marcha desde una mirada amplia e integral, para que los beneficios económicos, ambientales y sociales sean efectivos. En ese sentido, los negocios vinculados con algunas o varias de las actividades de la cadena de valor del sector fundición, no deben dejar de considerar aspectos como la procedencia de sus materias primas e insumos, el flujo de materiales y energía de sus procesos, así como los impactos del consumo y post consumo de los bienes y servicios asociados.

El PRODUCE tiene la misión de promover el desarrollo de los agentes del sector productivo, fomentando la innovación, la calidad y sostenibilidad ambiental, contribuyendo a la competitividad del sector. En virtud de ello, el PRODUCE ha elaborado la presente *“Guía de economía circular para la industria de fundición”* como un aporte a las empresas de fundición, principalmente las micro, pequeñas y medianas empresas, a mejorar sus procesos y desempeño ambiental.

La guía que aquí se presenta, tiene el propósito de orientar la transición circular en los modelos de negocios existentes y alentar el desarrollo de nuevos negocios circulares, y pone a disposición 12 estrategias de economía circular, cada una de ellas precisa una serie de medidas que le permitirá al empresario la incorporación concreta de la economía circular en sus empresas, e incluye la descripción de casos nacionales e internacionales que ilustran de manera práctica dichas medidas.

CONTENIDO

PRESENTACIÓN	2
Índice de figuras	7
Índice de tablas	8
INTRODUCCIÓN	9
Ámbito de aplicación	10
Capítulo 1: Economía lineal versus economía circular	11
1.1. Economía lineal	11
1.2. Economía circular	13
1.2.1. Ciclo técnico y ciclo biológico	15
1.2.2. Contexto nacional de la industria de fundición	16
1.3. Enfoques para la aplicación de la economía circular	17
1.3.1. Enfoque de las 9R	18
1.3.2. Marco ReSOLVE	18
1.4. Importancia de transitar a modelos circulares	19
Capítulo 2: Cadena de valor y proceso productivo en el sector fundición	22
2.1. Cadena de valor del sector fundición	22
2.2. Proceso productivo	23
2.3. Servicios auxiliares	31
2.4. Indicadores energéticos	32
Capítulo 3: Estrategias y medidas de economía circular para la industria de fundición	33
3.1. Estrategia 1: Ecodiseño	37
Medida 1.1: Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para determinar las opciones de reducción del consumo de arena de fundición	37
Medida 1.2: Selección del horno más eficiente	43
Medida 1.3: Selección del calentador de cuchara más eficiente	47
Medida 1.4: Manejo ecoeficiente de aspectos ambientales	50
Medida 1.5: Control de calidad de la chatarra	55
3.2. Estrategia 2: Biodiseño	55
Medida 2.1: Recubrimientos de moldes y machos	55
Medida 2.2: Modelos y patrones impresos en 3D	56
Medida 2.3: Lubricantes y desmoldantes	56
3.3. Estrategia 3: Intercambio	56
3.3.1. Eficiencia energética	57
Medida 3.1: Mejora de la eficiencia térmica de hornos	57
Medida 3.2: Manejo de la demanda pico en hornos de inducción	62
Medida 3.3: Control y automatización del horno	63
Medida 3.4: Mejorar precalentamiento de cucharas	63
Medida 3.5: Combustión Oxy-Fuel en quemadores	64
Medida 3.6: Precalentamiento de chatarra	64
Medida 3.7: Precalentamiento del aire de combustión	65

Medida 3.8: Optimización del sistema de aire comprimido	68
Medida 3.9: Uso de motores eficientes	71
Medida 3.10: Uso de variadores de frecuencia	73
3.3.2. Reemplazo de energía	74
Medida 3.11: Reemplazo de montacargas Diesel/GLP por electricos	74
Medida 3.12: Aplicación de energía solar	76
3.3.3. Eficiencia de materiales	76
Medida 3.13: Minimización del consumo de resina y aglutinante	76
Medida 3.14: Recuperación mecánica de arena	78
Medida 3.15: Recuperación térmica de arena	79
Medida 3.16: Minimización de formación de escoria	80
Medida 3.17: Mejora del rendimiento de la fundición y reducción de la chatarra	80
3.4. Estrategia 4: Logística inversa	81
Medida 4.1: Recogida de chatarra	81
Medida 4.2: Retorno de embalajes y envases	81
Medida 4.3: Reparación y remanufactura	82
3.5. Estrategia 5: Simbiosis Industrial	82
Medida 5.1: Intercambio de residuos	82
Medida 5.2: Colaboración en investigación y desarrollo	83
3.6. Estrategia 6: Industria 4.0	83
Medida 6.1: Fundición a presión inteligente	83
Medida 6.2: Automatización de fundición mediante IA	84
Medida 6.3: Soluciones inteligentes para la cadena de suministro	84
Medida 6.4: Automatización de equipos de fundición	84
3.7. Estrategia 7: Uso compartido	85
Medida 7.1: Compartir maquinaria de fundición	85
Medida 7.2: Compartir recursos de logística	86
Medida 7.3: Alquiler conjunto de almacenes	86
3.8. Estrategia 8: Segundo uso	86
Medida 8.1: Reutilización de equipos	87
Medida 8.2: Venta de excedentes	87
3.9. Estrategia 9: Comunidades locales	87
Medida 9.1: Entrega de residuos aprovechables a recicladores formales en el marco del programa RECICLA para su valorización	88
Medida 9.2: Contratación de trabajadores de las zonas aledañas a la empresa	88
3.10. Estrategia 10: Reciclaje	89
Medida 10.1: Reciclaje interno de chatarra	89
Medida 10.2: Reciclaje interno de arena de machos aglomerada con resinas	89
Medida 10.3: Reciclaje externo de residuos	90
Medida 10.4: Reciclaje externo de arenas usadas de moldeo	90
3.11. Estrategia 11: Servitización	92
Medida 11.1: Servicio de reciclaje y reposición	92

3.12. Estrategia 12: Reparación	93
Medida 12.1: Servicio de mantenimiento y reparación de piezas a clientes	94
Capítulo 4: Transitando hacia una economía circular	95
4.1. Pasos para transitar a una economía circular	95
4.1.1 Paso 1. Sensibilizar	95
4.1.2 Paso 2. Analizar	95
4.1.3 Paso 3. Priorizar	96
4.1.4 Paso 4. Planificar	96
4.1.5 Paso 5. Monitorear	97
Anexos	98
Anexo 1: Tabla de actividades económicas con la CIU Rev.4 para el sector de la industria de fundición	98
Anexo 2: Glosario de términos	99
Anexo 3: Indicadores de circularidad	101
Anexo 4: Sellos y certificaciones aplicables al sector fundición	104
Anexo 5: Normas técnicas y legales vinculadas a la economía circular	105
Anexo 6: Literatura recomendada	107
Anexo 7. Obligaciones generales ambientales	108

Índice de figuras

Figura 1. Modelo de economía lineal	11
Figura 2. Modelo de economía circular en el sector fundición	14
Figura 3. Ciclo técnico, donde se gestiona el stock de materiales no renovables	
Figura 4. Ciclo biológico, donde se gestiona los flujos de materiales biológicos	
Figura 5. Nivel de circularidad en el marco de las 9R	
Figura 6. Marco ReSOLVE	
Figura 7. La cadena de valor en la industria de fundición de metales	
Figura 8. Entradas y salidas de materiales en el proceso de la industria de fundición	
Figura 9. Modelo del ACV adoptado.	
Figura 10. Comparación del impacto ambiental de cuatro alternativas de recuperación de arena.	
Figura 11. Calentador de cuchara a gas	
Figura 12. Calentador de cuchara eléctrico	
Figura 13. Calentador a gas con quemador poroso	
Figura 14. Uso seguro y duradero de crisoles	
Figura 15. Carga del horno de inducción	
Figura 16. Horno de crisol de doble olla para recuperar calor	
Figura 17. Horno con quemadores regenerativos	
Figura 18. Quemador autorrecuperativo	
Figura 19. Horno 7 con precalentador de aire, quemadores pulsantes y control SCADA.	
Figura 20. Potencia (kW) adicional por elevar la presión de un compresor	
Figura 21. Clasificación de la eficiencia de motores con el estándar IEC.	
Figura 22. Eficiencia de un motor de acuerdo con el estándar y la potencia	
Figura 23: Aplicación de VFD en el ventilador de un filtro de mangas	
Figura 24. Estación de carga de baterías	
Figura 25. Montacargas con batería eléctrica	
Figura 26. Pasos de transición hacia una economía circular.	

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de los impactos ambientales de la industria de fundición	12
Tabla 2. Ventajas económicas de la economía circular	20
Tabla 3. Ventajas ambientales de la economía circular	20
Tabla 4. Ventajas empresariales de la economía circular	21
Tabla 5. Ventajas sociales de la economía circular	21
Tabla 6. Tipos comunes de hornos de fundición en el Perú	
Tabla 7. Consumo específico de energía en fundiciones	
Tabla 8. Uso de energía por operación en fundiciones	
Tabla 9. Estrategias de Economía circular y el enfoque 9R y ReSOLVE	
Tabla 10. Listado de estrategias de EC y sus medidas de implementación en la industria de fundición	
Tabla 11. Resultados del inventario del ACV	
Tabla 12. Comparación de costos entre la practica actual y las tres tecnologías de recuperación de arena	
Tabla 13. Precios referenciales de la energía en Peru (Julio 2023)	
Tabla 14. Medidas de manejo ecoeficiente de aspectos ambientales en fundiciones	
Tabla 15. Valores guía referenciales de emisiones al aire en fundiciones ⁽¹⁾	
Tabla 16. Pérdidas por fugas de aire comprimido en una planta	
Tabla 17. Variables de proceso como indicadores del desempeño del mezclador	
Tabla 18. Rendimiento de metal (%) en fundiciones europeas según muestra estadística	
Tabla 19. Aplicaciones de reciclaje externo de arena usada	
Tabla 20. Plantilla de plan de acción para implementar estrategias de economía circular	
Tabla 21. Indicadores de circularidad para recursos y residuos	
Tabla 22. Indicadores de circularidad de aspectos sociales	
Tabla 23. Indicadores de circularidad de aspectos económicos	
Tabla 24. Listado de sellos y certificaciones aplicables al sector fundición	

INTRODUCCIÓN

En el Perú la industria de fundición metálica es una actividad económica muy importante, pues sus productos de fundición incluyen piezas de maquinaria y accesorios para la minería, el transporte, la agricultura, otras industrias, herramientas, incluso objetos de uso cotidiano entre otros innumerables ejemplos.

Según el INEI¹ en el Perú existen 458 empresas de fundición de las cuales 186 son de fundición de hierro y acero y 272 son de metales no ferrosos, siendo que en Lima metropolitana y Callao se concentran 287 empresas, es decir el 62.7% del total.

Según el portal interactivo de fiscalización ambiental (PIFA) del OEFA desde el año 2018 hasta abril del 2023 se presentaron 1791 denuncias ambientales de la actividad industrial en el Perú, de las cuales 30 correspondieron a fundiciones metálicas ferrosas y no ferrosas. Los problemas que más manifestaron los denunciantes de las fundiciones fueron: emisiones de gases y/o humos sin control, ruidos y malos olores, inadecuado manejo de residuos sólidos, problemas para respirar, irritación de ojos y garganta.

Por otro lado, de la relación de 145 administrados que se dedican a la actividad de fundición que el OEFA tiene identificados en todo el Perú, 135 están en Lima y Callao; el 72% son medianas, pequeñas y microempresas, y casi la mitad (73) cuentan con IGA aprobado por el PRODUCE. También hay empresas informales y personas naturales que se dedican a la fundición.

Ante el panorama señalado de la industria de fundición nacional, se desprende que es necesario que las empresas, en especial las de menor tamaño, las que no cuentan con IGA aprobado o que no tienen la capacidad o el conocimiento para implementar controles, tengan una guía que les ayude a realizar una mejor gestión de sus plantas productivas que les permita un mejor resultado en su desempeño ambiental.

De hecho, la industria de la fundición ha sido incluida dentro de los cinco (05) macrogrupos industriales priorizados por el PRODUCE² con mayor potencial para la implementación de medidas de economía circular, en base a cinco criterios: cambio de materias primas, cambio de tecnología, buenas prácticas de manufactura, cambios de productos y programas de reutilización.

La presente guía consta de cuatro capítulos:

El Capítulo 1: **Economía lineal versus economía circular** brinda información general sobre la economía circular y cómo es que surge frente a los retos que la economía lineal ha planteado, priorizando la preservación del capital

¹ Directorio Central de Empresas y Establecimientos elaborado por el INEI), según los registros administrativos de la SUNAT (IV trimestre 2022).

² Según proyecto “Economía circular para un desarrollo urbano amigable con el clima” (KLW), 2022.

natural mediante la optimización del uso de los recursos y el fomento de la eficiencia del sistema; los principios que la rigen y las acciones que pueden ser adoptadas por las empresas del sector fundición en su transición hacia la circularidad.

En el Capítulo 2: **Cadena de valor y proceso productivo en el sector** se presenta información relevante de los procesos productivos en el sector fundición, indicándose los recursos, emisiones, descargas y residuos que producen.

El Las industrias de fundición se clasifican como ferrosas y no ferrosas:

- Fundiciones ferrosas: Usan como insumo básico la chatarra de acero, que es el residuo más reciclado en el mundo y puede serlo un número ilimitado de veces sin perder mucha calidad.
- Fundiciones no ferrosas: Usan como insumos básicos varios metales, para cada tipo de fundición, como el aluminio, el cobre, el magnesio, el plomo, el estaño, el zinc y el níquel, de los cuales el aluminio es el material más reciclado.

Las fundiciones ferrosas son las de mayor producción en el Perú. En la **Figura 8** se muestra un diagrama de flujo de entradas y salidas de materiales en el proceso de fundición ferrosa, y a continuación se explica brevemente las etapas de dicho proceso, siendo similar en el caso de las fundiciones no ferrosas, lo cual se acota cuando corresponda.

En pocas palabras el proceso parte de un material metálico de composición adecuada que se funde en un horno y luego se vierte en un molde con la forma deseada, luego del desmoldeo, se procede a la mecanización final de la pieza y a su tratamiento térmico, siendo finalmente embalado el producto final.

Recepción de materias primas e insumos:

Se recibe la chatarra y aleaciones de hierro en un patio de chatarra, donde se realiza la selección y la reducción de tamaño mediante soldadura, oxicorte y cizalla, según se requiera, operaciones que producen emisiones de gases, humos, polvo y ruido. Luego el metal cortado convenientemente se traslada en montacargas hacia los hornos para su fundición.

También se reciben otros insumos para el proceso de fundición como arenas, resinas, químicos, fundentes, maderas para embalaje. Estos materiales, en gran parte envasados, producen residuos sólidos de envases y embalajes, bolsas, restos de madera, etc.

En las fundiciones no ferrosas las materias primas principales son las barras de metales de alta pureza, en algunos casos chatarra del metal correspondiente y adiciones para la fundición.

Fusión y afino del metal:

El metal y/o la chatarra se carga en los hornos en forma manual y también con tecla. En el Perú usualmente se emplea seis tipos de hornos para fundición de metales en función del metal y la cantidad de carga a fundir (ver detalles en la **Tabla 6**):

- Fundición ferrosa: hornos de inducción y hornos de arco. Antiguamente se usaba el horno de cuba.
- Fundición no ferrosa: hornos de crisol, hornos de reverbero, hornos de eje.

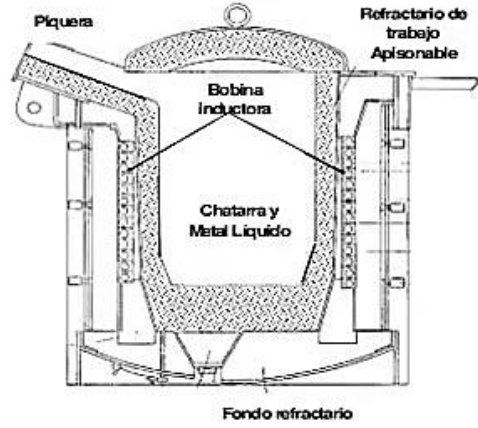
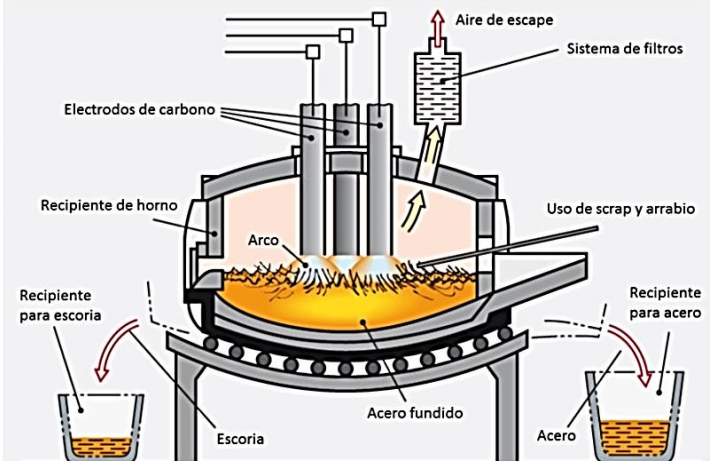
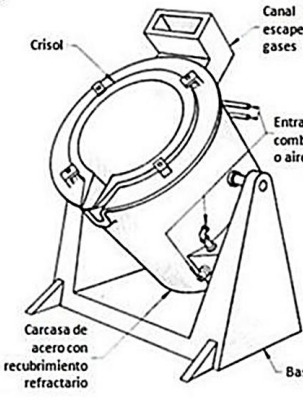
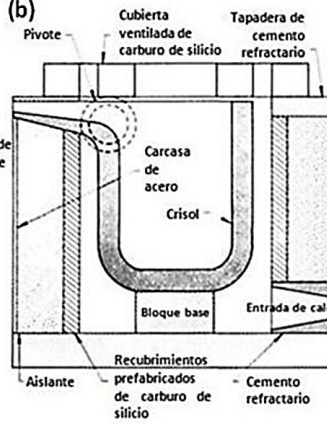
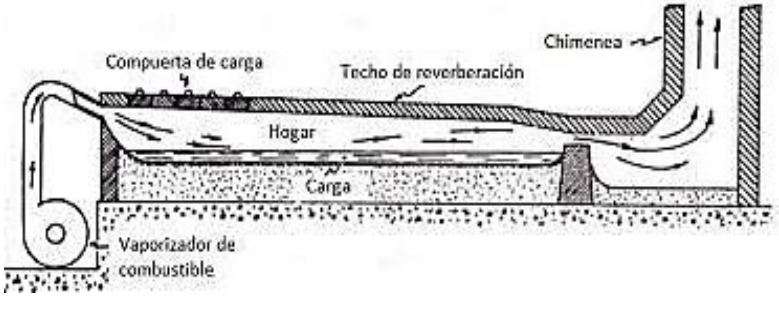
Típicamente la chatarra ferrosa se funde a una temperatura entre 1350 a 1600°C en función de la composición del producto, con un tiempo de fusión de 1.5 a 2 horas. Otros metales se funden a menor temperatura tales como 1083°C (cobre), 420 °C (zinc), 657°C (aluminio), 232°C (estaño).

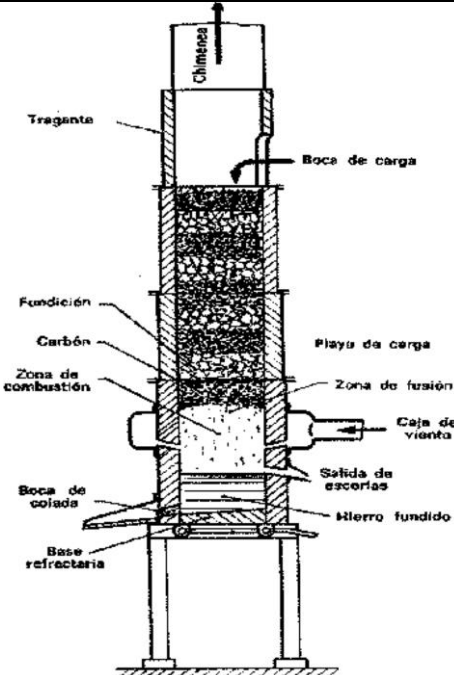
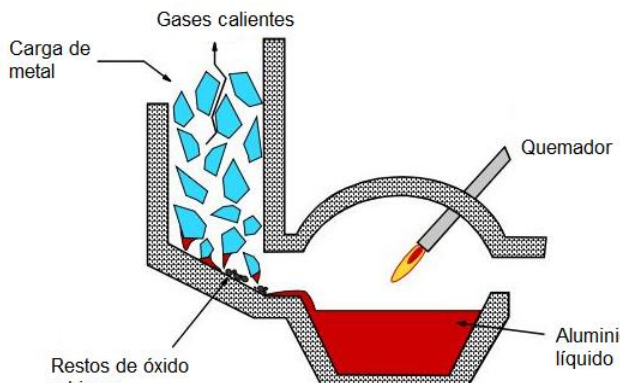
Antes de la colada se toma una muestra del metal fundido (cupón) para su análisis inmediato en laboratorio, en función de lo cual se añade correctores, hasta lograr la composición deseada.



Figura 8. Entradas y salidas de materiales en el proceso de la industria de fundición

Tabla 6. Tipos comunes de hornos de fundición en el Perú

HORNOS DE INDUCCIÓN: Utilizan la inducción electromagnética para calentar el metal. El horno incluye una bobina de cobre para crear un campo magnético que genera una corriente eléctrica en el metal que provoca su calentamiento hasta fundirlo. Son muy eficientes y se utilizan para fundir metales como el acero, el hierro y el aluminio. Tienen una eficiencia energética que varía entre 50 al 76%, dependiendo mucho del metal.	
HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO: Utilizan un arco eléctrico para calentar el metal. El horno incluye dos electrodos por los que circula corriente eléctrica creando un arco entre ambos, generando intenso calor que funde el metal. Son muy versátiles y se utilizan para fundir una amplia variedad de metales, desde acero inoxidable hasta titanio. Tienen una eficiencia energética del 35 al 45%	
HORNOS DE CRISOL: Los hornos de crisol son hornos de combustión directa que utilizan un crisol para contener el metal y un quemador para proporcionar el calor necesario. Estos hornos son adecuados para fundir metales como el aluminio, el bronce y el latón. Son fáciles de usar y ofrecen un buen control de la temperatura. Tienen una eficiencia energética muy baja de solo 7 al 19%.	(a)  (a) Horno basculante (b)  (b) Horno fijo
HORNOS DE REVERBERO: Utilizan la radiación de las paredes del horno para calentar el metal que se coloca en el hogar del horno, siendo las paredes calentadas por una llama de combustión. Se usan para fundir metales como el cobre, aluminio, el plomo y el estaño. Tienen una eficiencia energética baja de 20 al 25%.	

HORNOS DE CUBA: Los hornos de cuba (también llamados de cubilote) son de construcción cilíndrica con una cubierta exterior de acero y recubiertos interiormente con ladrillos refractarios, pudiendo llegar hasta una altura de 6 m. El horno se carga con capas de carbón o coke y el metal (lingotes o chatarra) lo que permite un buen intercambio de calor por el contacto directo. El aire para la combustión del carbón es suministrado por un ventilador a través de una caja de viento. Tiene una abertura en la parte baja llamada boca de escorias y otra más baja para la colada por donde sale el metal fundido. Hay cubas donde se utiliza gas como combustible. Presentan la eficiencia más alta de todos los hornos, normalmente del 40 al 45 %.	
HORNOS DE EJE: Los hornos de eje sólo se utilizan para fundir metales no ferrosos, principalmente aluminio. Se trata de un horno vertical sencillo con solera colectora (dentro o fuera del horno) y sistema de quemadores de gas en el extremo inferior, y sistema de carga de material en la parte superior. Los gases de combustión normalmente se extraen y depuran. Puede alcanzar una eficiencia térmica del 50%	

En la superficie del metal fundido se forma una escoria que debe ser eliminada antes de la colada y evitar que llegue al molde, para lo cual se adiciona caliza que reacciona con las impurezas y las funde a baja temperatura para así removerlas. Las escorias conforman un residuo sólido que debe ser adecuadamente dispuesto y en condiciones ambientalmente seguras.

Los hornos de fusión son una importante fuente de emisiones de gases y partículas a la atmósfera, ya sea a través de chimeneas o como emisiones fugitivas:

- Emisiones de gases de combustión como los óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y partículas (hollín) en los quemadores de combustibles (gas, diésel, etc.) que emplean los hornos de crisol y de reverbero, las cuales se descargan por chimeneas a la atmósfera.

- Emisiones de partículas en la forma de humos, por la oxidación de vapores de metales o la condensación de los vapores de metales, los cuales son emitidos fugitivamente a la atmósfera por bocas de alimentación, en la transferencia en cucharas o en la colada.
- Emisiones de contaminantes orgánicos persistentes no intencionales (COP-NI) que son compuestos químicos órgano halogenados, como dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF), clorobencenos y bifenilos policlorados (PCB). Se producen de forma no intencional en los hornos durante la fundición de chatarra que puede estar contaminada con aceites, grasas, recubrimientos, pinturas, etc. y haber presencia de cloro en algún material junto con la chatarra. Los COP-NI cuando se liberan persisten en el ambiente, se acumulan en organismos vivos y plantean un riesgo para la salud y el ambiente.

En muchos casos la contaminación ocurre cuando en la planta no se cuenta con sistemas de captación y depuración de partículas, tales como campanas de extracción, ciclones, filtros de mangas o lavadores de gases (scrubbers).

Los hornos de fusión también emiten ruido al ambiente, especialmente los hornos de arco durante la descarga eléctrica; asimismo los hornos de inducción producen ruido de alta frecuencia. Otras fuentes de ruido son los ventiladores de los hornos de crisol y de reverbero.

Como residuo principal de los hornos de fusión, son los refractarios usados que deben retirarse cada cierto tiempo.

Preparación de arenas:

La preparación de la arena se realiza en un molino en el cual se añaden tanto la arena como el agua y el resto de los componentes que se estimen (arcilla o bentonita, resina, catalizador, etc.) y se remueve la mezcla hasta que adquiere el tamaño de grano y el nivel de consistencia deseado. El movimiento de los materiales granulados producen emisiones de partículas fugitivas al ambiente.

El funcionamiento mismo del molino y los accionamientos mecánicos del sistema, producen emisiones de ruido hacia el ambiente.

Dado que se emplean diversos aditivos en la preparación de la arena, se generan residuos sólidos de los envases de dichos insumos.

Moldeo y secado:

Primero se construyen los modelos de la pieza con madera, que son utilizados para la elaboración del molde donde se vaciará el metal líquido para obtener la pieza fundida. Luego la arena preparada se vierte y compacta alrededor del modelo dentro de una caja, dejándose secar. Se genera el molde con la cavidad que tiene la forma y tamaño de la pieza a producir. El molde se protege con pintura refractaria para evitar el arrastre de la arena durante el vertido del metal líquido. Este tipo de moldes son transitorios y se usan una sola vez.

Los procesos de formación de moldes y machos son diferentes y generalmente se dividen en dos categorías principales: (i) moldeo en arena verde, que implica el uso de arena mezclada con un aglutinante adecuado (generalmente arcilla de bentonita), aditivos carbonosos y agua; (ii) moldeo en arena químicamente aglomerada, que consiste en el uso de arenas y compuestos químicos como resinas fenólicas de uretano, resinas de fenólicas de formaldehído, furano.

En el caso de fundiciones no ferrosas, donde los puntos de fusión del metal son mas bajos que el hierro, muchas veces se emplean moldes permanentes de hierro fundido o acero, los cuales pueden reusarse muchas veces.

En el moldeo con arena se producen emisiones de olores por desprendimiento de gases/vapores de las resinas aglomerantes, en la aplicación de recubrimientos y pinturas, así como en el curado de las mezclas de arena con resinas por aire, calor o gas.

También se producen residuos de envases de los productos químicos usados en el moldeo, residuos de limpieza de moldes y de materiales usados.

Calentamiento de cucharas:

La cuchara revestida de refractario donde se recibirá el metal fundido debe ser calentada previamente para que el metal caliente no se enfríe demasiado antes de llevarlo a los moldes.

Por lo general el calentamiento de la cuchara se realiza con una llama de gas hasta una temperatura de unos 1000 °C. La combustión del gas produce emisiones como NOx y CO principalmente que se liberan en forma abierta a la atmósfera.

Colada y vaciado:

Una vez vertido el metal fundido en la cuchara refractaria, se transporta hasta los moldes ubicados a corta distancia del horno, donde se vierte el metal a través de alimentadores, adoptando la forma de la cavidad del molde, donde el metal permanece entre 24 a 48 horas.

Al verter el metal fundido en los moldes, que contienen aditivos para ligar la arena, se generan productos de reacción y descomposición tanto inorgánicos como compuestos orgánicos volátiles (VOC), incluso durante el enfriamiento de los moldes, los cuales se liberan a la atmósfera. Los VOC, combinados con los NOx emitidos por otras fuentes, pueden contribuir a la formación de smog, un tipo de contaminación que afecta negativamente la calidad del aire y puede tener efectos perjudiciales en la salud humana y en los ecosistemas.

Desmoldeo de la pieza:

El desmoldeo de las piezas fundidas se realiza con la separación de las arenas del molde de las piezas metálicas mediante vibración o impacto.

Se realizan cortes para eliminar las entradas y canales de alimentación de la pieza y las mazarotas, usándose para ello soplete, golpes con martillo, electrodos de arco-aire.

Las piezas fundidas seguirán el resto del proceso, y las arenas del molde se destinarán a recuperación o constituirá un residuo, dependiendo si se cuenta o no con equipos de recuperación.

Durante el desmoldeo se producen emisiones de partículas por el impacto en el desmoldeo de la pieza fundida, además de emisiones de ruido al ambiente, También se siguen produciendo emisiones residuales de VOC hacia la atmósfera.

El sistema de recuperación de arena consiste de una zaranda (separación primaria), donde se alimenta los trozos de moldes, y luego por un equipo donde se logra la separación de la arena reutilizable gruesa, de la arena con granulometría fina. La arena de granulometría gruesa vuelve a emplearse en el proceso, mientras que la de granulometría fina es separada y almacenada como residuo sólido. Dicho sistema produce emisiones de partículas (captadas en filtros) y emisiones de ruido al ambiente.

Limpieza:

Las piezas fundidas en estado bruto se recogen y se introducen en una granalladora, donde se eliminan restos de arena adheridos a las piezas. Dicha operación produce emisiones de ruido al ambiente y también residuos del material del granallado ya gastado, así como residuos de polvillo de metal.

Tratamiento térmico:

La pieza fundida en bruto puede ser sometida a un tratamiento térmico (normalizado, recocido, temple o revenido) que en el caso de metales ferrosos es entre 750 a 1000°C por varias horas con el fin de alcanzar las características mecánicas de resistencia, dureza y tenacidad del metal. Se emplea hornos de calentamiento a gas natural o eléctricos. Luego del tratamiento térmico, las piezas son enfriadas en pozas de agua o con chorros de aire.

En los hornos de tratamiento térmico que queman gas se producen emisiones de gases de combustión, principalmente NOx y CO que se descargan por chimenea a la atmósfera. También hay emisiones de ruido en el caso de los ventiladores de los quemadores de los hornos de tratamiento térmico.

En el caso de enfriamiento de piezas tratadas en pozas de agua, eventualmente se cambian y se producen aguas residuales hacia el alcantarillado. Asimismo, las torres de enfriamiento producen purgas que van hacia el alcantarillado.

Acabado de la pieza:

En función del tamaño de la pieza, se realizan operaciones de corte, desbaste (eliminación de rebabas mediante oxicorte y cincelado) y esmerilado para conseguir las dimensiones requeridas; asimismo, se realizan reparaciones mediante soldadura.

Dichas operaciones de acabado producen emisiones de ruido por el uso de herramientas diversas, así como emisiones de partículas por el impacto y desgaste de superficies. Se producen una serie de residuos de metal (aprovechable), residuos de lijas, esmeriles usados, electrodos de soldadura de relleno de piezas, latas, restos de pintura, envases de disolventes, trapos, entre otros.

Mecanizado:

Cuando la pieza lo requiere, se somete a un mecanizado realizando trabajos de corte de metales, tales como: torneado, taladrado, fresado, escariado, roscado, brochado, rectificado, pulido, cepillado, corte y conformado. Se aplican fluidos (agua, aceites, etc.) para facilitar el corte.

Se producen emisiones de ruido por el mecanizado de piezas, asimismo residuos como viruta, aceite lubricante usado.

Embalaje:

Las piezas terminadas se embalan usando envolturas de plástico y se despachan dentro de cajas de madera que se ensamblan en el sitio de acuerdo a las dimensiones de las piezas. En este caso se producen residuos de bolsas plásticas, restos de madera de embalaje y clavos deformados.

2.1. Servicios auxiliares

Los servicios auxiliares de importancia para el proceso en una fundición son los siguientes:

Suministro de electricidad: dado por la empresa distribuidora local o directamente por el generador, en función de la potencia contratada.

Suministro de combustibles: pudiendo ser Diésel B5, GLP o gas natural en función de las necesidades o disponibilidad en la zona de la planta, abastecidos por un distribuidor. Los dos primeros se almacenan en tanques y el gas natural se suministra por red.

Suministro de agua: la fuente puede ser agua de pozo o agua de red, en función de la disponibilidad local. Se almacena en tanques.

Suministro de aire comprimido: se genera en compresores de aire instalados en una sala de máquinas de la propia planta y distribuido por red interna.

Ventilación y tratamiento de gases: conformado por un conjunto de dispositivos que se utilizan para controlar la emisión de gases y partículas al ambiente durante el proceso de fundición. Los sistemas de ventilación se encargan de extraer los gases y partículas generados en los hornos y otras máquinas o puntos de operaciones del proceso de fundición, y transportarlos a través de conductos hasta los equipos de tratamiento de gases para depurarlos antes de liberarlos al ambiente. Los sistemas de ventilación y tratamiento de gases pueden incluir campanas de extracción, ventiladores, ciclones, filtros de mangas, lavadores de gases o Scrubbers.

2.2. Indicadores energéticos

Según datos de auditorías energéticas en 17 fundiciones europeas en el marco del Foundrybench Project (2012), los consumos específicos de energía y la participación de la energía en las distintas operaciones del proceso es como se muestra en las **Tablas 7 y 8**, habiendo variaciones según la tecnología de producción, calidad del acero y fundiciones y del tratamiento térmico.

Tabla 7. Consumo específico de energía en fundiciones

Indicador	Tipo de fundición		
	Fundición de hierro	Fundición de acero	Fundición no ferrosa
Energía/tonelada (MWh/t)	2.5	5-8	4-10
Costo energético del valor de producción (%)	5-8	6-11	4-8

Fuente: Foundrybench Project (2012)

Tabla 8. Uso de energía por operación en fundiciones

Operación	Participación de la energía (%) y rango (+/-%)		
	Fundición de hierro	Fundición de acero	Fundición no ferrosa
Fusión	55+/-10	45+/-5	65+/-10
Tratamiento térmico	1+/-1	25+/-2	-
Motores	12+/-4	9+/-2	11+/-5
Compresores de aire	7+/-3	5+/-2	5+/-3
Pre calentamiento de cucharas	4+/-2	4+/-2	3+/-2
Ventilación	14+/-5	7+/-5	10+/-8
Calefacción	3+/-2	2+/-1	3+/-2
Iluminación	4+/-1	3+/-1	3+/-1
Total	100	100	100

Fuente: Foundrybench Project (2012)

Capítulo 3: Estrategias y medidas de economía circular para la industria de fundición desarrolla las estrategias y medidas de economía circular para el sector fundición, y pone a disposición casos nacionales e internacionales de aplicación de medidas de circularidad.

Finalmente, en el

Capítulo 4: Transitando hacia una economía circular denominado “Transitando hacia una economía circular”, se describen los pasos para que las empresas del sector fundición transiten hacia un modelo circular, siendo estos: la sensibilización, análisis, priorización, planificación y monitoreo de las medidas, además de la medición de la circularidad.

La presente guía se complementa con otra también elaborada por el PRODUCE para el mismo sub sector: *“Guía de residuos sólidos y material de descarte con enfoque de economía circular para la industria de fundición”*.

Por último, el interesado puede encontrar información más detallada sobre aspectos de eficiencia energética y ambiental en la literatura que se indica en el **Anexo 6** lo cual se recomienda consultar con especial énfasis.

Ámbito de aplicación

La presente guía contiene orientaciones técnicas especializadas para quienes gestionan y operan plantas de fundición de metales de medianas, pequeñas y micro empresas del CIIU 2431 y 2432 (ver **Anexo 1**) a nivel nacional, brindándoles herramientas prácticas para una mejor gestión de sus recursos, insumos y materiales, mientras se evita o minimiza la generación de los residuos sólidos y emisiones en sus instalaciones aplicando el enfoque de economía circular.

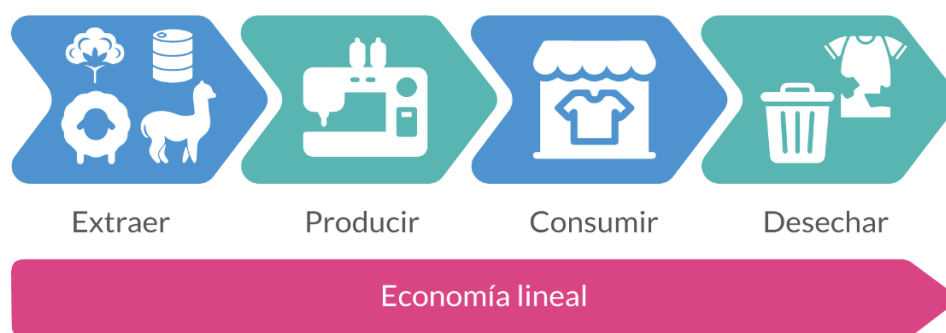
Capítulo 1: Economía lineal versus economía circular

1.1. Economía lineal

Desde la Revolución Industrial de mediados de siglo XIX, la economía mundial se ha caracterizado por la extracción de materias primas, producir y consumir para luego desechar, sin reparar en las consecuencias económicas, ambientales y sociales.

A este modelo económico basado en «extraer, producir, consumir y desechar» se le denomina economía lineal (ver Figura 1. Modelo de economía lineal), y se ha convertido en una de las principales causas del agotamiento de los recursos, la degradación del ambiente y del cambio climático.

Figura 1. Modelo de economía lineal



Fuente: Elaboración propia

En el modelo de economía lineal se prioriza la producción y el consumo. Este modelo no está pensado para recuperar los materiales, hacer los productos más duraderos, evitar la contaminación; es decir, no está diseñado para incorporar la producción y consumo sostenible a lo largo de la cadena de valor.

La industria de fundición metálica es una actividad económica muy importante, no sólo porque provee piezas de maquinaria y accesorios para otras actividades productivas en el Perú; sino también porque es parte ya de la circularidad en la economía al emplear como insumo grandes cantidades de chatarra metálica procedente de otros sectores, aunque aún es posible incrementar la circularidad dentro de sus propios procesos y hacer simbiosis con otros procesos externos valorizando o aprovechando los residuos de arenas de fundición, cuya producción es cuantiosa en estas industrias.

Las plantas de fundición, por la naturaleza de sus procesos, producen descargas hacia el ambiente con diferente grado de impacto ambiental (ver Tabla 1. Resumen de los impactos ambientales de la industria) en función de las tecnologías que se emplean y cómo se manejan dichas descargas, tales como emisiones de partículas, gases de combustión, residuos sólidos, efluentes, emisiones de ruido y gases de efecto invernadero (GEI), incrementando los efectos del cambio climático.

Por todo ello, el modelo lineal ha demostrado ser insostenible, ya que tiene como consecuencia el agotamiento de los recursos del planeta, aumentando los efectos del cambio climático y acelerando la pérdida de biodiversidad.

Tabla 1. Resumen de los impactos ambientales de la industria de fundición

Descarga al ambiente	Posible impacto ambiental
Emisiones de gases y partículas	Emisiones de gases (NO_x, SO₂, CO) en la combustión de combustibles fósiles quemados directamente en los hornos de fusión, hornos de tratamiento térmico, secadores y calentadores de cucharas y emisiones de proceso (gases, partículas PM-10 y PM-2.5, metales de plomo, mercurio, etc.) en la fusión de metales, que pueden contaminar el ambiente si sobrepasan los estándares de calidad del aire^(a). Al verter el metal fundido sobre moldes y machos que contienen aditivos para ligar la arena, se generan compuestos inorgánicos y compuestos orgánicos volátiles (VOC), lo cual continúa durante el enfriamiento de moldes y el desmoldeo. Los hornos de fusión, sistemas de moldeo, granallado, acabado, el acondicionamiento de chatarras, entre otros, producen emisiones de partículas que pueden contaminar el ambiente si sobrepasan los estándares de calidad del aire^(a). En gran medida la posible contaminación ocurre cuando en la planta no se cuenta con sistemas de captación y depuración de partículas, tales como campanas de extracción, ciclones, filtros de mangas o scrubbers. Los contaminantes orgánicos persistentes no intencionales (COP-NI) están conformados por compuestos químicos órgano halogenados, como PCDD, PCDF, PCB. Su emisión ocurre durante la fundición de chatarra contaminada con aceites, grasas, recubrimientos, pinturas, y compuestos de cloro. El IFC del Banco Mundial ha establecido valores guía para emisiones de combustión y proceso (partículas, aerosoles, NO_x, SO₂, CO, VOC, PCDD/F, aminas, cloro, metales, cloruros, fluoruros, H₂S) a través de chimeneas, las cuales pueden usarse como referencia ^(d). También se producen emisiones de CO₂ que contribuyen al calentamiento global. En forma indirecta, el consumo de electricidad en hornos y otras máquinas de las fundiciones, producen emisiones de gases de combustión incluyendo CO₂, ya que un 44% de la electricidad en el Perú es generada en centrales térmicas que queman combustibles fósiles.
Residuos sólidos	Las fundiciones producen una serie de residuos sólidos de tipo peligroso y no peligroso, que pueden ocasionar contaminación ambiental si no son bien gestionados. En el Perú, en muchas plantas los residuos de arena de fundición (RAF) representan más del 80% de los residuos sólidos generados, los que se disponen en rellenos. No obstante ser un importante volumen de producción, no se han creado mecanismos para su valorización o aprovechamiento en otras aplicaciones distintas al moldeo, como si ocurre en otros países (insumo en fabricación de cemento, arena para construcción de viviendas, ingrediente de pavimento asfáltico, ladrillos y adoquines, etc.) donde también la legislación ambiental lo promueve y hay incentivos económicos para ello.
Efluentes industriales	Las fundiciones pueden producir aguas residuales industriales de las purgas de las torres de enfriamiento de agua de refrigeración, de las pozas de agua de

Descarga al ambiente	Posible impacto ambiental
	tratamiento térmico, entre otros menores. Dado que las plantas se ubican en zonas urbanas, mayormente las aguas residuales se vierten al alcantarillado, para lo cual tienen que cumplir con los Valores Máximos Admisibles establecidos por la autoridad ^(b) .
Emisiones de ruido	En las fundiciones hay fuentes de ruido como los hornos de arco, compresores, martillos, máquinas y herramientas de acabado, ventiladores, entre otros. Dependiendo si las fuentes de ruido están confinadas o no, las emisiones de ruido pueden incrementar los niveles de fondo por encima de los estándares para ruido ^(c) y resultar molestos para posibles receptores externos (viviendas, negocios, etc.).

Fuente: Elaboración propia

(a) Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias.

(b) Decreto Supremo N° 021-2009-VIVIENDA: Aprueba los Valores Máximos Admisibles de las descargas de aguas residuales no domésticas en el Sistema de Alcantarillado Sanitaria.

(c) Decreto Supremo N° 085-2003-PCM: Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Ruido.

(d) IFC. Environmental, Health, and Safety Guidelines for Foundries. 2007. Incluye valores guía para emisiones de combustión y proceso a través de chimeneas.

En ese sentido, surge la necesidad de cambiar el modelo lineal por un nuevo modelo que permita el crecimiento económico y generar bienestar en la sociedad sin comprometer el ambiente.

En este contexto, surge la economía circular como una nueva alternativa de desarrollo que permite incrementar la productividad y competitividad a la vez que busca mantener el valor de los materiales, componentes y productos en la economía por el mayor tiempo posible y a la vez reduce los impactos ambientales negativos del patrón extraer, consumir, desechar.

1.2. Economía circular

La Fundación Ellen MacArthur, referente a nivel mundial en materia de economía circular, define a esta como un “sistema económico y social que tiene como objetivo la producción de bienes y servicios, al tiempo que reduce el consumo y el desperdicio de materias primas, agua y fuentes de energía” (Ellen MacArthur Foundation, 2017). Por su parte, la norma ISO 20400 (2017) sobre compras sostenibles define a la economía circular como una economía que es restauradora y regenerativa por diseño, y que tiene por objeto mantener en todo momento la mayor utilidad y valor de los productos, componentes y materiales, distinguiendo entre ciclos técnicos y biológicos (Ver ítem 1.2.1).

La economía circular además se fundamenta en la preservación del capital natural, mediante la optimización del uso de los recursos y el fomento de la eficiencia del sistema, siendo un modelo económico alternativo al modelo tradicional.

En el caso del sector fundición, la economía circular busca eliminar los impactos ambientales que se generan en cada una de las etapas del proceso, trayendo beneficios positivos para el ambiente a partir del empleo de tecnologías energéticamente eficientes, procesos modernos con recuperación de arenas de

moldeo, reúso y reciclaje de residuos, control de emisiones de gases y particulados, disminuyendo el uso de materias primas que agotan los recursos del planeta, entre otros.

En la Figura 2. Modelo de economía circular en el sector fundición se muestra un esquema de cómo se aplicaría el modelo de economía circular en el sector fundición, para los principales materiales que participan en el proceso.

Figura 2. Modelo de economía circular en el sector fundición



Fuente: FUNDICIÓN FERROSA S.A.C.

A diferencia de la economía lineal derrochadora, la economía circular es regenerativa por diseño y tiene por objetivo desacoplar en forma gradual el crecimiento económico del consumo de recursos finitos, basándose en tres principios:

A. Eliminar residuos y contaminación desde el diseño

Aunque a veces parece que generar residuos es inevitable en ciertas situaciones, en realidad el residuo es el resultado de elecciones de diseño. No hay residuos en la naturaleza, por lo tanto, la economía circular concibe la eliminación del residuo desde el diseño inicial del producto/servicio.

B. Mantener productos y materiales en uso

Consiste en mantener los materiales en uso, ya sea como producto o, cuando ya no se puedan usar, como componentes o materias primas. De esta manera, nada se convierte en residuo y se conserva el valor intrínseco de los productos y materiales.

C. Regenerar sistemas naturales

Al pasar de una economía lineal a una economía circular, facilitamos que los procesos naturales ocurran, dejando más espacio para que la naturaleza se regenere y prospere. Al transitar hacia una economía circular, cambiamos el enfoque de extracción a regeneración. En lugar de degradar continuamente la naturaleza, construimos capital natural.

1.2.1. Ciclo técnico y ciclo biológico

Existen varias opciones estratégicas que las empresas pueden seguir con el enfoque de economía circular dentro de lo que se llama el “Ciclo técnico” y el “Ciclo biológico”:

Ciclo técnico: Aplica para todos los productos que no retornan a la naturaleza al finalizar su ciclo de vida.

Ciclo biológico: Está referido a aquellos ciclos de la naturaleza en donde los materiales biodegradables son devueltos a la naturaleza.

A. Ciclo técnico

Los ciclos técnicos, ver **Figura 3**. Ciclo técnico, donde se gestiona el stock de materiales no renovables, son generalmente para productos hechos de materiales no biodegradables como en el caso de los metales. En un inicio del ciclo técnico, el usuario, elige un bien o servicio generado de los derivados de la materia prima no renovable como celulares, artefactos electrónicos, maquinaria industrial, entre otros. Dichos materiales, al final de sus ciclos de vida, en lugar de desecharlos se tratan de retornarlos al ciclo a través de opciones como el reciclaje, la renovación/refabricación, el reúso o prolongar su vida mediante el mantenimiento o compartiéndolos.

Figura 3. Ciclo técnico, donde se gestiona el stock de materiales no renovables



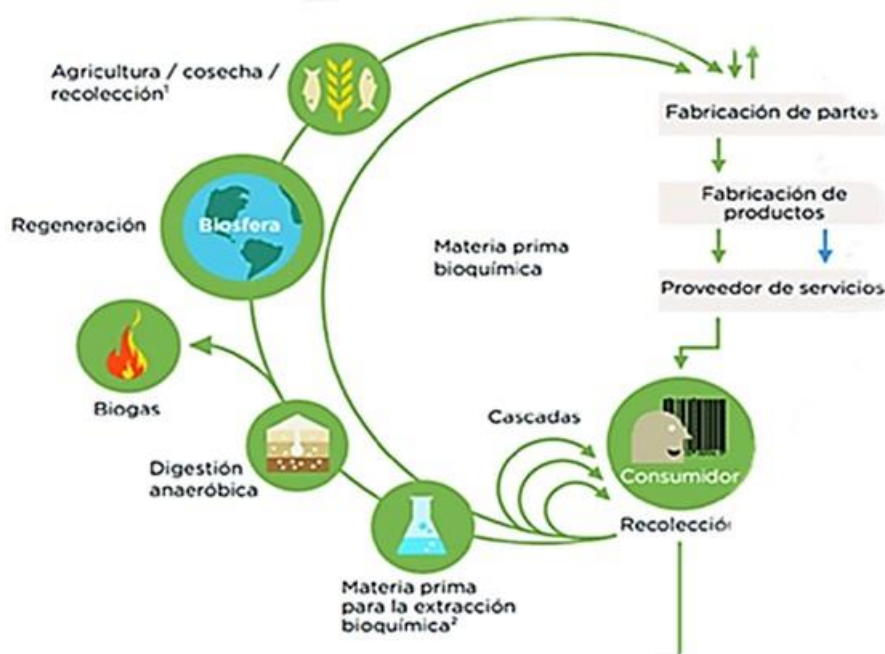
Fuente: Ellen MacArthur Foundation, 2017.

B. Ciclo biológico

El ciclo biológico, ver Figura 4. Ciclo biológico, donde se gestiona los flujos de materiales biológicos, está referido al metabolismo biológico, es decir, aquellos ciclos de la naturaleza en donde los materiales biodegradables, como alimentos, productos a base de madera o cultivos, así como productos derivados de animales son devueltos a la naturaleza.

El ciclo biológico incluye la Regeneración, que implica mantener los ecosistemas naturales, utilizando materiales renovables/biodegradables/compostables/no tóxicos, así mismo usando energías de fuentes renovables.

Figura 4. Ciclo biológico, donde se gestiona los flujos de materiales biológicos



Fuente: Ellen MacArthur Foundation, 2017.

Como se pudo apreciar en la Tabla 1, la industria de fundición puede generar impactos ambientales negativos en su entorno. En ese sentido, la economía circular ofrece la oportunidad de transitar hacia un modelo de producción más sostenible, a través de la implementación de diferentes medidas (por ejemplo el reciclaje de metales, la reutilización de materiales, diseño de productos y procesos que minimizan el uso de materiales y energía, la economía del servicio, etc.) que contribuyan a que gradualmente las empresas de fundición sean cada vez más circulares. En el capítulo 3.0 se abordan el detalle de tales medidas.

1.2.2. Contexto nacional de la industria de fundición

Estructura del mercado: El sector de fundición metálica en el Perú es relativamente pequeño en comparación con otras industrias manufactureras. Está compuesto principalmente por empresas de tamaño mediano y pequeño (<50 000 TM/año) que se dedican a la fundición de metales ferrosos y no

ferrosos. Pero también hay pocas grandes empresas que llegan a una producción de 1 millón TM/año como Aceros Arequipa (Pisco).

Materias primas: El sector depende en gran medida de la disponibilidad de materias primas, como hierro, aluminio, cobre, zinc, plomo y otros metales. Las empresas se abastecen principalmente de la minería local (metales puros), de empresas u organizaciones dedicadas al reciclaje de chatarra metálica, y también a través de importación de metales de otros países. La variabilidad en los precios de estas materias primas puede afectar significativamente la rentabilidad de las empresas de fundición.

Demanda interna: La demanda de productos de fundición metálica en Perú está vinculada a sectores como la construcción, la minería, la manufactura y la infraestructura.

Competencia: Existe una competencia considerable en el mercado de fundición metálica, y las empresas a menudo compiten en precio y calidad. La calidad y la certificación (ISO 14001 en la gestión ambiental y la certificación de producto para cumplir con ciertos estándares de calidad y seguridad) son requisitos importantes para las empresas que desean destacar en el mercado.

Regulación ambiental: El sector de fundición metálica está sujeto a regulaciones ambientales que buscan reducir las emisiones de contaminantes y promover prácticas sostenibles. Las empresas deben cumplir con estas regulaciones para operar en el mercado. No obstante, hay empresas informales que no cumplen con las regulaciones ambientales y son denunciadas por contaminación por pobladores cercanos, pero también hay formales que no cumplen los LMP establecidos o sus medidas de manejo ambiental, son ineficientes y generan problemáticas ambientales en su entorno.

Innovación: Para mantenerse competitivas, las empresas de fundición metálica deben estar al tanto de las últimas tecnologías y métodos de producción. La innovación en procesos y productos a lo cual puede ayudar el enfoque de circularidad, puede ayudar a diferenciar a una empresa en el mercado. Por ejemplo, en las pequeñas fundiciones no es muy común emplear sistemas de recuperación de arenas de moldeo, asimismo se emplean en muchos casos hornos de fusión de baja tecnología y con escaso control de sus emisiones.

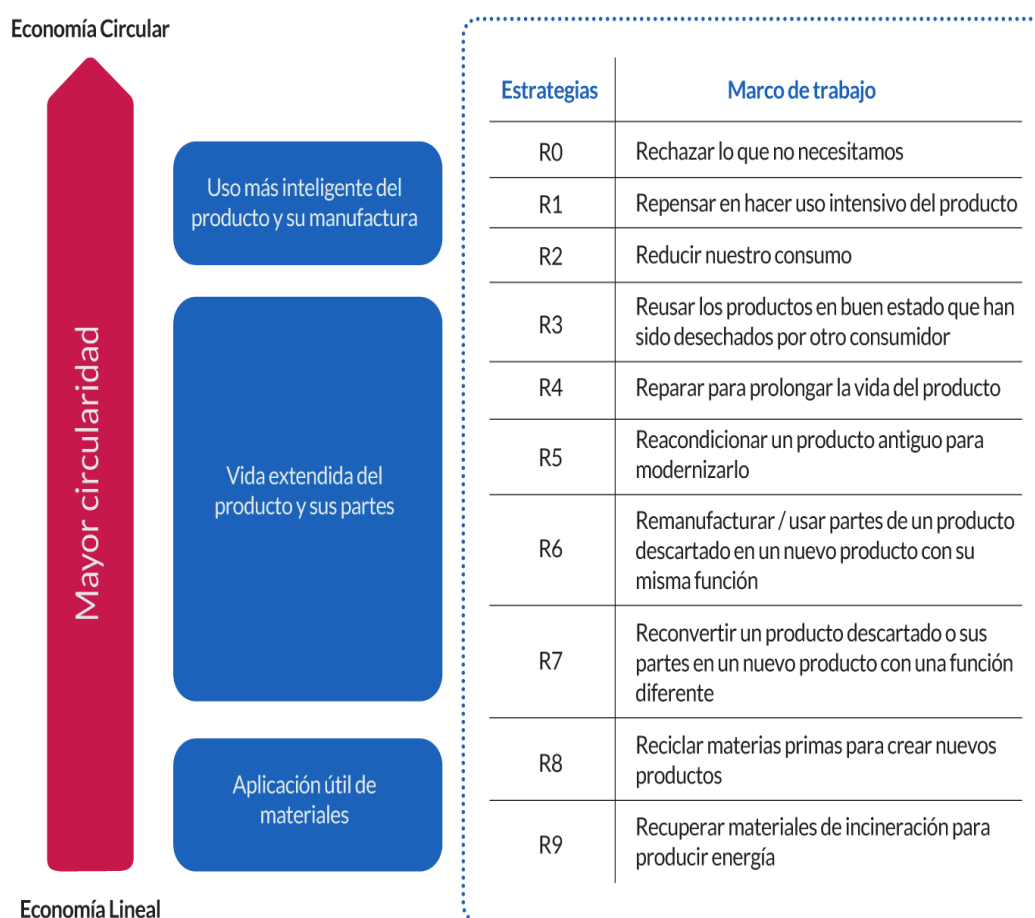
1.3. Enfoques para la aplicación de la economía circular

Mientras que economía lineal se basa en tomar recursos naturales y fabricar productos que acabarán convertidos en residuos; la economía circular busca revertir esta situación a través de la aplicación de enfoques y estrategias que permitan un crecimiento económico desacoplado del uso de recursos y energía. Algunos enfoques de circularidad que se pueden implementar en las empresas son:

1.3.1. Enfoque de las 9R

El enfoque de las "9R" en la economía circular es una ampliación y refinamiento del concepto de las "3R" tradicionales: reducir, reutilizar y reciclar. La economía circular se centra en minimizar el desperdicio, mantener los productos y materiales en uso durante el mayor tiempo posible y regenerar los recursos naturales. Las "9R" representan una guía más completa para abordar la gestión sostenible de recursos y residuos. En la Figura 5. Nivel de circularidad en el marco de las 9Rse describe el enfoque de las "9R".

Figura 5. Nivel de circularidad en el marco de las 9R



Fuente: Adaptado de PBL, 2016.

1.3.2. Marco ReSOLVE

A través de investigaciones, estudios de casos prácticos y entrevistas con expertos, la Fundación Ellen MacArthur ha identificado un conjunto de seis tipos de acciones, denominadas ReSOLVE³, que pueden adoptar las empresas para una transición hacia la economía circular. De distintas formas, dichas acciones incrementan el uso de activos físicos, prolongan su vida y cambian el uso de los

³ **ReSOLVE** es un acrónimo de las palabras en inglés: **R**egenerate (regenerar), **S**hare (compartir), **O**ptimise (optimizar), **L**oop (bucle), **V**irtualise (virtualizar) y **E**xchange (intercambiar).

recursos de fuentes finitas a renovables. En la Figura 6. Marco ReSOLVE, se describe el Marco ReSOLVE.

Figura 6. Marco ReSOLVE

Regenerar (regenerate)		- Cambio de materias y energías renovables. - Reclamar, retener y restablecer la salud de los ecosistemas. - Devolver los recursos biológicos recuperados a la biósfera.
Compartir (share)		- Compartir activos (por ejemplo, autos, almacenes, maquinaria). - Reutilizar, participar en el mercado de segunda mano. - Prolongar la vida útil mediante el mantenimiento, diseño sostenible, actualización, combatir la obsolescencia programada.
Optimizar (optimize)		- Incrementar el rendimiento y la eficiencia del producto. - Eliminar los residuos de la producción y de la cadena de suministro. - Utilizar los macrodatos (Big Data), la automatización, la detección y dirección remotas.
Cerrar (loop)		- Refabricar productos o componentes. - Reciclar materiales. - Generación de compost y biogás por digestión anaerobia. - Extraer componentes bioquímicos de los residuos orgánicos.
Virtualizar (virtualise)		- Desmaterializar directamente (por ejemplo, uso de libros electrónicos, almacenamiento de datos en la nube). - Desmaterializar indirectamente (por ejemplo, compras por internet, reuniones virtuales, teletrabajo).
Intercambiar (exchange)		- Reemplazar maquinaria obsoleta por una más eficiente. - Aplicar nuevas tecnologías (por ejemplo, impresión en 3D). - Escoger nuevos productos o servicios más sostenibles (vehículos eléctricos, iluminación LED, etc.).

Fuente: Adaptado de Ellen MacArthur Foundation, 2017.

1.4. Importancia de transitar a modelos circulares

Avanzar hacia una economía circular genera importantes beneficios económicos, ambientales y sociales para el bienestar de las poblaciones y el planeta. Entre estos beneficios se pueden destacar, el aumento de la competitividad y diversificación productiva de las cadenas de valor y los negocios mismos, la reducción de los riesgos por suministros de materias primas y de la presión sobre los recursos naturales, así como el crecimiento de las oportunidades de empleo decente. Además, los consumidores pueden acceder a productos de mejor calidad y con menor carga contaminante.

En ese sentido, la economía circular tiene múltiples beneficios económicos, ambientales, empresariales y sociales, como se indican en las Tablas 2, 3, 4 y 5.

Tabla 2. Ventajas económicas de la economía circular

Crecimiento económico	• Se obtiene principalmente como resultado de la combinación de los mayores ingresos derivados de las actividades circulares emergentes, y de la reducción de los costos de producción por la utilización más productiva de los insumos.
Ahorros de costos netos de recursos y energía	• Adoptando estrategias de economía circular es posible reducir considerablemente los costos de producción, obtención y uso de un producto o servicio. Las estrategias como la reutilización o la remanufactura pueden reducir el uso de recursos y energía en la producción, dado que, estas estrategias dan lugar a un nuevo ciclo de vida.
Creación de valor	• El modelo circular ofrece a las economías desarrolladas una vía de crecimiento estable y resistente, una respuesta para reducir la dependencia de los recursos primarios y finitos, y una forma de atenuar la exposición a las crisis de precios de los recursos. La EC promueve el uso óptimo de recursos mediante el reuso, reparación, renovación, remanufactura, etc. de materiales, componentes y productos.
Creación de empleo	• La adopción de la economía circular, cuyo desarrollo debe ser llevado a cabo mediante el uso obligado y generalizado de sistemas de producción, distribución y servicios supeditados al uso de dichas tecnologías, puede contribuir al fomento del empleo, tanto desde el punto de vista cuantitativo como cualitativo.
Innovación	• Todo proceso de ecoinnovación se desarrolla estimulando la colaboración entre empresas y entre diferentes sectores productivos, para así generar sinergias aprovechando el intercambio de opciones en las cuales se apliquen los principios de economía circular. Por ejemplo, ofrecer nuevos tipos de servicios (reparación, renovación, otros).

Fuente: Adaptado de Instituto Técnico Español de Limpieza, 2017.

Tabla 3. Ventajas ambientales de la economía circular

Gestión equilibrada de los recursos naturales	• La economía circular constituye una oportunidad para replantear el uso de los recursos naturales, ya que incentiva a mantener los materiales el mayor tiempo posible dentro del sistema, en vez de optar por nuevos materiales (materias vírgenes) extraídos de la naturaleza.
Reducción de emisiones de dióxido de carbono	• En Europa, a través de estudios llevados a cabo por diversos organismos, entre los cuales destaca la Fundación Ellen MacArthur, se ha llegado a la conclusión que una senda de desarrollo económico circular podría reducir a la mitad las emisiones de dióxido de carbono al 2030, si se parte de la comparación con los niveles de emisión actuales.
Consumo de materias primas	• Estudios específicos estiman que, orientando la producción por la senda del desarrollo económico circular es posible reducir el consumo de materias primas en un 32 % al 2030, y en un 53 % al 2050 con respecto a la actualidad..
Productividad y calidad del suelo	• Aplicando los principios de la economía circular es posible incrementar la productividad del suelo, reducir los residuos en la cadena de valor de la alimentación, y recuperar el valor de la tierra y del suelo como activos, al devolverles los nutrientes mediante la acción espontánea de los mecanismos naturales y resilientes de los ciclos ecológicos.
Reducción de externalidades negativas	• La economía circular propicia la gestión eficaz de las externalidades negativas, tales como el mal uso del suelo, la contaminación acústica, del aire y del agua, el vertido de sustancias tóxicas, y el cambio climático.

Fuente: Adaptado de Instituto Técnico Español de Limpieza, 2017.

Tabla 4. Ventajas empresariales de la economía circular

Incremento de la productividad y de la competitividad	• Eliminar residuos de la cadena industrial mediante la reutilización de los materiales, componentes y productos a su máximo, permite a las empresas reducir los costos de producción y la dependencia de los recursos primarios.
Generación de beneficios	• La adopción de enfoques de economía circular en relación con la manufactura de productos complejos de duración media y de bienes de consumo de alta rotación, puede contribuir a muchas mejoras.
Reducción de la volatilidad e incremento de la seguridad de los suministros	• El paso a la economía circular supone un menor uso de materias primas vírgenes y un mayor uso de insumos reciclados, lo que reduce la exposición de las empresas a los precios de las materias primas, cada vez más volátiles, y genera mayor resiliencia ante esta situación.
Generación de demanda de nuevos servicios empresariales	• Logística inversa que aumenta la vida útil de los productos que se reintroducen en el sistema. • Comercialización a través de plataformas que permitan prolongar la vida útil y la reutilización de los productos, y que faciliten la reincorporación de residuos y subproductos a los circuitos de fabricación (por ejemplo, simbiosis industrial).
Estímulo de mayor interacción con los clientes	• Las soluciones circulares ofrecen a las empresas nuevas formas para interactuar con los clientes. Estos esquemas comerciales ofrecen a las empresas la oportunidad exclusiva de poder conocer las pautas de uso que pueden conducir a un ciclo virtuoso de productos mejorados, un mejor servicio y una mayor satisfacción del cliente.

Fuente: Adaptado de Instituto Técnico Español de Limpieza, 2017.

Tabla 5. Ventajas sociales de la economía circular

Incremento de la renta disponible	• El desarrollo económico circular puede incrementar de modo significativo la renta disponible de una familia media como resultado de la reducción del costo de los productos y servicios, y de la conversión de tiempo improductivo en productivo.
Aumento de la calidad y reducción del precio	• Las mejoras del beneficio económico para los clientes pueden obtenerse aprovechando la mejor relación calidad / precio que ofrecen los modelos circulares.
Reducción de la obsolescencia	• Los productos fabricados para alargar su vida útil o para ser reutilizados repercuten en los presupuestos de los ciudadanos y en su calidad de vida.
Mejoras en prevención, seguridad y salud ambiental	• Los efectos del cambio climático, la necesaria transición hacia una economía baja en carbono, las innovaciones tecnológicas y de los procesos de producción, el crecimiento demográfico o los cambios en los modelos de consumo, están provocando situaciones que causan impactos sociales y riesgo de profundas desigualdades.

Fuente: Adaptado de Instituto Técnico Español de Limpieza, 2017.

Capítulo 2: Cadena de valor y proceso productivo en el sector fundición

2.3. Cadena de valor del sector fundición

La cadena de valor en la industria de fundición de metales describe el conjunto de actividades interrelacionadas que se llevan a cabo para producir un producto de fundición, desde la adquisición de materias primas hasta la entrega del producto final al cliente. Cada etapa de la cadena de valor agrega valor al producto antes de pasar al siguiente eslabón de la cadena. A continuación, se describe una cadena de valor típica en la industria de fundición de metales (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

1. **Adquisición de materias primas:** La cadena de valor comienza con la adquisición de las materias primas necesarias para la fundición de metales, las cuales incluyen principalmente metales en forma de lingotes o chatarra, así como otros materiales como fundentes y aleaciones, arena sílice para moldes.
2. **Preparación de materias primas:** En esta etapa, las materias primas se preparan para su uso en el proceso de fundición. Esto puede implicar la clasificación, limpieza y acondicionamiento de la chatarra metálica, así como la preparación de aleaciones específicas según las especificaciones del producto final. La calidad de la chatarra a fundir es importante para el proceso, no solo por su composición metálica; sino también por las impurezas que pueden contener (recubrimientos, plásticos, grasas, etc.) que producen emisiones de COP-NI en la fundición.
3. **Fusión:** En esta fase, las materias primas se funden en hornos a altas temperaturas para convertirlas en un metal líquido. Los hornos pueden funcionar con electricidad o un combustible. La energía puede representar una parte sustancial del costo total de producción y depende de factores como: tipo de fundición, eficiencia del horno, tipo de metal o aleación, tamaño y complejidad de las piezas a fundir, costo de la energía, prácticas operativas del horno.
4. **Moldeo y colada:** El metal líquido se vierte en moldes previamente preparados para dar forma al producto final. Los moldes pueden ser de arena, coquilla u otros materiales, dependiendo de la aplicación específica.
5. **Enfriamiento y solidificación:** Una vez que el metal se vierte en el molde, se enfría y solidifica, tomando la forma deseada del producto final. Esta fase puede requerir un control cuidadoso de las temperaturas y los tiempos de enfriamiento para obtener las propiedades deseadas.
6. **Desmoldeo y acabado:** Después de la solidificación, se retira el producto del molde. Luego, el producto se somete a procesos de acabado, como limpieza, corte, rectificado, tratamiento térmico, mecanizado y pintura, según las

especificaciones del cliente. Si se emplea moldes de arena, el desmoldeo produce grandes cantidades de arena usada que puede valorizarse o aprovecharse en gran parte si se cuenta con sistemas de recuperación, en caso contrario las arenas se convierten en residuos a disponer.

7. **Control de calidad:** Se llevan a cabo pruebas y controles de calidad para garantizar que el producto cumpla con los estándares requeridos. Esto puede incluir pruebas de integridad estructural, pruebas de dureza, pruebas no destructivas y otras verificaciones de calidad.

En una fundición ferrosa puede haber no conformidades por defectos como inclusiones, porosidades, grietas, dimensiones fuera de tolerancia, irregularidades en la superficie entre otros; siendo un problema porque las piezas defectuosas tienen que volver a fundirse, habiéndose gastado energía, materiales y horas de labor.

8. **Embalaje y distribución:** Una vez que el producto ha pasado las pruebas de calidad, se embala adecuadamente y se envía al cliente final o al siguiente eslabón de la cadena de suministro.
9. **Servicio postventa y soporte técnico:** En algunos casos, la cadena de valor también puede incluir servicios postventa, como mantenimiento, reparación y soporte técnico para los productos de fundición de metales.

Cada una de estas etapas en la cadena de valor agrega valor al producto final y contribuye a la eficiencia y calidad del proceso de fundición de metales. La gestión eficaz de esta cadena es fundamental para el éxito en la industria de fundición de metales.

Figura 7. La cadena de valor en la industria de fundición de metales



2.4. Proceso productivo

Las industrias de fundición se clasifican como ferrosas y no ferrosas:

- Fundiciones ferrosas: Usan como insumo básico la chatarra de acero, que es el residuo más reciclado en el mundo y puede serlo un número ilimitado de veces sin perder mucha calidad.
- Fundiciones no ferrosas: Usan como insumos básicos varios metales, para cada tipo de fundición, como el aluminio, el cobre, el magnesio, el plomo, el estaño, el zinc y el níquel, de los cuales el aluminio es el material más reciclado.

Las fundiciones ferrosas son las de mayor producción en el Perú. En la **Figura 8** se muestra un diagrama de flujo de entradas y salidas de materiales en el proceso de fundición ferrosa, y a continuación se explica brevemente las etapas de dicho proceso, siendo similar en el caso de las fundiciones no ferrosas, lo cual se acota cuando corresponda.

En pocas palabras el proceso parte de un material metálico de composición adecuada que se funde en un horno y luego se vierte en un molde con la forma deseada, luego del desmoldeo, se procede a la mecanización final de la pieza y a su tratamiento térmico, siendo finalmente embalado el producto final.

Recepción de materias primas e insumos:

Se recibe la chatarra y aleaciones de hierro en un patio de chatarra, donde se realiza la selección y la reducción de tamaño mediante soldadura, oxicorte y cizalla, según se requiera, operaciones que producen emisiones de gases, humos, polvo y ruido. Luego el metal cortado convenientemente se traslada en montacargas hacia los hornos para su fundición.

También se reciben otros insumos para el proceso de fundición como arenas, resinas, químicos, fundentes, maderas para embalaje. Estos materiales, en gran parte envasados, producen residuos sólidos de envases y embalajes, bolsas, restos de madera, etc.

En las fundiciones no ferrosas las materias primas principales son las barras de metales de alta pureza, en algunos casos chatarra del metal correspondiente y adiciones para la fundición.

Fusión y afino del metal:

El metal y/o la chatarra se carga en los hornos en forma manual y también con tecla. En el Perú usualmente se emplea seis tipos de hornos para fundición de metales en función del metal y la cantidad de carga a fundir (ver detalles en la **Tabla 6**):

- Fundición ferrosa: hornos de inducción y hornos de arco. Antiguamente se usaba el horno de cuba.
- Fundición no ferrosa: hornos de crisol, hornos de reverbero, hornos de eje.

Típicamente la chatarra ferrosa se funde a una temperatura entre 1350 a 1600°C en función de la composición del producto, con un tiempo de fusión de 1.5 a 2 horas. Otros metales se funden a menor temperatura tales como 1083°C (cobre), 420 °C (zinc), 657°C (aluminio), 232°C (estaño).

Antes de la colada se toma una muestra del metal fundido (cupón) para su análisis inmediato en laboratorio, en función de lo cual se añade correctores, hasta lograr la composición deseada.

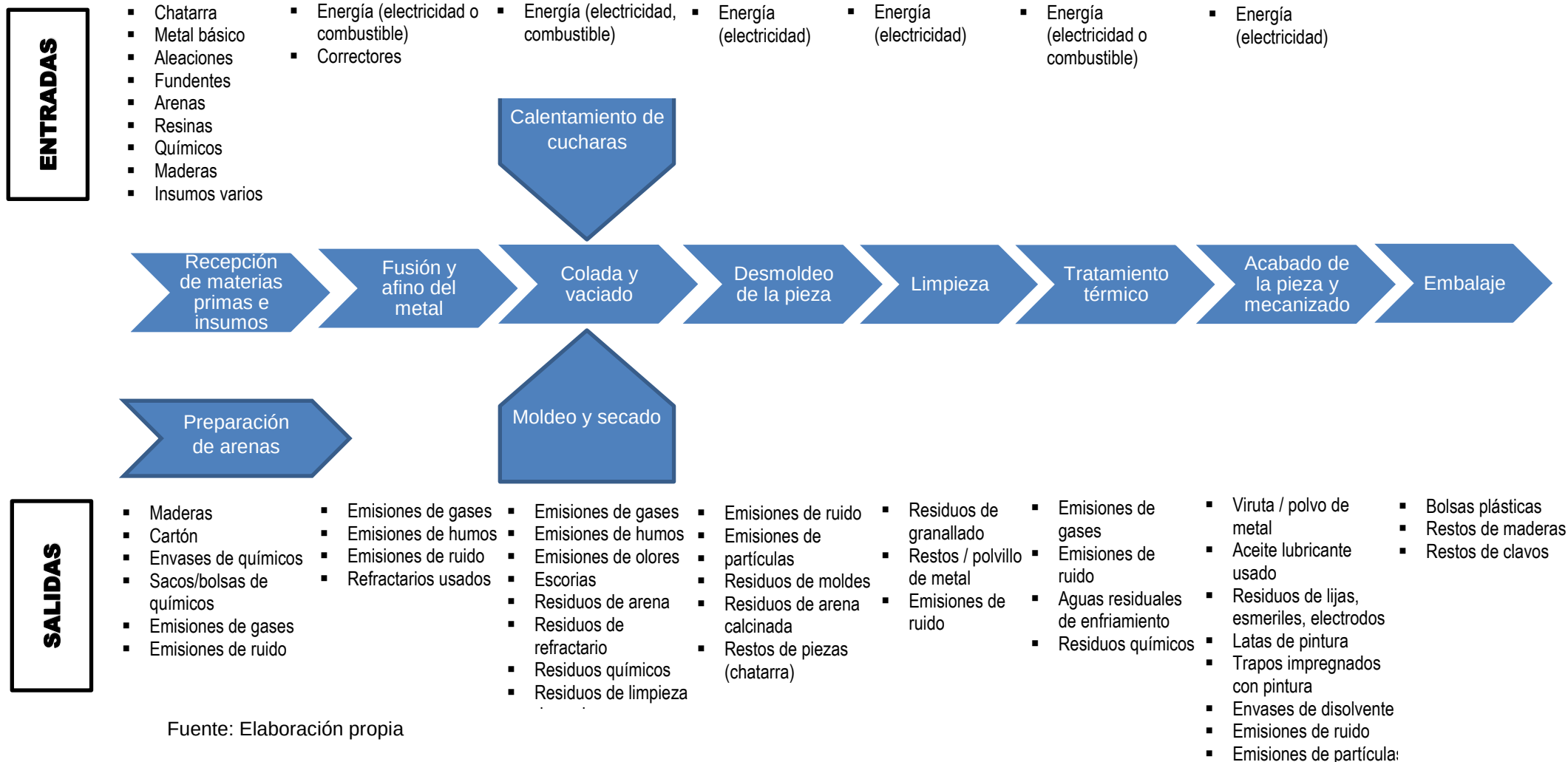
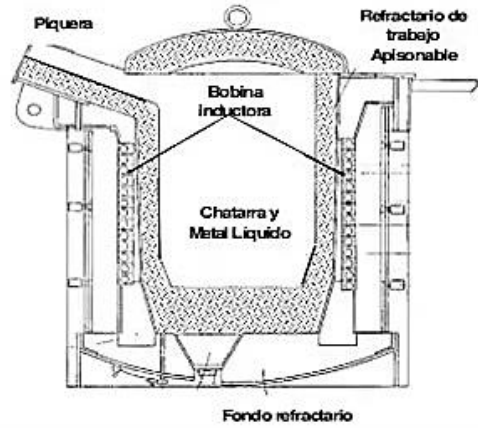
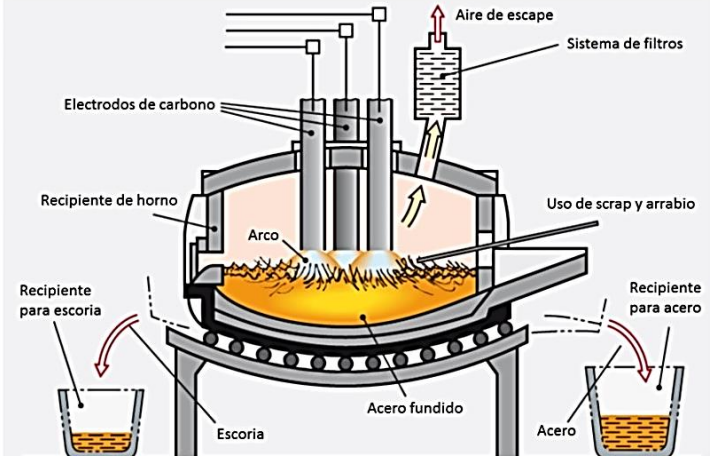
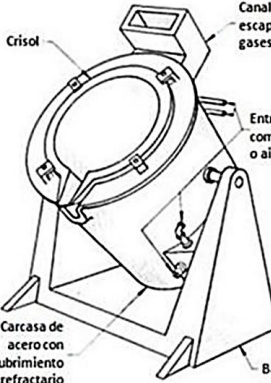
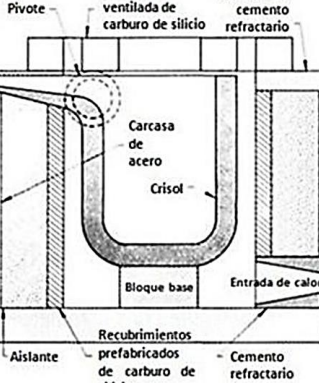
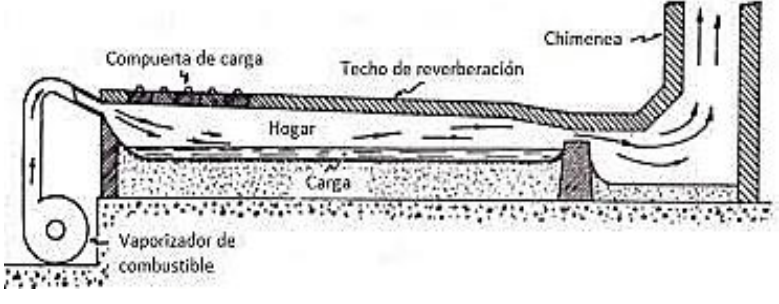
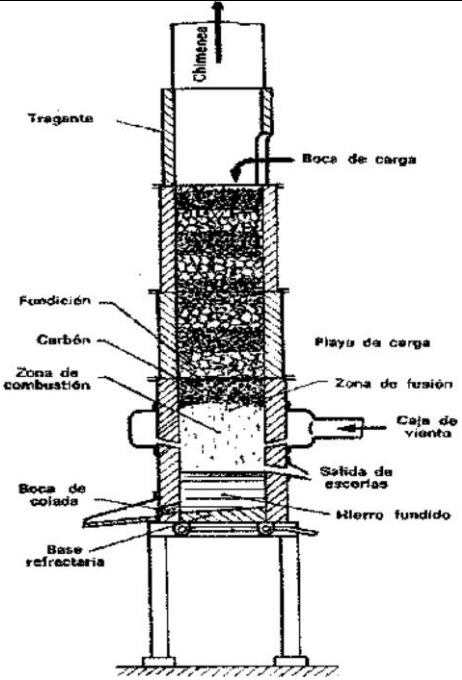
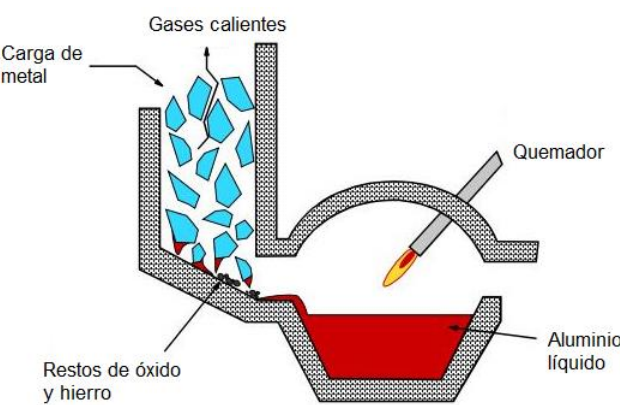


Figura 8. Entradas y salidas de materiales en el proceso de la industria de fundición

Tabla 6. Tipos comunes de hornos de fundición en el Perú

HORNOS DE INDUCCIÓN: Utilizan la inducción electromagnética para calentar el metal. El horno incluye una bobina de cobre para crear un campo magnético que genera una corriente eléctrica en el metal que provoca su calentamiento hasta fundirlo. Son muy eficientes y se utilizan para fundir metales como el acero, el hierro y el aluminio. Tienen una eficiencia energética que varía entre 50 al 76%, dependiendo mucho del metal.	
HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO: Utilizan un arco eléctrico para calentar el metal. El horno incluye dos electrodos por los que circula corriente eléctrica creando un arco entre ambos, generando intenso calor que funde el metal. Son muy versátiles y se utilizan para fundir una amplia variedad de metales, desde acero inoxidable hasta titanio. Tienen una eficiencia energética del 35 al 45%	
HORNOS DE CRISOL: Los hornos de crisol son hornos de combustión directa que utilizan un crisol para contener el metal y un quemador para proporcionar el calor necesario. Estos hornos son adecuados para fundir metales como el aluminio, el bronce y el latón. Son fáciles de usar y ofrecen un buen control de la temperatura. Tienen una eficiencia energética muy baja de solo 7 al 19%.	(a)  (b) Horno basculante (b)  (b) Horno fijo
HORNOS DE REVERBERO: Utilizan la radiación de las paredes del horno para calentar el metal que se coloca en el hogar del horno, siendo las paredes calentadas por una llama de combustión. Se usan para fundir metales como el cobre, aluminio, el plomo y el estaño. Tienen una eficiencia energética baja de 20 al 25%.	

<u>HORNOS DE CUBA:</u> Los hornos de cuba (también llamados de cubilote) son de construcción cilíndrica con una cubierta exterior de acero y recubiertos interiormente con ladrillos refractarios, pudiendo llegar hasta una altura de 6 m. El horno se carga con capas de carbón o coque y el metal (lingotes o chatarra) lo que permite un buen intercambio de calor por el contacto directo. El aire para la combustión del carbón es suministrado por un ventilador a través de una caja de viento. Tiene una abertura en la parte baja llamada boca de escorias y otra más baja para la colada por donde sale el metal fundido. Hay cubas donde se utiliza gas como combustible. Presentan la eficiencia más alta de todos los hornos, normalmente del 40 al 45 %.	
<u>HORNOS DE EJE:</u> Los hornos de eje sólo se utilizan para fundir metales no ferrosos, principalmente aluminio. Se trata de un horno vertical sencillo con solera colectora (dentro o fuera del horno) y sistema de quemadores de gas en el extremo inferior, y sistema de carga de material en la parte superior. Los gases de combustión normalmente se extraen y depuran. Puede alcanzar una eficiencia térmica del 50%	

En la superficie del metal fundido se forma una escoria que debe ser eliminada antes de la colada y evitar que llegue al molde, para lo cual se adiciona caliza que reacciona con las impurezas y las funde a baja temperatura para así removerlas. Las escorias conforman un residuo sólido que debe ser adecuadamente dispuesto y en condiciones ambientalmente seguras.

Los hornos de fusión son una importante fuente de emisiones de gases y partículas a la atmósfera, ya sea a través de chimeneas o como emisiones fugitivas:

- Emisiones de gases de combustión como los óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y partículas (hollín) en los quemadores de combustibles (gas, diésel, etc.) que emplean los hornos de crisol y de reverbero, las cuales se descargan por chimeneas a la atmósfera.
- Emisiones de partículas en la forma de humos, por la oxidación de vapores de metales o la condensación de los vapores de metales, los cuales son

emitidos fugitivamente a la atmósfera por bocas de alimentación, en la transferencia en cucharas o en la colada.

- Emisiones de contaminantes orgánicos persistentes no intencionales (COP-NI) que son compuestos químicos órgano halogenados, como dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF), clorobenzenos y bifenilos policlorados (PCB). Se producen de forma no intencional en los hornos durante la fundición de chatarra que puede estar contaminada con aceites, grasas, recubrimientos, pinturas, etc. y haber presencia de cloro en algún material junto con la chatarra. Los COP-NI cuando se liberan persisten en el ambiente, se acumulan en organismos vivos y plantean un riesgo para la salud y el ambiente.

En muchos casos la contaminación ocurre cuando en la planta no se cuenta con sistemas de captación y depuración de partículas, tales como campanas de extracción, ciclones, filtros de mangas o lavadores de gases (scrubbers).

Los hornos de fusión también emiten ruido al ambiente, especialmente los hornos de arco durante la descarga eléctrica; asimismo los hornos de inducción producen ruido de alta frecuencia. Otras fuentes de ruido son los ventiladores de los hornos de crisol y de reverbero.

Como residuo principal de los hornos de fusión, son los refractarios usados que deben retirarse cada cierto tiempo.

Preparación de arenas:

La preparación de la arena se realiza en un molino en el cual se añaden tanto la arena como el agua y el resto de los componentes que se estimen (arcilla o bentonita, resina, catalizador, etc.) y se remueve la mezcla hasta que adquiere el tamaño de grano y el nivel de consistencia deseado. El movimiento de los materiales granulados producen emisiones de partículas fugitivas al ambiente.

El funcionamiento mismo del molino y los accionamientos mecánicos del sistema, producen emisiones de ruido hacia el ambiente.

Dado que se emplean diversos aditivos en la preparación de la arena, se generan residuos sólidos de los envases de dichos insumos.

Moldeo y secado:

Primero se construyen los modelos de la pieza con madera, que son utilizados para la elaboración del molde donde se vaciará el metal líquido para obtener la pieza fundida. Luego la arena preparada se vierte y compacta alrededor del modelo dentro de una caja, dejándose secar. Se genera el molde con la cavidad que tiene la forma y tamaño de la pieza a producir. El molde se protege con pintura refractaria para evitar el arrastre de la arena durante el vertido del metal líquido. Este tipo de moldes son transitorios y se usan una sola vez.

Los procesos de formación de moldes y machos son diferentes y generalmente se dividen en dos categorías principales: (i) moldeo en arena verde, que implica

el uso de arena mezclada con un aglutinante adecuado (generalmente arcilla de bentonita), aditivos carbonosos y agua; (ii) moldeo en arena químicamente aglomerada, que consiste en el uso de arenas y compuestos químicos como resinas fenólicas de uretano, resinas de fenólicas de formaldehído, furano.

En el caso de fundiciones no ferrosas, donde los puntos de fusión del metal son mas bajos que el hierro, muchas veces se emplean moldes permanentes de hierro fundido o acero, los cuales pueden reusarse muchas veces.

En el moldeo con arena se producen emisiones de olores por desprendimiento de gases/vapores de las resinas aglomerantes, en la aplicación de recubrimientos y pinturas, así como en el curado de las mezclas de arena con resinas por aire, calor o gas.

También se producen residuos de envases de los productos químicos usados en el moldeo, residuos de limpieza de moldes y de materiales usados.

Calentamiento de cucharas:

La cuchara revestida de refractario donde se recibirá el metal fundido debe ser calentada previamente para que el metal caliente no se enfríe demasiado antes de llevarlo a los moldes.

Por lo general el calentamiento de la cuchara se realiza con una llama de gas hasta una temperatura de unos 1000 °C. La combustión del gas produce emisiones como NOx y CO principalmente que se liberan en forma abierta a la atmósfera.

Colada y vaciado:

Una vez vertido el metal fundido en la cuchara refractaria, se transporta hasta los moldes ubicados a corta distancia del horno, donde se vierte el metal a través de alimentadores, adoptando la forma de la cavidad del molde, donde el metal permanece entre 24 a 48 horas.

Al verter el metal fundido en los moldes, que contienen aditivos para ligar la arena, se generan productos de reacción y descomposición tanto inorgánicos como compuestos orgánicos volátiles (VOC), incluso durante el enfriamiento de los moldes, los cuales se liberan a la atmósfera. Los VOC, combinados con los NOx emitidos por otras fuentes, pueden contribuir a la formación de smog, un tipo de contaminación que afecta negativamente la calidad del aire y puede tener efectos perjudiciales en la salud humana y en los ecosistemas.

Desmoldeo de la pieza:

El desmoldeo de las piezas fundidas se realiza con la separación de las arenas del molde de las piezas metálicas mediante vibración o impacto.

Se realizan cortes para eliminar las entradas y canales de alimentación de la pieza y las mazarotas, usándose para ello soplete, golpes con martillo, electrodos de arco-aire.

Las piezas fundidas seguirán el resto del proceso, y las arenas del molde se destinarán a recuperación o constituirá un residuo, dependiendo si se cuenta o no con equipos de recuperación.

Durante el desmoldeo se producen emisiones de partículas por el impacto en el desmoldeo de la pieza fundida, además de emisiones de ruido al ambiente, También se siguen produciendo emisiones residuales de VOC hacia la atmósfera.

El sistema de recuperación de arena consiste de una zaranda (separación primaria), donde se alimenta los trozos de moldes, y luego por un equipo donde se logra la separación de la arena reutilizable gruesa, de la arena con granulometría fina. La arena de granulometría gruesa vuelve a emplearse en el proceso, mientras que la de granulometría fina es separada y almacenada como residuo sólido. Dicho sistema produce emisiones de partículas (captadas en filtros) y emisiones de ruido al ambiente.

Limpieza:

Las piezas fundidas en estado bruto se recogen y se introducen en una granalladora, donde se eliminan restos de arena adheridos a las piezas. Dicha operación produce emisiones de ruido al ambiente y también residuos del material del granallado ya gastado, así como residuos de polvillo de metal.

Tratamiento térmico:

La pieza fundida en bruto puede ser sometida a un tratamiento térmico (normalizado, recocido, temple o revenido) que en el caso de metales ferrosos es entre 750 a 1000°C por varias horas con el fin de alcanzar las características mecánicas de resistencia, dureza y tenacidad del metal. Se emplea hornos de calentamiento a gas natural o eléctricos. Luego del tratamiento térmico, las piezas son enfriadas en pozas de agua o con chorros de aire.

En los hornos de tratamiento térmico que queman gas se producen emisiones de gases de combustión, principalmente NOx y CO que se descargan por chimenea a la atmósfera. También hay emisiones de ruido en el caso de los ventiladores de los quemadores de los hornos de tratamiento térmico.

En el caso de enfriamiento de piezas tratadas en pozas de agua, eventualmente se cambian y se producen aguas residuales hacia el alcantarillado. Asimismo, las torres de enfriamiento producen purgas que van hacia el alcantarillado.

Acabado de la pieza:

En función del tamaño de la pieza, se realizan operaciones de corte, desbaste (eliminación de rebabas mediante oxicorte y cincelado) y esmerilado para conseguir las dimensiones requeridas; asimismo, se realizan reparaciones mediante soldadura.

Dichas operaciones de acabado producen emisiones de ruido por el uso de herramientas diversas, así como emisiones de partículas por el impacto y desgaste de superficies. Se producen una serie de residuos de metal (aprovechable), residuos de lijas, esmeriles usados, electrodos de soldadura de relleno de piezas, latas, restos de pintura, envases de disolventes, trapos, entre otros.

Mecanizado:

Cuando la pieza lo requiere, se somete a un mecanizado realizando trabajos de corte de metales, tales como: torneado, taladrado, fresado, escariado, roscado, brochado, rectificado, pulido, cepillado, corte y conformado. Se aplican fluidos (agua, aceites, etc.) para facilitar el corte.

Se producen emisiones de ruido por el mecanizado de piezas, asimismo residuos como viruta, aceite lubricante usado.

Embalaje:

Las piezas terminadas se embalan usando envolturas de plástico y se despachan dentro de cajas de madera que se ensamblan en el sitio de acuerdo a las dimensiones de las piezas. En este caso se producen residuos de bolsas plásticas, restos de madera de embalaje y clavos deformados.

2.5. Servicios auxiliares

Los servicios auxiliares de importancia para el proceso en una fundición son los siguientes:

Suministro de electricidad: dado por la empresa distribuidora local o directamente por el generador, en función de la potencia contratada.

Suministro de combustibles: pudiendo ser Diésel B5, GLP o gas natural en función de las necesidades o disponibilidad en la zona de la planta, abastecidos por un distribuidor. Los dos primeros se almacenan en tanques y el gas natural se suministra por red.

Suministro de agua: la fuente puede ser agua de pozo o agua de red, en función de la disponibilidad local. Se almacena en tanques.

Suministro de aire comprimido: se genera en compresores de aire instalados en una sala de máquinas de la propia planta y distribuido por red interna.

Ventilación y tratamiento de gases: conformado por un conjunto de dispositivos que se utilizan para controlar la emisión de gases y partículas al ambiente durante el proceso de fundición. Los sistemas de ventilación se encargan de extraer los gases y partículas generados en los hornos y otras máquinas o puntos de operaciones del proceso de fundición, y transportarlos a través de conductos hasta los equipos de tratamiento de gases para depurarlos antes de liberarlos al ambiente. Los sistemas de ventilación y tratamiento de

gases pueden incluir campanas de extracción, ventiladores, ciclones, filtros de mangas, lavadores de gases o Scrubbers.

2.6. Indicadores energéticos

Según datos de auditorías energéticas en 17 fundiciones europeas en el marco del Foundrybench Project (2012), los consumos específicos de energía y la participación de la energía en las distintas operaciones del proceso es como se muestra en las **Tablas 7 y 8**, habiendo variaciones según la tecnología de producción, calidad del acero y fundiciones y del tratamiento térmico.

Tabla 7. Consumo específico de energía en fundiciones

Indicador	Tipo de fundición		
	Fundición de hierro	Fundición de acero	Fundición no ferrosa
Energía/tonelada (MWh/t)	2.5	5-8	4-10
Costo energético del valor de producción (%)	5-8	6-11	4-8

Fuente: Foundrybench Project (2012)

Tabla 8. Uso de energía por operación en fundiciones

Operación	Participación de la energía (%) y rango (+/-%)		
	Fundición de hierro	Fundición de acero	Fundición no ferrosa
Fusión	55+/-10	45+/-5	65+/-10
Tratamiento térmico	1+/-1	25+/-2	-
Motores	12+/-4	9+/-2	11+/-5
Compresores de aire	7+/-3	5+/-2	5+/-3
Pre calentamiento de cucharas	4+/-2	4+/-2	3+/-2
Ventilación	14+/-5	7+/-5	10+/-8
Calefacción	3+/-2	2+/-1	3+/-2
Iluminación	4+/-1	3+/-1	3+/-1
Total	100	100	100

Fuente: Foundrybench Project (2012)

Capítulo 3: Estrategias y medidas de economía circular para la industria de fundición

La aplicación de la economía circular en las **cadena de valor** productivas, debe ponerse en marcha desde una mirada amplia e integral, para que los beneficios económicos, ambientales y sociales sean efectivos. En ese sentido, los negocios vinculados con la cadena de valor del sector fundición, deben considerar aspectos como la procedencia de sus materias primas e insumos, el flujo de materiales y energía de sus procesos, así como los impactos del consumo y post-consumo de los bienes y servicios asociados.

También es necesario que los negocios identifiquen los actores clave con los que puedan **colaborar y cooperar** para que la cadena de valor sea cada vez más circular. Deben considerar la multiplicidad de actores privados, públicos, académicos y de la sociedad civil, locales, nacionales e internacionales, que pueden ser parte de la misma cadena de valor o de otras en donde se identifiquen estas oportunidades de colaboración.

La **guía de economía circular para la industria de fundición**, pone a disposición **12 estrategias** de economía circular, incluyendo una serie de **medidas** que les permitirá a las empresas de fundición -micro, pequeñas y medianas- la aplicación concreta del enfoque de la economía circular, e incluye la descripción de casos nacionales e internacionales que ilustran de manera práctica una o más medidas de la estrategia planteada. Las **12 estrategias** corresponden a la metodología Circular Design Thinking de la empresa 3Vectores, las cuales incluyen el enfoque “9R” y marco ReSolve, entre otros (ver Tabla 9).

Tabla 9. Estrategias de Economía circular y el enfoque 9R y ReSOLVE

Nº	Estrategias de EC	Enfoque 9R	Acciones ReSOLVE
1	Ecodiseño	R0, R1, R2, R9	Regenerar, Optimizar, Intercambiar
2	Biodiseño		Regenerar
4	Logística inversa	R6	Cerrar
5	Simbiosis industrial	R7	Cerrar
6	Industria 4.0		Optimizar, Virtualizar
7	Uso compartido		Compartir
8	Segundo uso	R3, R5	Compartir, Cerrar
9	Comunidades locales		
10	Reciclaje	R8	Cerrar
11	Servitización		
12	Reparación	R4	Cerrar

En la Tabla 10 se muestra las **12 estrategias** que se desarrollan en este capítulo y sus respectivas medidas de implementación para la industria de fundición:

Tabla 10. Listado de estrategias de EC y sus medidas de implementación en la industria de fundición

Nº	Estrategias de EC	Breve descripción de la estrategia	Medidas asociadas	Etapas de la cadena productiva con potencial de aplicación de la medida	Fuente
1	Ecodiseño	Se plantea evaluar todo el ciclo de vida, identificando oportunidades de mejora en el diseño de los procesos e incorporando medidas preventivas en una o más etapas	1.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para determinar las opciones de reducción del consumo de arena de fundición y sus impactos en la cadena de suministro	Moldeo	(a)
			1.2 Selección del horno más eficiente	Fusión y afino	(b)
			1.3 Selección del calentador de cuchara más eficiente	Calentamiento de cucharas	Propio
			1.4 Manejo ecoeficiente de aspectos ambientales	Todo el proceso	(d)
			1.5 Control de calidad de chatarra	Recepción de materiales	(h)
2	Biodiseño	Se busca que los productos, al final de su vida útil, no se transformen en residuos, sino que, al estar basados en materiales e insumos de naturaleza biológica, estos puedan degradarse y/o compostarse como materia orgánica	2.1 Recubrimientos de moldes y machos	Moldeo	Propio
			2.2 Modelos y patrones impresos en 3D	Moldeo	Propio
			2.3 Lubricantes y desmoldantes	Moldeo	Propio
3	Intercambio	Consiste en implementar los cambios necesarios para reemplazar materiales, fuentes de energía, procesos o tecnologías, por otros que permitan optimizar y ahorrar recursos, en las diferentes etapas de la cadena de valor	Medidas en eficiencia energética:		
			3.1 Mejora de la eficiencia térmica de hornos	Fusión y afino	(b)
			3.2 Manejo de la demanda pico en hornos de inducción	Fusión y afino	(b)
			3.3 Control y automatización del horno	Fusión y afino	(b)
			3.4 Mejorar precalentamiento de cucharas	Calentamiento de cucharas	(b)
			3.5 Combustión Oxy-Fuel en quemadores	Fusión y afino	(b)
			3.6 Precalentamiento de chatarra	Fusión y afino	(b), (g)
			3.7 Precalentamiento del aire de combustión	Fusión y afino	(b), (c)
			3.8 Optimización del sistema de aire comprimido	Servicios auxiliares	(b)
			3.9 Uso de motores eficientes	Servicios auxiliares	(e)
			3.10 Uso de variadores de frecuencia	Servicios auxiliares	Propio
			Medidas en reemplazo de energía:		
			3.11 Reemplazo de montacargas Diesel/GLP por eléctricos	Servicios auxiliares	Propio
			3.12 Aplicación de energía solar	Servicios auxiliares	Propio
			Medidas en eficiencia de materiales:		
			3.13 Minimización del consumo de resina y aglutinante	Moldeo	(b)

Nº	Estrategias de EC	Breve descripción de la estrategia	Medidas asociadas	Etapa de la cadena productiva con potencial de aplicación de la medida	Fuente
			3.14 Recuperación mecánica de arena	Moldeo	(b)
			3.15 Recuperación térmica de arena	Moldeo	(b)
			3.16 Minimización de formación de escoria	Fusión y afino	(b)
			3.17 Mejora del rendimiento de la fundición y reducción de la chatarra	Fusión y afino	(b)
4	Logística inversa	Tiene como finalidad el retorno de los productos y materiales luego de una actividad productiva o del consumo final, con el objetivo de reducir la pérdida de estos materiales.	4.1 Recogida de chatarra	Posconsumo	Propio
			4.2 Retorno de embalajes y envases	Posconsumo	Propio
			4.3 Reparación y remanufactura	Posconsumo	Propio
5	Simbiosis industrial	Busca reunir a empresas en colaboraciones de mutuo beneficio, en la valorización o aprovechamiento de residuos de una empresa y su utilización como insumo en otra.	5.1 Intercambio de residuos	Manejo de residuos	Propio
			5.2 Colaboración en investigación y desarrollo	Logística	Propio
6	Industria 4.0	Hace referencia a los sistemas de producción inteligentes y conectados que, hacen posible las nuevas tecnologías, especialmente con el mayor uso de la automatización y los intercambios de datos.	6.1 Fundición a presión inteligente	Fusión y afino	(f)
			6.2 Automatización de fundición mediante IA	Fusión y afino	(f)
			6.3 Soluciones inteligentes para la cadena de suministro	Logística	(f)
			6.4 Automatización de equipos de fundición	Fusión y afino, moldeo, logística	(f)
7	Uso compartido	Capacidad de brindar acceso a productos, equipamiento, espacios, y otros recursos, maximizando su utilización, en la modalidad de contrato entre empresas, alquiler, suscripción o uso recurrente.	7.1 Compartir maquinaria de fundición	Logística	Propio
			7.2 Compartir recursos de logística	Logística	Propio
			7.3 Alquiler conjunto de almacenes	Logística	Propio
8	Segundo uso	Se busca reutilizar productos, materiales o recursos para una finalidad similar a la original, en lugar de desecharlos, reduciendo así la generación de residuos	8.1 Reutilización de equipos	Posconsumo	Propio
			8.2 Venta de excedentes	Posconsumo	Propio
9	Comunidades locales		9.1 Entrega de residuos aprovechables a recicladores formales en el marco del programa RECICLA para su valorización	Manejo de residuos	Propio

Nº	Estrategias de EC	Breve descripción de la estrategia	Medidas asociadas	Etapa de la cadena productiva con potencial de aplicación de la medida	Fuente
		Busca fortalecer y empoderar a las comunidades locales, priorizando lo que se encuentra disponible a nivel local.	9.2 Contratación de trabajadores de las zonas aledañas a la empresa.	Toda la cadena productiva	Propio
10	Valorización	La estrategia propone valorizar residuos del proceso de fundición, tanto dentro de la planta como externamente, reduciendo así la dependencia de las materias primas vírgenes o la disposición final de residuos	10.1 Reciclaje interno de chatarra	Fusión y afino	(b)
			10.2 Reciclaje interno de arena de machos aglomerada con resinas	Moldeo	(b)
			10.3 Reciclaje externo de residuos	Manejo de residuos	(b)
			10.4 Reciclaje externo de arenas usadas de moldeo	Manejo de residuos	(b)
11	Servitización	Busca ofrecer la experiencia de uso al cliente, quien paga por el tiempo de uso del producto y su rendimiento, no por el producto; mientras que el proveedor mantiene la propiedad del producto durante todo el ciclo de vida	11.1 Servicio de reciclaje y reposición	Consumo por el cliente	Propio
12	Reparación	Busca restituir la funcionalidad de un producto tras la aparición de un fallo o defecto, con lo cual se extiende su vida útil y se evita residuos.	12.1 Servicio de mantenimiento y reparación de piezas a clientes	Consumo por el cliente	Propio

Fuente: Elaboración propia.

(a) Environments. (2020). *Foundry Sand Source Reduction Options: Life Cycle Assessment Evaluation*. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2076-3298/7/9/66> (09 octubre 2023)

(b) European Comission. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Smitheries and Foundries Industry*. Draft 1 (February 2022). Recuperado de: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2022-02/SF_BREF_D1_web.pdf

(c) European Comission. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ferrous Metals Processing Industry*. Final Draft (October 2021). Recuperado de: https://aida.ineris.fr/sites/aida/files/documents-bref/FMP%20BREF_Final%20Version.pdf

(d) IFC. *Environmental, Health, and Safety Guidelines for Foundries*. 2007. Recuperado de: <https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/2000/2007-foundries-ehs-guidelines-en.pdf>

(e) CAF. *Guía para la evaluación de elegibilidad de financiación de proyectos de eficiencia energética* - Tipo de proyecto: Motores de alta eficiencia.

(f) General Kinematics. *Foundry Automation*. Recuperado de: <https://www.generalkinematics.com/blog/foundry-automation/> (24 octubre 2023)

(g) Promeos. *Porous burner technology*. Recuperado de: https://promeos.com/wp-content/uploads/2021/11/promeos_m.pot_Flyer_EN-1.pdf (27 octubre 2023)

(h) SiderSpot. *Proceso de Fabricación del Acero a Partir de Chatarra*. Recuperado de: <https://siderspot.com/wiki/proceso-de-fabricacion-del-acero-a-partir-de-chatarra/> (12 diciembre 2023).

3.1. Estrategia 1: Ecodiseño

El ecodiseño puede entenderse como la integración de los aspectos ambientales en el diseño y desarrollo del producto, con el objetivo de reducir los impactos ambientales negativos a lo largo de su ciclo de vida, es decir, desde la extracción de las materias primas hasta el final de su vida útil (ISO, 2011).

Considerando que gran parte de los impactos ambientales negativos de los productos se determinan en la fase de diseño, la estrategia plantea evaluar en todo el ciclo de vida las oportunidades de mejora en los procesos, e incorporar medidas preventivas en una o más etapas, traduciéndose así en reducción de costos y/o incremento de ingresos, como una ventaja competitiva para el producto. Siendo el ecodiseño una estrategia que plantea una mirada amplia de la cadena de valor, se pueden incorporar como parte de la misma, otras estrategias que se mencionarán en la guía.

La estrategia 1 de ecodiseño en el sector fundición, comprende principalmente las siguientes medidas:

Medida 1.1: Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para determinar las opciones de reducción del consumo de arena de fundición

El ACV es la recopilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un producto a lo largo de su ciclo de vida. Se puede utilizar el ACV como herramienta para determinar el impacto ambiental general de un producto, proceso o servicio, incluyendo no sólo los componentes principales del foco de estudio, sino también todos los impactos de los componentes previos y posteriores al foco. Se utiliza como herramienta de evaluación comparativa de dos procesos en competencia usando unidades comunes entre los dos procesos.

Se puede utilizar el ACV para un análisis comparativo de opciones tecnológicas de nuevos equipos de recuperación de arena tanto desde el punto de vista ambiental como económico. Ver Caso 1.

Caso 1: ACV para determinar las opciones de reducción del consumo de arena de fundición y sus impactos en la cadena de suministro

Información general:

Empresa	: En reserva
Ubicación	: Región del oeste medio de Estados Unidos
Tamaño de la empresa	: Mediana empresa
Actividad	: Fundición de acero
Etapas/proceso en que aplica	: Cadena productiva

Descripción:

El objetivo es examinar el sistema de manejo de arena desde una perspectiva del ciclo de vida y utilizar el análisis comparativo del ACV para evaluar opciones de reducción en la fuente, utilizando nuevos equipos de recuperación de arena tanto desde el punto de vista ambiental como económico.

El sistema de manejo de arena consta de los siguientes pasos:

- Adquisición de arena virgen, extracción y transporte a la fundición.
- Uso de la arena para formar moldes y machos para el proceso de fundición.
- Recuperación de arena y se reutiliza en una proporción fija.

La arena recuperada pasa nuevamente por el proceso de fundición, mientras que los residuos de arena de fundición (RAF) se dispone en un relleno, aunque existen algunas opciones de reutilización como material de construcción, relleno del suelo, pero en la region local no resultaron viables. Por ello se exploró tecnologías de recuperación de arena como método para reducir los residuos.

El objetivo de la recuperación de arena es reacondicionar la arena usada enfriándola, eliminando impurezas y clasificandola por tamaño de grano, con el fin de reutilizarla en la producción de nuevos moldes y machos.

La recuperación primaria se realiza en casi todas las fundiciones e incluye sacudida, separación magnética y otros procesos de clasificación a granel. La recuperación secundaria añade otros pasos que no son necesarios, pero pueden incluirse para aumentar la proporción de recuperación de arena. Ambos pueden clasificarse en términos generales como mecánicos y térmicos.

- Sistemas de recuperación mecánica: incluyen sistemas que vibran, golpean, usan depuración con aire u otros medios para devolver la arena a una condición utilizable en moldeo
- Sistemas de recuperación térmica: se emplea con frecuencia un lecho fluidizado de alta temperatura que puede alcanzar tasas de recuperación de casi el 100 %.

La recuperación por microondas es una tecnología emergente que utiliza microondas como fuente de energía para recuperar térmicamente la arena. Se ha demostrado que la recuperación por microondas alcanza tasas de recuperación similares a las de la recuperación térmica.

Datos de la fundición:

- La fundición produce aceros de alta aleación, aleaciones a base de níquel y aceros para herramientas.
- Obtiene su arena virgen de un proveedor ubicado a 692 km de distancia, utilizando camiones que transportan entre 10 y 15 toneladas por viaje.
- Para sus principales operaciones de moldes y machos utiliza un sistema a base de uretano fenólico sin horneado. La mezcla del molde consta de arena virgen, arena recuperada, resina en dos partes, un catalizador y óxido de hierro.
- Una vez vertido y enfriado el molde, se lo sacude para separar el acero de la arena. La pieza de acero sigue su proceso de acabado.
- El resto de la arena del molde inicia un proceso de recuperación, en el que se eliminan los compuestos orgánicos, el óxido de hierro y otros finos. La arena se recupera en un 80% en promedio, el resto se dispone en relleno.
- Se realizan dos operaciones principales de recuperación primaria: desgaste y separación magnética. Se obtiene una arena bien seleccionada, pero con una pequeña cantidad de aglutinante y otros finos que quedan en la superficie. Los RAF se llevan a un relleno a 43 km de la fundición.

Tecnologías para reducir el consume de arena:

Para aumentar la recuperación de arena se podría agregar una tecnología secundaria, para ello se estudiaron y compararon tres tecnologías diferentes, utilizando el indicador de pérdida por ignición (IPI), que para una muestra de arena es la diferencia porcentual del antes y después de una fase de ignición prolongada que permite la eliminación de todas las sustancias volátiles. El IPI de una arena virgen oscila entre 0,3 y 1,5 %, la arena recuperada debe ser menor al 3%. El IPI actual de la arena recuperada en la fundición es del 1,34% y reducir este significaría que la arena recuperada podría reutilizarse más veces y daría como resultado un molde con mejor resistencia cuando se mezcla con arena virgen.

Tecnología neumática de recuperación de arena: Capacidad de procesar 5 t/h, con una potencia de 56 kW. El tiempo operativo se determinó en 6,5 h/día para un total de 1625 h/año, con un consumo energético 91 000 kWh/año.

Sistema térmico existente para procesar arena: Para procesar 5 t/h el aporte de energía para este proceso es de 0,8 GJ/t de calor de gas natural para alcanzar la temperatura requerida. El sistema tiene una potencia total de 54,5 kW, y para alcanzar una recuperación del 95%, debe operar 6,85 h/día o 1712,5 h/año. Los totales anuales de energía son 93 331 kWh/año y 6850 GJ/año.

Recuperación por microondas: Es una tecnología emergente que utiliza microondas para calentar el aglutinante residual en la arena, provocando que se volatilice. Para procesar 5 t/h se requiere una potencia total 175 kW con un tiempo de actividad de 3,43 h/día o 856,3 h/año, y un consumo de energía de 149 853 kWh/año.

Desarrollo del ACV:

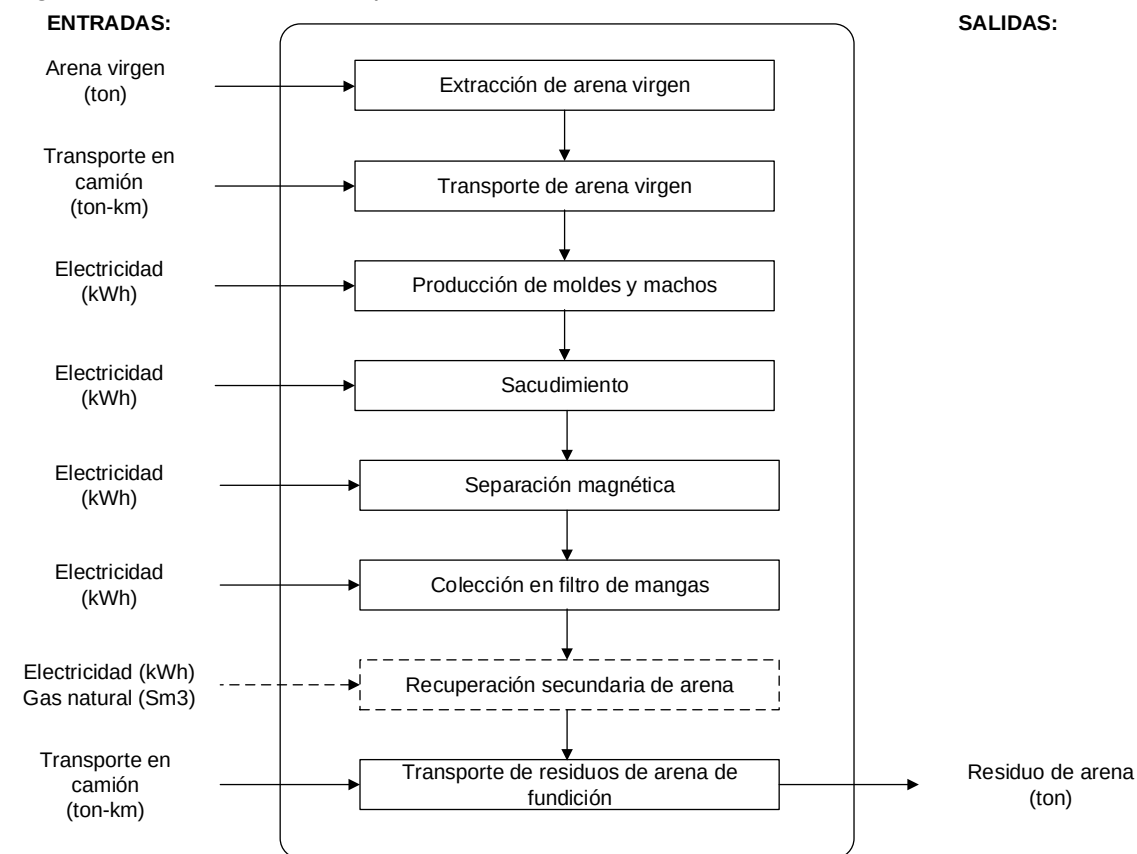
El objetivo del ACV es mostrar qué impacto tiene la recuperación secundaria adicional de arena la huella ambiental de la fundición, así como examinar si la reducción en el transporte de arena virgen y RAF tendría un impacto significativo en el ambiente.

Se utilizó la metodología ACV establecida en los documentos (ISO) 14040 y 14044.

La unidad funcional elegida para el ACV fue una tonelada de arena curada para moldes y machos.

Para mantener el ACV lo más simple posible, se excluyó cualquier proceso en la fundición que no impactara directamente en la recuperación de arena. El modelo del sistema (Figura 1) es la suma de todos los insumos necesarios para producir arena de moldeo.

Figura 9. Modelo del ACV adoptado.



Todos los datos se recopilaron y organizaron en una hoja de cálculo. En la Tabla 11 se muestran los datos recopilados en crudo, realizándose las conversiones apropiadas como cálculos separados.

Tabla 11. Resultados del inventario del ACV

Entradas constantes	Uso anual	Uso por Unidad Funcional
Electricidad (kWh)		
Mezcladoras de arena	46 200	5.28
Sacudidora	1875	0.21
Separador magnético	925	0.11
Filtro de mangas	120	0.01
Diésel (galones)		
Transporte de arena virgen	6890	0.79
Transporte RAF a relleno	1820	0.21
Nuevas entradas de proceso	Uso anual	Uso por Unidad Funcional
Recuperación mecánica		
Electricidad (kWh)	91 000	10.40
Recuperación térmica		
Electricidad (kWh)	93 331	10.67
Gas Natural (Termias)	62 592	7.15
Recuperación por microondas		
Electricidad (kWh)	149 853	17.13

Análisis económico:

Si bien no fue el motivo principal, también se analizó la viabilidad económica de la recuperación adicional de arena.

- Los valores son en dólares americanos de 2017.
- Los costos de compra y transporte de arena virgen se calcularon según los costos pagados por la fundición.
- Los costos del proceso de recuperación de arena en la fundición incluye la energía para todo el tren de recuperación existente y secundario.
- Los costos de transporte de RAF se basaron tanto en un cargo fijo por el servicio de recolección, como un cargo variable por la disposición de RAF.
- Las cotizaciones de nuevos equipos de recuperación, así como los costos anticipados de O&M, se obtuvieron de los proveedores de sistemas mecánicos y térmicos.

Los resultados del análisis de costos se muestran en la Tabla 12 y muestra las siguientes tendencias:

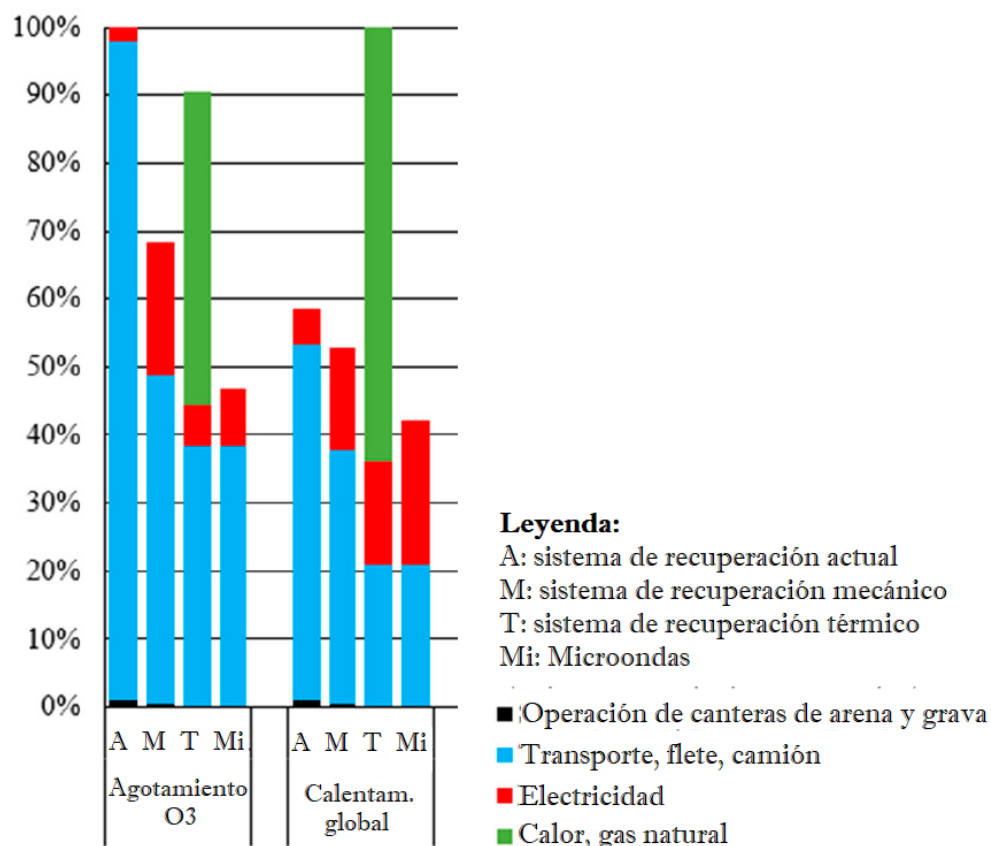
- El costo operativo total anual disminuye a medida que se introduce nueva tecnología de recuperación.
- El costo del consume de energía aumenta cuando se incorpora equipamiento. La disminución neta del costo anual es por la reducción de la arena virgen comprada.
- El costo actual de compra y transporte de arena virgen es el 73% del costo operativo total del ciclo de vida. Al aumentar el porcentaje de arena recuperada, el requerimiento de arena virgen disminuye en un 30% con la recuperación mecánica, y un 65% con el térmico o de microondas. Esto, a su vez, conduce a ahorros en los costos de compra de arena virgen, costos de transporte de arena virgen y costos de transporte y eliminación de RAF.

Tabla 12. Comparación de costos entre la practica actual y las tres tecnologías de recuperación de arena

Gastos Anuales	Actual	Rec. Mecánica	Rec. Térmica	Microondas
Costos de O&M de equipos nuevos	-	\$2000	\$15 000	\$10 000
Transporte de arena virgen	\$52 500	\$36 750	\$18 375	\$18 375
Compra de arena virgen	\$36 875	\$25 813	\$12 906	\$12 906
Costo de recuperación	\$2456	\$7006	\$47 807	\$9948
Recargos por relleno	\$8297	\$3319	-	-
Transporte a relleno	\$3074	\$1230	-	-
Servicio de gestión de residuos	\$19 500	\$19 500	\$19 500	\$19 500
Total	\$122 702	\$95 617	\$113 589	\$70 729
Ahorro sobre la práctica actual	-	\$27 085	\$9114	\$51 973
Compra de equipo nuevo	-	\$300 000	\$700 000	\$500 000
Período de recuperación simple (años)	-	11.1	76.8	9.6

Impacto ambiental:

Figura 10. Comparación del impacto ambiental de cuatro alternativas de recuperación de arena.



Conclusiones:

La recuperación secundaria de arena se considera una buena práctica en las fundiciones modernas, pero es un proceso costoso de implementar, pero cada caso debe ser evaluado en forma específica en cada localidad, según los costos de energía, materiales, servicios y equipamiento aplicables.

El ACV para el caso de estudio muestra que puede haber un beneficio económico y una reducción del impacto ambiental, así como una reducción en la disposición de RAF en el relleno.

La fundición del caso reemplazó la arena de fundición normal por arena cerámica. Ésta arena no sufre los problemas de tamaño de grano inconsistente y expansión térmica desigual y, si bien es costosa, puede ofrecer una buena solución a muchos problemas comunes en una fundición y se reutiliza continuamente. Dicha opción también debería evaluarse en un ACV más amplio.

Medida 1.2: Selección del horno más eficiente

En las fundiciones, uno de los equipos más importantes es el horno de fusión. A la hora de seleccionar un horno de fusión hay que tener en cuenta una serie de factores entre los que se incluyen, por ejemplo, los costos de inversión y de operación, el tipo de metal, el proceso de producción utilizado.

La selección del tipo de horno adecuado está en función del nivel de emisiones esperado y criterios técnicos, tales como: tipo de proceso (continuo o por lotes), capacidad del horno, tipo de fundiciones, disponibilidad de materias primas, flexibilidad en función de la pureza de las materias primas y cambio de aleación y también la eficiencia energética del horno.

Dado que diferentes técnicas de fusión se superponen en una aplicación, una técnica básica es la selección de la tecnología de fusión, donde los criterios decisivos incluyen:

- Tipo de metal.
- Producción continua o por lotes.
- Tamaño de la serie (producción en series largas o cortas/cartera de productos).
- Rendimiento de metal o capacidad.
- Flexibilidad en cuanto al tipo de material y su pureza.
- Flexibilidad al cambio de aleación.
- Tipo de producto fabricado.
- Volumen total de producción.
- Emisiones y otras consideraciones ambientales.
- Disponibilidad de materias primas.
- Disponibilidad de combustibles/electricidad.
- Eficiencia energética del horno y potenciales pérdidas de calor
- Costo de la energía y su huella de carbono

a) Tipos de hornos de fundición

Fundición de metales no ferrosos:

Hay diferentes tipos de hornos de fusión, con sus propias ventajas/desventajas según se indica a continuación.

Hornos de crisol: la mayoría son hornos de pequeña capacidad, para fundir o como hornos de retención. Presentan varias ventajas y desventajas:

Funcionamiento y mantenimiento sencillos y una inversión de capital relativamente baja.

En la fundición de aluminio, las capacidades van de 1 000 kg (tipo estático) hasta 1 500 kg (basculantes). La velocidad de fusión de los hornos de crisol eléctricos suele ser de unos 250 kg Al/h, mientras que los hornos de gas pueden alcanzar hasta 400 kg Al/h.

Los hornos presentan una eficiencia energética muy baja, entre el 7 a 19 % y una pérdida de masa fundida relativamente alta, del 4 al 6 %. Más del 60 % de la pérdida de calor se debe a la radiación; las pérdidas restantes se producen a través de los gases de chimenea.

Hornos de reverbero: Hay tres tipos principales de hornos de reverbero alimentados con combustible:

- 1) hornos de solera seca donde el metal se precalienta antes de fundirlo.
- 2) hornos de baño húmedo donde el metal se carga directamente al baño fundido sin precalentamiento.
- 3) hornos de pozo lateral equipados con varios quemadores en su interior, con con pozo de carga y bomba exteriores.

La eficiencia energética de los hornos de reverbero suele ser baja, oscilando entre el 20 % y el 25 %.

Hornos de cuba: Presentan la eficiencia más alta de todos los hornos, normalmente del 40 al 45 %. Esto por el diseño del horno que permite que el metal se cargue por la chimenea de escape, captando el calor de los gases de combustión antes de derretirse. Tienen menores pérdidas de masa fundida que los hornos de reverbero, normalmente dentro de 1 al 2 %.

Fundición de hierro fundido:

Se pueden utilizar dos tipos de hornos de inducción, los hornos de inducción sin núcleo y los hornos de inducción de canales. Los primeros son ligeramente menos eficientes que los segundos, pero generalmente son más flexibles.

Los hornos de inducción sin núcleo pueden funcionar a frecuencias bajas, medias o altas y pueden encenderse en frío y normalmente vaciarse por completo, lo que simplifica los cambios de aleación. Normalmente, los hornos de inducción eléctricos pueden tener una eficiencia energética muy alta, del 75 %.

Fundición de acero:

El acero se puede fundir en hornos de arco eléctrico o de inducción. Normalmente, los hornos de inducción sin núcleo se encuentran en instalaciones más nuevas en comparación con los de arco eléctrico.

Generalmente, el consumo específico de energía de los hornos de inducción sin núcleo es ligeramente menor al de los hornos de arco eléctrico.

b) Desempeño ambiental y datos operativos

Hornos de crisol: como alternativa a los hornos de gas, los crisoles de resistencia eléctrica consumen menos energía. Su consumo de energía puede oscilar entre 460 kWh/t y 570 kWh/t, frente a 1600 kWh/t y 2600 kWh/t en el caso de los hornos de gas.

Hornos de reverbero: Los hornos de solera seca tienen un consumo energético típico de alrededor de 1200 kWh/t. Los hornos de reverbero húmedo presentan menores pérdidas de masa fundida (2-5 % para los hornos de gas y < 1 % para los eléctricos) y tienen un consumo de energía típico de alrededor de 1000 kWh/t. Si se utilizan circulación de metal, precalentamiento de metal y quemadores regenerativos, es posible reducir el consumo de energía a aproximadamente 650 kWh/t.

Hornos de cuba: La sustitución de los hornos de reverbero por hornos de cuba puede suponer un ahorro sustancial en términos de consumo de energía. Las mediciones realizadas en dos fundiciones de fundición a presión en los Estados Unidos mostraron que la eficiencia de fusión era del 25 % para un horno de reverbero y 44 % en el horno de cuba, ambos operados en las mismas condiciones. En la segunda fundición equipada con un horno de reverbero y un horno de cuba de igual capacidad (1360 kg/h) que procesaba la misma carga, las pérdidas de masa fundida fueron del 5,5 % en el horno de reverbero, y sólo del 0,9 % en el horno de cuba. El consumo de energía en el horno de cuba fue de 616 kWh/t, pero mucho mayor en el horno de reverbero (1 275 kWh/t).

Fundición de hierro fundido:

El consumo de energía de un horno de inducción sin núcleo en la fundición de hierro fundido para elevar la temperatura del metal hasta 1 450 °C puede ser inferior a 600 kWh/t, pero normalmente oscila entre 600 kWh/t y 1 000 kWh/t.

Fundición de acero:

En teoría, el consumo de energía eléctrica necesario para fundir acero a una temperatura de 1600 °C es de 342 kWh/tonelada. Sin embargo, la mayoría de las fundiciones de acero consumen entre 454 kWh/tonelada y 726 kWh/tonelada en fundición debido a las pérdidas de calor.

c) Efectos cruzados

Se pueden construir hornos de reverbero con grandes capacidades, mientras que los hornos de cuba deben ser relativamente altos para lograr el efecto de precalentamiento (normalmente unos 6 m). El revestimiento refractario del fondo de los hornos de cuba puede sufrir tensiones mecánicas, lo que resulta en la necesidad de un mantenimiento más frecuente.

En los hornos de cuba, la carga debe apilarse correctamente, lo que significa que este tipo de horno no acepta todas las formas de chatarra de aluminio.

d) Costo de la energía y su huella de carbono

En el Perú el costo de la energía y su huella de carbono difiere bastante (ver Tabla 13), por lo que dependiendo de las tarifas aplicadas a cada empresa, podría resultar favorable tal o cual fuente de energía para los hornos de fundición.

Tabla 13. Precios referenciales de la energía en Peru (Julio 2023)

Producto (Industria)	Valor Calorífico Neto		Precio (inc. IGV)		tCO ₂ /TJ
	kcal/gal kcal/m3(GN)	TJ/gal TJ/m3(GN)	Sol/gal Sol/m3(GN)	Sol MMkcal	
Diésel B5	33924	1.42E-04	21.00	619.0	74100
GLP granel	25001	1.05E-04	6.00	240.0	63100
Gas natural	8601	3.60E-05	1.03	119.8	56126

Producto	Tarifa	Tipo	Precio (inc. IGV)		tCO ₂ /TJ
			Sol/kWh	Sol MMkcal	
Electricidad - Domestica	BT5	Baja tensión	0.660	767.4	46667
Electricidad - Industrial	MT	Media tensión	0.145	168.6	46667

Comparando el costo por unidad de energía (Sol/MMkcal) el gas natural tiene menor costo que las otras fuentes, pero la electricidad en MT puede competir y resultar en menor costo de operación si se toma en cuenta la eficiencia del horno que es mucho mayor para los hornos eléctricos, además en todos los casos la electricidad tiene una menor huella de carbono por unidad de energía (tCO₂/TJ), ello porque un 56% de la electricidad en Perú es generada en centrales que usan energías renovables (hidráulica, eólica y solar).

Caso 2: Reemplazo de hornos de fusión a gas natural por hornos eléctricos

Información general:

Empresa	:	TECNOFIL S.A.
Ubicación	:	Lima
Tamaño de la empresa	:	Gran empresa
Actividad	:	Fundición de cobre y aleaciones de cobre
Etapas/proceso en que aplica	:	Fusión
Clases CIIU aplicables al caso	:	2432 - Fundición de metales no ferrosos

Descripción:

Actualmente la planta cuenta con dos hornos de crisol a gas natural en el Área 250, los cuales funden carga metálica (virgen/chatarra) como: barras de zinc, Sn, P, Ni y recorterías de las mismas aleaciones, siendo fundidas a diferentes temperaturas dependiendo de la aleación. El metal líquido se envía al horno de retención, para luego seguir con el proceso de producción. Los hornos trabajan 24 h en lotes continuos de unos 500 kg, con una producción de 100 TM/mes que resulta baja, pues no se puede atender a nuevos clientes. El actual consumo de los 2 hornos es de 464 700 Sm³/año de gas natural

Se ha realizado un estudio de factibilidad para el reemplazo de los hornos a gas por hornos de inducción eléctricos más eficientes y de mayor capacidad (250 TM/mes) de las siguientes características:

Horno de Fusión:

- Fabricante: AJAX MAGNETHERMIC CORP.
- Modelo: E-40A-46-C
- Potencia: 400 KW
- Corriente: 980 A

- Tensión: 460V monofásico
- Frecuencia: 60Hz

Horno de Retención:

- Fabricante: Hecos
- Potencia: 150KW
- Corriente: 500A
- Tensión: 460VAC
- Frecuencia: 60Hz

Beneficios:

➤ **Beneficios económicos**

- Se reducirán los costos de energía. Actualmente se tiene US\$120 por TM, y se estima reducir a US\$ 60 por TM.
- El ahorro se calcula considerando el consumo de 2 hornos a gas natural de 464 700 m³/año y el consumo de los hornos eléctricos de 872 700 kWh/año, y los precios de los energéticos para TECNOFIL de 0,956 Sol/m³ de gas natural y 0,25 Sol/kWh para la energía eléctrica. Se obtiene un ahorro de 217.000 Soles/año (56.500 USD/año).
- Mayor ingreso por incremento de producción de 100 TM/mes a 250 TM/mes y con mejor calidad de los productos.

➤ **Beneficios ambientales**

- Se mejorará el control de las emisiones de Óxido de zinc.
- Se logrará una reducción de las emisiones de 785 tCO₂e/año.

Medida 1.3: Selección del calentador de cuchara más eficiente

El calentamiento de las cucharas es importante para garantizar que estén a la temperatura adecuada, libres de humedad y otros contaminantes, para lograr que el metal fundido se vierta en el molde a la temperatura y propiedades correctas.

Existen varios tipos de calentadores de cucharas que se utilizan en las fundiciones, siendo algunos tipos comunes los siguientes:

Calentadores a gas: Utilizan gas como combustible para generar una llama que se dirige hacia la superficie de la cuchara que se desea calentar. Este tipo de calentador es muy común en las fundiciones y permite calentar la cuchara de manera controlada antes del vertido del metal fundido.

Calentadores de llama abierta: Pueden emplear gas o diésel como combustible y se caracterizan por tener una llama visible y abierta que rodea la cuchara a calentar. y pueden tener una mayor capacidad de calentamiento, lo que los hace adecuados para cucharas de mayor tamaño.

Calentadores de resistencia eléctrica: Estos calentadores se colocan en contacto con la cuchara y utilizan elementos de resistencia eléctrica para generar calor y calentar la cuchara.

Calentadores de inducción: Los calentadores de inducción también se pueden utilizar para calentar cucharas. Aplican calor de manera rápida y controlada mediante el principio de la inducción electromagnética.

Calentador a gas con quemador poroso: En un quemador poroso de gas (quemador volumétrico), la combustión tiene lugar en un quemador cerámico poroso de alta temperatura. El resultado es una combustión volumétrica sin llama, en forma de cerámica incandescente radiante que produce un calentamiento homogéneo. Los quemadores porosos pueden alcanzar densidades de potencia mayores a 3 MW/m^2 .

Figura 11. Calentador de cuchara a gas

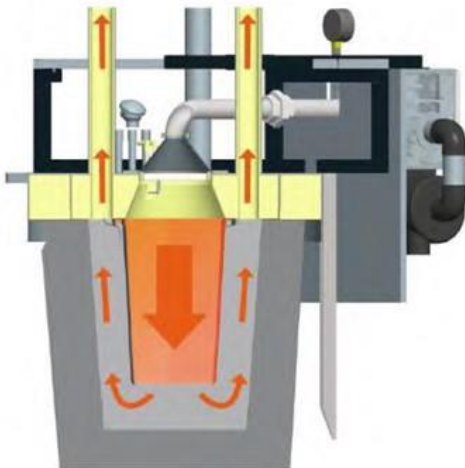


Fuente: www.hydeb.com.

Figura 12. Calentador de cuchara eléctrico



Figura 13. Calentador a gas con quemador poroso



Fuente: DE UBA (2014)

Los calentadores de cuchara modernos incorporan un controlador que permite ajustar la temperatura de la cuchara y controlar la velocidad del calentamiento, lo cual se logra mediante sensores de temperatura y un circuito de retroalimentación que regula la entrada de calor a la cámara de calentamiento. También pueden incluir funciones de seguridad como alertas de temperatura y mecanismos de apagado automático en caso de sobrecalentamiento u otras fallas.

La elección del tipo de calentador de cucharas dependerá de varios factores, como el tamaño de la cuchara, el tipo de metal que se va a verter, la velocidad de

producción y otros requisitos específicos de la fundición. La eficiencia y la velocidad de calentamiento son consideraciones importantes al seleccionar el tipo de calentador adecuado para las operaciones de fundición.

La eficiencia de los calentadores de cucharas eléctricos en comparación con los calentadores a gas depende de varios factores, como las necesidades específicas de la fundición, el tipo de metal a fundir y las condiciones de operación.

Ventajas de los calentadores eléctricos de cucharas:

- Mayor control: Ofrecen un control preciso de la temperatura, lo que puede ser esencial para fundir metales con requisitos de temperatura exactos.
- Eficiencia energética: Pueden ser más eficientes en la conversión de energía en calor (hasta 70% aprox.), ya que no se pierde energía en la combustión, como ocurre con los calentadores a gas menos eficientes (20% aprox.).
- Menos emisiones: Producen menos emisiones de gases contaminantes (NO_x, CO, SO₂) y CO₂, lo que resulta en menor impacto ambiental.

Desventajas de los calentadores eléctricos de cucharas:

- Costo inicial: Los calentadores eléctricos a menudo tienen un costo inicial más alto que los calentadores a gas.
- Costos operativos: Aunque son eficientes en la conversión de energía en calor, los calentadores eléctricos pueden tener costos operativos más altos, especialmente si la electricidad es costosa en la ubicación de la fundición.
- Capacidad limitada: La capacidad de calentamiento de los calentadores eléctricos puede ser limitada en comparación con algunos calentadores a gas.

Consideraciones generales:

La elección entre calentadores eléctricos y a gas dependerá de la escala de la operación de fundición, el presupuesto disponible, la disponibilidad de electricidad y gas, la temperatura requerida para fundir el metal y otros factores específicos de la fundición.

En algunos casos, las fundiciones utilizan una combinación de ambos tipos de calentadores para optimizar la eficiencia y la flexibilidad de sus procesos de fundición.

Medida 1.4: Manejo ecoeficiente de aspectos ambientales

Las fundiciones deben tratar de cumplir con los requisitos legales establecidos en la legislación ambiental del sector producción⁴. En ese sentido es necesario que las fundiciones implementen una serie de medidas con enfoque "ecoficiente" para una adecuada gestión ambiental.

A continuación, se proporcionan una serie de medidas generales que se consideran alcanzables con la tecnología existente, pero que deben ser ajustadas en cada planta o proyecto según su propia realidad y contexto ambiental. Las medidas se orientan a los siguientes aspectos ambientales (ver detalles en la **Tabla 14**):

- Calidad del aire (polvo, humos, emisiones de hornos, olores, etc.)
- Generación y disposición de residuos.
- Descargas de aguas residuales.
- Ruido.

En la **Tabla 15** se presenta a modo referencial valores orientativos para las emisiones de proceso en fundiciones, los cuales son indicativos de buenas prácticas industriales internacionales. Esos valores de emisiones se pueden lograr bajo condiciones normales de funcionamiento en instalaciones adecuadamente diseñadas y operadas aplicando medidas de prevención de la contaminación y técnicas de control de emisiones.

⁴ Resolución Ministerial N° 0147-2023-PRODUCE: Aprobación de Disposiciones Técnicas Ambientales (DTA) para las actividades de la industria manufacturera. Incluye el Anexo 11 sobre listado de obligaciones de carácter general.

Tabla 14. Medidas de manejo ecoeficiente de aspectos ambientales en fundiciones

Aspecto ambiental	Emisión / descarga	Fuentes	Medida ambiental
Emisiones al aire	Material particulado / polvo	- Manipulación de arena - Hornos de fusión - Moldeo, producción de machos - Sacudida de moldes - Acabado de piezas fundidas	- Uso de transporte neumático de granulados. - Uso de transportadores cerrados, especialmente cuando se transfiere arena al taller de moldeo. - Cubrir los apilamientos, usar supresores de polvo, o pantallas cortavientos. - Uso de silos cerrados para almacenar materiales en polvo a granel. - Mantenimiento rutinario de la planta y una buena limpieza para reducir las pequeñas fugas y derrames. - Usar hornos de inducción cuando sea posible, ya que presentan menos emisiones. - Los hornos de solera abierta no son buena opción. - Instalación de campanas de captación de gases y humos para hornos de arco eléctrico (EAF) y cubiertas de extracción para hornos de inducción para reducir las emisiones fugitivas. - Usar filtros de mangas y ciclones para controlar las emisiones de la fusión. Se pueden usar lavadores de gases (Scrubbers) para capturar compuestos solubles en agua (como el SO₂ y cloruros). - Usar filtros de mangas y ciclones para captar polvo en la preparación de arena. - Usar de filtros en los escapes, especialmente en los talleres de fundición y acabado. - Usar limpieza al vacío en el taller de moldeo y fundición.
	Óxidos de nitrógeno (NO _x)	Hornos, por las las altas temperaturas y la oxidación del nitrógeno del aire y del combustible.	- Minimizar la relación aire/combustible en el proceso de combustión. - Utilizar el enriquecimiento de oxígeno en el proceso de combustión. - Usar quemadores de bajo NO_x en hornos, cuando sea posible. - Usar gas natural, que produce menos NO_x que los combustibles líquidos y el carbón.
	Dióxido de azufre (SO ₂)	- Hornos de fusión, depende del contenido de azufre del combustible y del coque del proceso. - Proceso de endurecimiento por gas en moldes y machos con arena químicamente aglomerada. - Fundición de magnesio (Mg).	- Usar materias primas y chatarra con bajo contenido de azufre. - Usar combustibles con bajo contenido de azufre, como el gas natural. - Instalar scrubbers antes de ciclones y filtros de mangas. .

Aspecto ambiental	Emisión / descarga	Fuentes	Medida ambiental
	Monóxido de carbono (CO)	- Hornos de cúpula: gases del proceso mismo. - Hornos de arco eléctrico: oxidación de los electrodos de grafito y el carbono del baño metálico en la fusión y refinación. - Moldes y machos de arena cuando entran en contacto con el metal fundido.	- Uso de hornos de inducción. - Mejorar la eficiencia térmica del proceso (por ejemplo, uso de quemadores Oxy-fuel). - Aplicar la práctica de escoria espumosa en hornos de arco eléctrico. - Instalar cámara de postcombustión de los gases residuales del horno de cúpula y arco eléctrico. - Encapsular las líneas de colada con extractores.
	Compuestos orgánicos volátiles (VOCs)	- Uso de resinas, disolventes orgánicos o recubrimientos de base orgánica en el moldeo y fabricación de machos. - Vertido, enfriamiento y sacudida de moldes de arena verde o sin hornear.	- Minimizar el uso de aglomerantes y resinas optimizando el control del proceso y el manejo de materiales en mezcladores y mediante el control de la temperatura. - Optimizar el control de la temperatura en la fabricación de machos. - Usar recubrimientos a base de agua. - Utilizar disolventes no aromáticos (por ejemplo, ésteres metílicos de aceite vegetal o ésteres de silicato) en la producción de cajas de machos. - Minimizar el gas de curado utilizado para los "aglomerantes de caja fría". - Usar sistemas de recolección (por ejemplo, campanas) para capturar los VOCs de la preparación de arena unida químicamente, en la colada, enfriamiento y sacudida. Uso de adsorción a carbón activado, oxidación catalítica o tratamiento de biofiltración, según sea necesario.
	Dioxinas y furanos	Hornos, durante la fusión de chatarra contaminada con pintura, plásticos o aceite lubricante	- Usar chatarra limpia en la fusión. - Usar filtros de mangas para capturar polvos donde se adsorben las dioxinas y furanos.
	Gases de efecto invernadero	- Hornos de fusión que utilizan combustibles fósiles.(emisión directa). - Hornos de fusión eléctricos (emisión indirecta). - Otras cargas eléctricas como motores, etc. (emisión indirecta).	- Usar hornos de fusión eficientes. - Aplicar medidas de eficiencia energética: aislamientos mejorados, reducir el exceso de aire en quemadores, recuperación de calor, usar motores de alta eficiencia, automatización de combustión y procesos. - Usar hornos y calentadores de cucharas eficientes. - Usar mejores tecnologías de combustión: quemadores recuperativos, Oxy-fuel. - Preferir el gas natural como combustible en lugar de combustibles líquidos. - Generar electricidad con energías renovables.
Residuos sólidos	Residuos en general	Operaciones de producción, mantenimiento y administración de planta.	Plan de minimización y manejo de residuos sólidos de acuerdo a la normativa de residuos establecida por el MINAM.

Aspecto ambiental	Emisión / descarga	Fuentes	Medida ambiental
	Arena de fundición	▪ Arena de moldes y machos. ▪ Los residuos de arenas de fundiciones ferrosas por lo general no son peligrosos. ▪ Los residuos de arena de las fundiciones de latón y bronce suelen ser peligrosos y deben disponerse.	▪ Los métodos de recuperación de arena verde consisten en la regeneración primaria (por ejemplo, vibración, tambor giratorio o granallado) y secundaria (por ejemplo, el procesamiento de la arena para eliminar los aglomerantes residuales, así como los tratamientos mecánicos y térmicos en frío, o el lavado húmedo). ▪ El tratamiento térmico se utiliza para recuperar arena químicamente aglomerada.
	Polvo de equipos de depuración	▪ El polvo de los ciclones, filtros de mangas en las fundiciones no ferrosas puede contener metales cuya recuperación sea económicamente viable.	▪ El polvo captado debe regresar a los hornos, en la medida de lo posible. Esto permite la recuperación de metales a través del reprocesamiento del polvo y, por lo tanto, minimiza los residuos a disponer.
	Escorias	▪ Hornos de fusión. La escoria contiene óxidos metálicos, refractarios fundidos, arena y cenizas de coque (si se usa coque). La escoria puede ser peligrosa si contiene plomo, cadmio o cromo.	▪ Clasificación de la chatarra: evitar la chatarra de productos electrónicos, la chatarra pintada y la chatarra de vehículos usados ▪ Reducir en lo posible la temperatura de fusión de metales. ▪ Optimizar el uso de fundentes y revestimiento refractario. ▪ La escoria debe reutilizarse y extraerse los metales valiosos.
Aguas residuales	Aguas residuales industriales	▪ Hornos eléctricos (de inducción o de arco): sistemas de enfriamiento. ▪ Scrubbers. ▪ Moldeo enfriado con agua. ▪ Machos de sales solubles. ▪ Ciertas operaciones de acabado, como templado y desbarbado.	▪ Instalar circuitos cerrados para enfriar el agua para reducir el consumo y la descarga de agua. ▪ Reciclar el agua recirculante mediante sedimentación y filtración. ▪ Tratar, de ser necesario, las aguas residuales de proceso mediante precipitación química de, coagulación y floculación, etc.
Ruido	Emisiones de ruido continuo, intermitente, impulsivo.	▪ Manejo de chatarra. ▪ Carga del horno. ▪ Fusión en horno de arco eléctrico. ▪ Quemadores de combustible. ▪ Sacudida de moldes/núcleos. ▪ Sistemas de transporte de materiales y ventilación.	▪ Cerrar las áreas de proceso y/o aislarlos. ▪ Cubrir y encerrar las áreas de almacenamiento y manipulación de chatarra, así como los procesos de desmoldado y acabados. ▪ Encapsular ventiladores, aislar tuberías de ventilación y utilizar compuertas. ▪ Implementar controles de gestión, incluyendo el manejo y transporte de chatarra en horario nocturno

Fuente: Adaptado de IFC- Environmental, Health, and Safety Guidelines for Foundries. 2007

Tabla 15. Valores guía referenciales de emisiones al aire en fundiciones⁽¹⁾

Contaminante	Unidad	Valor guía
Material particulado	mg/Nm ³	20 ⁽²⁾
		50 ⁽³⁾
Aerosol/niebla de aceite	mg/Nm ³	5
NO _x	mg/Nm ³	400 ⁽⁴⁾
		120 ⁽⁵⁾
		150 ⁽⁶⁾
SO ₂	mg/Nm ³	400 ⁽⁸⁾
		50 ⁽⁹⁾
		120 ⁽⁷⁾
VOC	mg/Nm ³	20 ⁽¹⁰⁾
		30
		150 ⁽¹¹⁾
PCDD/F	ng TEQ/ Nm ³	0.1
CO	mg/Nm ³	200 ⁽¹²⁾
		150 ⁽¹³⁾
Aminas	mg/Nm ³	5 ⁽¹⁴⁾
Cloro	mg/Nm ³	5 ⁽¹⁵⁾
Pb, Cd y sus compuestos	mg/Nm ³	1-2 ⁽¹⁶⁾
Ni, Co, Cr, Sn y sus compuestos	mg/Nm ³	5
Cu y sus compuestos	mg/Nm ³	5-20 ⁽¹⁷⁾
Cloruros	mg/Nm ³	5 ⁽¹⁸⁾
Fluoruros	mg/Nm ³	5 ⁽¹⁹⁾
H ₂ S	ppm v/v	5
Notas: 1. Condiciones de referencia para límites. Para gases de combustión: seco, temperatura 273K (0°C), presión 101.3 kPa (1 atmósfera), contenido de oxígeno 3% seco para combustibles líquidos y gases, 6% seco para combustibles sólidos. Para gases de no-combustión: no se corrige por contenido de vapor de agua u oxígeno, temperatura 273K (0°C), presión 101.3 kPa (1 atmósfera). 2. Emisiones de material particulado donde metales tóxicos están presentes. 3. Emisiones de material particulado donde metales tóxicos no están presentes. 4. Fusión de metales ferrosos. Nivel máximo de emisiones considerando la mejor tecnología disponible y en base a horno de cuba sin coke. 5. Fusión de metales no ferrosos (hornos de eje). 6. De unidades de recuperación/regeneración térmica de arena. 7. Nivel máximo de emisiones considerado sobre la base de mejor tecnología disponible en base a hornos de cuba . 8. Fundición de metales no ferrosos (hornos de eje) 9. Fusión de metales ferrosos (hornos de cuba) 10. Fundición de metales no ferrosos (hornos de eje). 11. Fusión de metales ferrosos (hornos de arco eléctrico). Los hornos de cuba pueden tener niveles de emisión más altos (hasta 1.000 mg/Nm3) 12. Fundición de metales no ferrosos (hornos de eje) 13. Taller de moldeo de cajas frías y fabricación de machos. 14. Fusión de metales no ferrosos (aluminio) 15. Sistemas térmicos de recuperación de arena y operación de recubrimiento, descascarado y fraguado a base de solventes. 16. Valor superior aplicable a las fundiciones de metales no ferrosos a partir de chatarra. 17. Valor superior aplicable al cobre y sus procesos de producción de aleaciones. 18. Emisiones de hornos donde se utiliza fundente de cloruro. 19. Emisiones de hornos donde se utiliza fundente de fluoruro.		

Fuente: IFC. Environmental, Health, and Safety Guidelines for Foundries. April 30, 2007 (p.13).

Medida 1.5: Control de calidad de la chatarra

La chatarra es la materia prima fundamental en las fundiciones, especialmente las ferrosas.

El control de calidad de la chatarra es de suma importancia para el proceso de fundición, ya que de ello dependerá la obtención de un metal de calidad, además de reducir la contaminación ambiental por las emisiones de COP-NI y otras sustancias.

Por ello las empresas ponen mucha atención en la calidad de la chatarra que compran a las empresas recicladoras, lo cual es exigido al suministrador, pero también en la misma planta se efectúan controles propios en la recepción para garantizar la idoneidad de la chatarra como materia prima.

Controles en origen:

Inspección por personal especializado en origen para verificar que al momento de cargar la chatarra se ajusta a los requisitos del cliente.

Controles en planta:

En planta se realiza un control exhaustivo, camión a camión, independientemente de su origen. Estos controles están destinados a eliminar la presencia de elementos nocivos, materiales explosivos e inflamables, grasas, aceites, plásticos adheridos, pinturas; así como la de metales extraños, tierras, cuerpos extraños, etc.; Además de comprobar que las medidas de las piezas estén dentro de los estándares establecidos.

También se realizan análisis espectrométricos o de otro tipo sobre cualquier material que suscite dudas sobre su composición química. Todo esto tiene como objetivo lograr una garantía de calidad y productividad óptima.

3.2. Estrategia 2: Biodiseño

El biodiseño es un enfoque de diseño y desarrollo que se inspira en la naturaleza para crear soluciones más sostenibles y amigables con el ambiente.

Los principios del biodiseño pueden aplicarse en diferentes sectores, incluyendo las fundiciones metálicas, para promover la sostenibilidad y reducir el impacto ambiental.

A continuación, se presentan algunos ejemplos en que el biodiseño puede aplicarse en las fundiciones metálicas y que están relacionados al empleo de insumos que podrían ser biodegradables/no tóxicos o más amigables con el ambiente.

Medida 2.1: Recubrimientos de moldes y machos

Los recubrimientos utilizados en los moldes y machos (núcleos) para la fundición de metales a menudo contienen sustancias químicas que pueden ser perjudiciales para el ambiente. Se han desarrollado recubrimientos biodegradables/no tóxicos y amigables con el ambiente como alternativas, lo que reduce la liberación de

compuestos orgánicos volátiles (COVs) y residuos químicos. Algunas alternativas son:

- Recubrimientos a base de agua: estos recubrimientos utilizan agua como base y generalmente contienen solventes menos dañinos en comparación con los recubrimientos tradicionales.
- Recubrimientos a base de aceites vegetales: algunos recubrimientos se formulan utilizando aceites vegetales como componente principal, que pueden ser biodegradables y proporcionar un desmoldeo eficaz.
- Recubrimientos de bioresina: están hechos de recursos naturales renovables y biodegradables, como resinas de origen vegetal.
- Ligantes biodegradables: además de los recubrimientos, algunas fundiciones pueden utilizar aglutinantes biodegradables en base a ingredientes naturales en el moldeo.

Se recomienda verificar que los proveedores de productos, insumos o materiales biodegradables cuenten con documentación nacional o internacional que acredite dicha condición, incluso mediante informes de ensayo de laboratorios.

Medida 2.2: Modelos y patrones impresos en 3D

En algunas fundiciones, se utilizan modelos y patrones impresos en 3D para crear moldes y machos. Los materiales utilizados en la impresión 3D pueden incluir plásticos biobasados (origen biológico), como el PLA (ácido poliláctico), que se degradan más fácilmente en el ambiente por acción de microorganismos (biodegradación).

Medida 2.3: Lubricantes y desmoldantes

Los lubricantes y desmoldantes utilizados en la fundición pueden ser biodegradables/no tóxicos y a base de agua en lugar de productos químicos más agresivos. Esto puede reducir la contaminación del suelo y del agua.

Se puede consultar con fabricantes y proveedores opciones de productos específicos⁵.

3.3. Estrategia 3: Intercambio

El intercambio es una estrategia de aplicación amplia, que consiste en implementar los cambios necesarios para reemplazar materiales, fuentes de energía, procesos o tecnologías, por otros que permitan optimizar y ahorrar recursos, en las diferentes etapas de la cadena de valor.

⁵ Ver por ejemplo lista de productos de la empresa SOUTHEASTERN FOUNDRY PRODUCTS & FOUNDRY COATINGS, Inc. (<http://www.sefp.net/prod.html>)

La industria de fundición en general ha desarrollado, y continúa desarrollando, mejoras en sus procesos debido a la necesidad de ser más competitivos y cumplir con requerimientos de orden ambiental. La estrategia de intercambio desarrollará varias medidas vinculadas con la eficiencia energética, el reemplazo de energía y la eficiencia de materiales, cuya implementación en los procesos de fundición permiten lograr beneficios económicos y ambientales.

3.3.1. Eficiencia energética

La eficiencia energética implica producir lo mismo con menos consumo de energía ó producir más con la misma energía consumida. Ello se logra con buenos hábitos en el uso de la energía, buen mantenimiento de los equipos y uso de equipos eficientes.

La aplicación de la eficiencia energética (EE) en las fundiciones metálicas puede traer una serie de beneficios, tales como:

- **Reducción de costos:** Las fundiciones suelen ser intensivas en el uso de energía. La aplicación de la EE puede reducir significativamente los costos operativos, lo que mejora la rentabilidad de la fundición.
- **Competitividad:** Al reducir los costos de producción, la EE puede mejorar la competitividad de una fundición, lo que es crucial en un mercado global donde las fundiciones compiten en precio y calidad.
- **Sostenibilidad ambiental:** Las fundiciones pueden producir un alto impacto ambiental por el consumo de energía y las emisiones que produce, incluyendo al CO₂ (gas de efecto invernadero). La EE contribuye a una huella ambiental más baja, contribuye a la conservación de recursos naturales y la seguridad energética, y ayuda a cumplir con regulaciones ambientales.

A continuación, se describen una serie de medidas de EE que pueden aplicarse en las fundiciones metálicas.

Medida 3.1: Mejora de la eficiencia térmica de hornos

Se describen una serie de medidas para maximizar la eficiencia de la conversión de energía en diferentes tipos de hornos de fundición, minimizando al mismo tiempo las emisiones (en especial partículas y CO). Esto se consigue mediante el uso de la automatización y control de los hornos, y aplicando varias medidas de optimización del proceso según el tipo de horno. En el Perú los hornos más empleados son: hornos de inducción, hornos de arco, hornos de reverbero y hornos de crisol, por lo que las medidas se orientarán a ellos.

Hornos eléctricos de inducción sin núcleo:

- **Condición óptima de la carga:** Evitar metales oxidados y sucios, utilizar chatarra de tamaño y densidad óptimos (minimizar espacios vacíos), utilizar carburizantes limpios. Estas medidas acortan el tiempo de fusión, reducen la energía específica necesaria para la fusión y/o reducen la cantidad de escoria formada.

- Cierre de la tapa del horno: La oxidación se reduce evitando tapas mal ajustadas y aperturas innecesarias o prolongadas, y mediante carga rápida, todo lo cual evita pérdidas de energía. Los tiempos de apertura para la carga, retiro de escorias, medición de temperatura, muestreo y vertido varían entre 50 % al 25 % del tiempo del turno. Una tapa bien cerrada limita la pérdida de calor a aprox. 1% de la potencia de entrada. Con tapa abierta, la pérdida de calor puede ser hasta 130 kWh/tonelada para un horno de 10 toneladas de capacidad. Cuando se funda con la tapa cerrada, tener cuidado de no sobrecalentar el horno.
- Reducir el tiempo de espera al mínimo: Es necesario optimizar todo el proceso de fundición, minimizando retrasos, problemas e irregularidades en cualquiera de las áreas de fundición. La optimización del muestreo, análisis y ajuste es otra medida para reducir la espera.
- Adición de carburizadores al inicio del ciclo de fusión: Su adición junto con la carga metálica, en lugar de hacerlo al final, da como resultado una reducción en el consumo energético.
- Operación a la máxima potencia: Los hornos son más eficientes operando en su máxima potencia, y por el mayor tiempo posible en el ciclo de fusión. Esto implica también reducir los arranques en frío (optimizar el programa de producción) y monitorear el proceso mediante control informático.
- Evitar el sobrecalentamiento innecesario: El metal debe alcanzar la temperatura requerida justo en el momento en que el área de moldeo está en condiciones de recibirlo.
- Optimización de la alta temperatura para eliminar escoria (buen equilibrio): la acumulación de escoria de bajo punto de fusión se puede reducir calentando el horno a temperaturas elevadas (1580 °C vs. 1450 °C normal). Una escoria acumulada en el revestimiento del horno afecta la eficiencia del mismo. La eliminación de la escoria requiere abrir la tapa del horno y ello provoca una pérdida de calor. Se requiere un buen equilibrio entre el aumento de la temperatura de la masa fundida y la práctica de remoción de escoria.
- Prevención de la acumulación de escoria: La acumulación de escoria de alto punto de fusión es más común y crea más problemas. Se debe principalmente al ingreso de arena y, en el caso de la fundición de hierro, de la presencia de aluminio en la masa fundida. Algunos operadores agregan fundente y realizan rutinas de limpieza, pero es mejor prevenir que curar. Se trata de minimizar la presencia de arena y aluminio en las materias primas.
- Minimización y control del desgaste de la pared refractaria: La vida útil del refractario depende del material usado, la química de la escoria (ácida o básica), la temperatura de operación (acero, hierro fundido, no ferrosos) y el cuidado al recubrir. La vida útil puede variar de 50 (acero, hierro fundido) a 200-300 (hierro fundido) fundidas.

Las medidas para seguir el desgaste del refractario incluyen programas de inspección visual, medición física y monitoreo instrumental. Las buenas prácticas de carga previenen los atoros y tensiones mecánicas, tales como el uso de

sistemas de carga automática, carga en caliente, evitar caídas elevadas y usar chatarra compacta y seca.

Hornos de arco eléctrico:

Las medidas para maximizar la eficiencia de los hornos de arco eléctrico son:

Emplear tiempos más cortos de fusión y/o tratamiento del metal utilizando métodos de control avanzados:

- Control cercano de la composición (por ejemplo, contenido de C, S, P) y del peso de los materiales cargados, así como de los materiales formadores de escoria.
- Control fiable de la temperatura de la masa fundida, que puede mejorar el rendimiento de las reacciones de refinado y evitar el sobrecalentamiento.
- Métodos más eficientes para el muestreo y la desescoriación, que pueden reducir el tiempo de inactividad del horno.

Hornos de reverbero:

Las medidas para maximizar la eficiencia de los hornos de reverbero son:

- Precalentamiento de la carga en el caso de hornos de solera seca o de pozo lateral.
- Uso de quemadores con control automático de temperatura.
- Ajuste de la relación aire-combustible en quemadores para lograr un exceso de aire entre 15 a 20%.

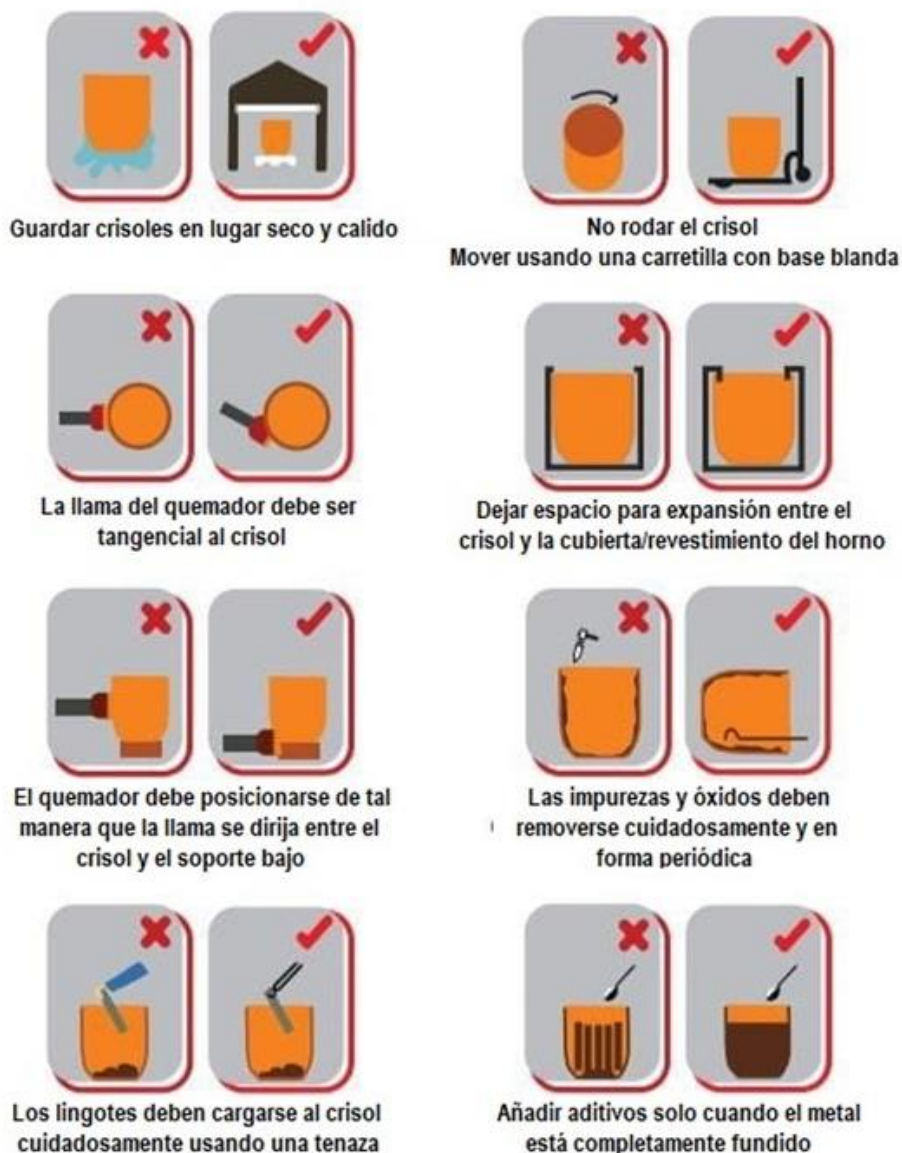
Hornos de crisol:

Las medidas para maximizar la eficiencia de los hornos de crisol son:

- Precalentamiento del crisol antes de la carga.
- Uso de crisoles con alta conductividad térmica y resistencia al choque térmico (por ejemplo, grafito).
- Limpieza de las paredes del crisol inmediatamente después del vaciado para eliminar escoria.
- Ajuste de la relación aire-combustible en quemadores para lograr un exceso de aire entre 15 a 20%.

En la **Figura 14** se muestran unas recomendaciones para el uso seguro y duradero de los crisoles.

Figura 14. Uso seguro y duradero de crisoles



Fuente: Adaptado de PVR Enterprise

Caso 3: Instalación de tapa simple en horno de inducción⁶

Información general:

⁶ The Energy and Resources Institute. Case Study: Non-ferrous foundry in Bokaro installs simple lid mechanism on its induction furnace - and saves 3 lakhs annually. Recuperado de: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.sameeksha.org/pdf/03%20CS-simple%20lid%20mechanism.pdf](https://www.sameeksha.org/pdf/03%20CS-simple%20lid%20mechanism.pdf). (12/10/2023)

Empresa	:	En reserva
Ubicación	:	Bokaro (India)
Tamaño de la empresa	:	Pequeña
Actividad	:	Fundición no ferrosa
Etapa/proceso en que aplica	:	Fusión
Clases CIIU aplicables al caso	:	N/A

Descripción:

La fundición no ferrosa estaba usando un horno eléctrico de inducción para fusión de las siguientes características:

Parametros	Valor
Año de instalación	2008
Rating, kW	250
Capacidad del crisol, kg	750
Numero de cargas al día	8
Tiempo de ciclo, minutos	55-60

El horno no estaba equipado con un mecanismo de tapa, lo que provocaba pérdidas de calor debido a la radiación a través de la abertura superior. Además, se estaba cargando materiales de gran tamaño en el horno. La carga grande reduce la utilización de la capacidad del horno y extiende el tiempo de fusión. En la Figura 15 se muestra una imagen del horno de inducción.

Figura 15. Carga del horno de inducción



Se recomendó instalar en el horno un mecanismo de tapa sencillo fabricado localmente. Además, se recomendó a la planta cargar metales de menor tamaño (aproximadamente menos de 1/3 del diámetro del crisol).

Beneficios:

➤ Beneficios económicos

La instalación del mecanismo de tapa y la carga de material de alimentación de menor tamaño permitirán un ahorro de aproximadamente 25 kWh/ton de masa fundida. El ahorro de energía será de 45000 kWh/año, lo que equivale a un ahorro económico de 300 000

Rupias/año (aprox 3600 US\$/año). La inversión en un mecanismo de tapa fabricado localmente es aproximadamente US\$1200. La recuperación de la inversión será de 4 meses.

La práctica de cargar materias primas de menor tamaño en el horno mejorará la productividad a medida que se reducirá el tiempo del ciclo.

La instalación del mecanismo de tapa tendrá beneficios colaterales, como un mejor entorno de trabajo y una reducción de la contaminación en el lugar de trabajo.

➤ **Beneficios ambientales**

La reducción de emisiones de GEI con la medida recomendada será de aproximadamente 37 tCO₂/año.

Medida 3.2: Manejo de la demanda pico en hornos de inducción

Cuando se utilizan varios hornos de inducción al mismo tiempo, el control de la máxima demanda de potencia es una forma de reducir los costos energéticos; además, los sistemas modernos de control también reducen el consumo energético específico.

Las empresas que consumen mucha energía pagan, además de la energía activa (kWh), un cargo basado en la máxima demanda (kW), la más alta medida en un período dado.

Los picos de potencia se deben al uso simultáneo de energía eléctrica por parte de varias cargas. El proveedor de energía debe garantizar la disponibilidad de esta potencia pico de forma permanente debido a su ocurrencia aleatoria.

En la red eléctrica, los picos de potencia provocan costos adicionales al proveedor de energía, que se facturan al usuario. Entonces al reducir la demanda máxima, se pueden reducir los costos de energía.

Un sistema moderno de control de demanda no desconecta el suministro eléctrico a los hornos cuando se alcanza la máxima potencia; sino que reducen el rendimiento de los hornos individuales durante un tiempo determinado. Esto se logra mediante un procesador de datos inteligente.

La operación simultánea de varios hornos da como resultado curvas de datos características del proceso global de fusión, que representan la demanda de potencia en un periodo dado. El procesador lo que hace es coordinar las necesidades de los diferentes hornos y así mejorar continuamente la curva característica global de potencia que resulta de las necesidades de energía de la suma de hornos. La cantidad de energía, resultante del proceso general de optimización, se asigna entonces a cada uno de los hornos. Se puede dar prioridad a ciertos hornos en forma manual.

Al evitar los picos de demanda, se puede equilibrar el suministro de energía por parte del proveedor, pudiéndose evitar la operación de una central térmica de carga pico, con la carga ambiental que supone ponerla en marcha.

Medida 3.3: Control y automatización del horno

El proceso de calentamiento en los hornos de fusión y tratamiento térmico puede ser optimizado mediante el uso de un sistema computarizado que controla en tiempo real los parámetros clave como la temperatura del horno y de la carga, la presión interna del horno, la relación aire-combustible en los quemadores para lograr una combustión óptima, lo que a su vez minimiza las emisiones de CO y NOx, así como la seguridad del proceso.

El sistema de control del horno recopila todos los datos necesarios relacionados con la operación del horno, como la utilización del equipo, la temperatura y presión del horno, las entradas y salidas de metal y el consumo de energía (combustible/electricidad). El operador del horno puede visualizar los datos en tiempo real y transferirlos para su posterior análisis. Los registros del horno que incluyen datos sobre modos de funcionamiento, tiempos de funcionamiento, curvas de temperatura y datos de consumo de energía se pueden almacenar con fines de control de calidad.

El beneficio del control automático del horno es incrementar su eficiencia y productividad, reduciendo el consumo de energía y las emisiones asociadas a ello.

Medida 3.4: Mejorar precalentamiento de cucharas

Entre las etapas de colada y vertido en moldes puede ocurrir mucha pérdida de energía si el sistema de transferencia de metal fundido permite una caída excesiva de temperatura del metal. Las pérdidas se pueden evitar utilizando medidas de buenas prácticas, tales como:

- Uso de cucharas limpias, precalentados a rojo intenso.
- Usar métodos eficientes para el precalentamiento de la cuchara (por ejemplo, utilizando quemadores porosos o quemadores de gas natural/oxígeno, o incluso eléctricos si la tarifa es atractiva).
- Usar cucharas de distribución y vertido, que sean lo más grandes posible y provistas de tapas que retengan el calor.
- Mantener tapadas las cucharas que estén vacías o ponerlas boca abajo cuando no se utilicen.
- Minimizar la necesidad de transferir metal de una cuchara a otra.
- Transportar el metal lo más rápido posible, respetando siempre los requisitos de seguridad.

Para el calentamiento de cucharas utilizando quemadores porosos, se informaron por ejemplo los siguientes beneficios:

- Reducción del consumo de gas de hasta un 60 %
- Mayor eficiencia energética.
- Reducción sustancial de las emisiones de CO₂ y NO_x.
- Reducción de la emisión de ruido por una combustión silenciosa.

- Permite una vida más larga de la cuchara y por lo tanto a la reducción del consumo de material refractario y sus residuos.

Medida 3.5: Combustión Oxy-Fuel en quemadores

Cuando se usa oxígeno en reemplazo del aire, sea total o parcialmente, para la combustión del gas en los quemadores de los hornos, la temperatura de llama se incrementa, ello porque se reduce el aporte del N₂ del aire (79%) que capta calor de la llama en la combustión. Esto permite una transferencia de calor más eficiente al metal a fundir y reduce el consumo de energía.

Por otro lado, dado que el flujo de gases de combustión Oxy-fuel se reduce por la disminución del aporte de N₂, esto permite que el tamaño del sistema de colección (ductos, filtro de mangas, etc.) sea más pequeño.

El beneficio directo del Oxy-fuel es entonces el logro de una temperatura de combustión más alta, lo que reduce el tiempo del fundido del metal, la reducción del consumo de energía y disminución de las emisiones de NO_x y CO₂.

Medida 3.6: Precalentamiento de chatarra

Los hornos de fusión producen también gases de combustión calientes de alta temperatura que se puede aprovechar para precalentar la chatarra.

Por ejemplo, en las fundiciones ferrosas que usan hornos de arco eléctrico, los gases de combustión, pueden ser usados para precalentar la chatarra a temperaturas entre los 450 °C y 600 °C, con lo cual se recupera parte de la energía ingresada al horno en forma de calor. Precalentar la chatarra tiene un beneficio adicional que es la eliminación completa de la humedad de la chatarra, lo cual es bueno para el proceso.

En las fundiciones no ferrosas, donde se emplean en algunos casos hornos de cuba, es un ejemplo de precalentamiento de chatarra. En una fundición de aluminio, se utilizan chatarra y lingotes de aluminio en frío, que se carga por la parte superior del horno a través de una compuerta. Los gases calientes de los quemadores suben a la chimenea y entran en contacto con la carga, lo que resulta en un secado completo y precalentamiento de la carga. Por ello los hornos de cuba tienen una mayor eficiencia energética que los hornos de reverbero, en particular.

Cuando se precalienta chatarra, el consumo de energía puede disminuir hasta 50-75 kWh/tonelada.

En las fundiciones no ferrosas, la eficiencia de los hornos de cuba oscila entre el 40 a 50%, frente a los hornos de reverbero con eficiencias del 15 a 40%, ello debido al precalentamiento de la chatarra.

Tratándose de nuevas tecnologías, existe en el mercado un horno de fusión que usa un quemador de premezcla aire-gas sin llama y una estación de doble olla (ver **Figura 16**) compuesto por una unidad de fusión del metal y otra unidad de precalentamiento adicional donde la carga se calienta recuperando calor de los gases de combustión, con lo cual se consigue una mayor eficiencia de la fusión.

Figura 16. Horno de crisol de doble olla para recuperar calor



Fuente: PROMEOS

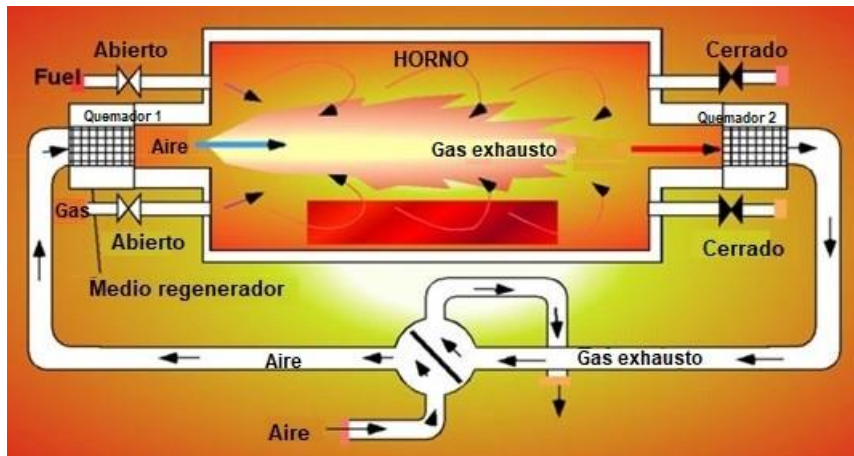
Medida 3.7: Precalentamiento del aire de combustión

Los gases de escape calientes de un horno pueden usarse para precalentar el aire de combustión utilizando quemadores regenerativos o recuperativos. Con ello la eficiencia térmica del horno aumenta porque se aprovecha gran parte del calor desperdiciado con los gases de chimenea.

Quemadores regenerativos

Los sistemas regenerativos utilizan dos quemadores con intercambiadores de calor que contienen un medio que absorbe calor. En la **Figura 17** se muestra un ejemplo de un sistema de quemador regenerativo que se aplica en hornos de recalentamiento continuo o en hornos de recocido. Cuando se enciende un quemador, los gases del horno se canalizan a través del otro quemador pasando a través de un regenerador que contiene un lecho de material refractario o cerámico que se calienta con los gases de escape y almacena energía, que luego se utiliza para precalentar el aire de combustión. Cuando el refractario está completamente calentado, el quemador encendido se apaga y el quemador regenerado se pone en funcionamiento. Los tiempos de inversión típicos están en el rango de 20 a 100 s.

Figura 17. Horno con quemadores regenerativos



Fuente: adaptado de TMC (2017)

Se han desarrollado nuevos quemadores regenerativos de bajo NO_x , que combinan la regeneración con la combustión de gas por etapas.

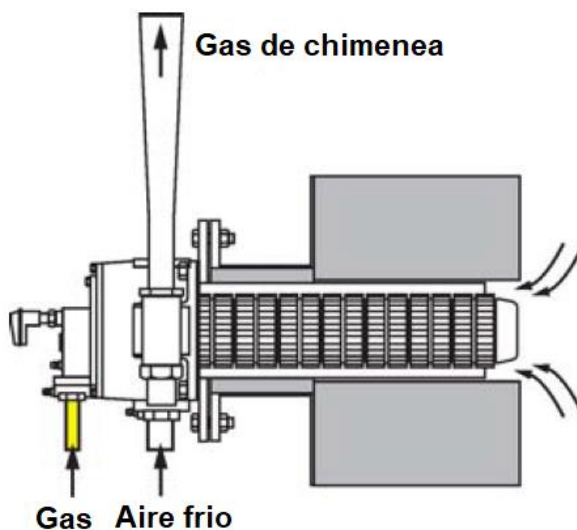
Un tipo especial de quemador regenerativo es el quemador de lecho integral que tiene un diseño más compacto ya que el lecho regenerativo está incorporado en el cuerpo del quemador. Son especialmente adecuados para hornos pequeños y donde hay limitaciones de espacio.

Quemadores recuperativos

Un recuperador es un intercambiador de calor instalado en la salida de gases de escape del horno, que permite que el calor se transfiera continuamente a través de las superficies calefactoras al aire de combustión entrante.

Hay varios diseños, uno de ellos son los quemadores autorrecuperadores que tienen intercambiadores de calor integrados para precalentar el aire de combustión. En la **Figura 18** se muestra un esquema de un quemador autorrecuperativo donde los gases de combustión de la cámara del horno precalientan el aire de combustión ingresante.

Figura 18. Quemador autorrecuperativo



Fuente: HEAT PROCESSING · (8) · ISSUE 3 · 2010

Otra opción es el uso de un recuperador de convección externo, conformado por un intercambiador de calor de tubos, cuyo diseño de tubos y patrón de flujo se basan en las características específicas de cada caso, incluyendo temperaturas, composiciones, límites de caída de presión y disponibilidad de espacio. En un diseño típico, el gas residual caliente del horno fluye a través del recuperador, pasando por fuera de los tubos verticales. El aire de combustión que fluye hacia los quemadores realiza dos o más pasos dentro de los tubos en flujo cruzado.

A continuación, se presenta un caso de estudio en hornos de tratamiento térmico con recuperación de calor y control computarizado de su operación.

Caso 4: Reemplazo de 02 hornos de tratamiento termico por otro nuevo con recuperación de calor y sistema Scada

Información general:

Empresa	: FUNDICIÓN VENTANILLA S.A.
Ubicación	: Callao- Lima
Tamaño de la empresa	: Mediana empresa
Actividad	: Fundición de metales ferrosos
Etapas/proceso en que aplica	: Tratamiento térmico
Clases CIIU aplicables al caso	: 2431 - Fundición de hierro y acero

Descripción:

Actualmente la planta produce 3200 ton/año, el 60% de su consumo de energía es gas natural y un 40% electricidad.

La planta cuenta con 2 hornos eléctricos de inducción para fusión y 07 hornos de tratamiento térmico que usan gas natural, de los cuales el Horno 7 es moderno, tiene recuperador de calor y 6 quemadores pulsantes de aire caliente, los demás hornos no tienen recuperador y usan quemadores modulantes.

Se ha realizado un estudio de factibilidad para instalar el nuevo horno de 12 ton (similar al Horno 7) en la zona actual del Horno 6 y se facilite su instalación conjunta con el Horno 7 existente ya que la carga y descarga de nuevo horno se va realizar con el método de carga, calentamiento y descarga por batch de producción y curvas según estándar y con el uso común del manipulador del Horno 7 que es de la misma marca del proveedor. Se retira el Horno 1 y Horno 2 para que el Horno 6 sea reubicado en el lugar.

Figura 19. Horno 7 con precalentador de aire, quemadores pulsantes y control SCADA.



Equipamiento y controles:

- Proveedor: Dhanaprakash (India)
- Capacidad: 12 toneladas de carga
- Temperatura del horno: 600 – 1050 °C, máximo 1150 °C
- Ventilador para sistema de combustión de alta temperatura
- 8 Quemadores de alta velocidad de gas natural, control On-Off, 10% exceso de aire
- Recuperador de calor de tubos para precalentar aire de combustión
- Tablero de control con PLC
- Control con HMI
- Tren de gas con sistema de medición de consumo de gas
- Sistema SCADA

Beneficios:

➤ Beneficios económicos

- Se prevé un ingreso promedio anual de US\$ 53000 por reducir costos de energía y aumento de productividad.

➤ Beneficios ambientales

- El proyecto en su conjunto permitirá lograr una reducción de las emisiones de 271.76 tCO₂e/año.

Medida 3.8: Optimización del sistema de aire comprimido

El aire comprimido es un servicio auxiliar muy importante en las fundiciones, ya que se emplea en diversas aplicaciones, tales como: herramientas neumáticas, llenado de cajas de machos, transporte de arena, soplado de moldes y cajas de machos, entre otros.

En los sistemas de aire comprimido se pueden aplicar las siguientes medidas para optimizar su operación con eficiencia energética:

- **Realizar un mantenimiento adecuado para reducir las fugas:** Además del propio mantenimiento de los compresores, según recomendaciones del fabricante, es importante también la red de distribución de aire. Cuando no hay buen mantenimiento, fugas pueden representar entre el 20 al 50 % de la

capacidad total de los compresores. Los puntos típicos de ocurrencia de fugas son: acoplamientos, mangueras, tubos, accesorios, reguladores de presión, trampas de condensado abiertas y válvulas de cierre, juntas de tuberías, desconexiones y selladores de roscas. Para verificar la existencia de fugas se puede emplear un detector ultrasónico o una solución jabonosa, o simplemente escuchar el ruido en el punto de fuga. Aplicar un monitoreo periódico de fugas es clave para reducir al mínimo las pérdidas, el objetivo debería ser un 5% máximo de fugas. En la **Tabla 16** se muestra el costo de las pérdidas por fugas de aire comprimido.

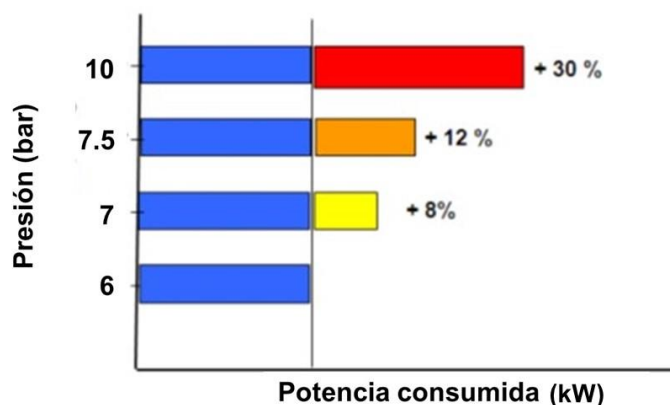
Tabla 16. Pérdidas por fugas de aire comprimido en una planta

%Fuga	2	4	6	8	15	20	25	30
Perdida (sol/año)	960	1919	2879	3838	7196	9595	11994	14392

Base: 3 compresores con una capacidad de 297 CFM, presión 110 psig, 3000 h/año operación, costo energía activa: 0.2761 sol/kWh.

- **Monitoreo de parámetros operativos:** Un sistema de monitoreo en la red de aire comprimido ayuda a operar el sistema en forma eficiente, incluyendo:
 - Manómetros en cada tanque y puntos de consumo principales.
 - Medidores diferenciales de presión en secadores y filtros.
 - Medidores de flujo para controlar la cantidad de aire consumido.
- **Minimizar las caídas de presión:** Las caídas de presión excesivas provocan un aumento del consumo de energía en el compresor. Las restricciones de flujo (por ejemplo, obstrucciones) resultan en presiones operativas más altas. Las caídas de presión se observan a menudo en los puntos de uso con fugas (mangueras, tubos, conexiones, secadores, filtros, reguladores, válvulas, boquillas, etc.). Las caídas de presión se minimizan con un buen diseño de la red y un buen mantenimiento de los equipos.
- **Reducir la presión de operación:** Una presión alta de aire requiere un gran consumo de energía en el compresor. Los compresores deben operar a la mínima presión necesaria para satisfacer a los usuarios. En la **Figura 20** se muestra cuanta potencia (kW) adicional consume un compresor al elevar la presión de operación.

Figura 20. Potencia (kW) adicional por elevar la presión de un compresor



Fuente: TKNika

- **Reducir la temperatura del aire de aspiración:** Cuando la temperatura del aire de aspiración se reduce, también lo hace la energía consumida por el compresor. Se puede reducir el consumo de energía trasladando la toma de aire al exterior de la sala, en una zona sombreada donde habrá aire más frío.
- **Usar sistemas de control de compresores eficientes:** Los sistemas de control garantizan que, en función de la demanda de planta, los compresores innecesarios se apaguen y se retrase el arranque de compresores adicionales hasta que sean necesarios. Esto se logra utilizando los siguientes sistemas de control:
 - Arranque/parada (On/off): El compresor se enciende o apaga dependiendo de la presión de descarga de la máquina. Se aplican en compresores pequeños (30 HP máximo) y no es apto para arranques frecuentes.
 - Carga/vacío: El compresor trabaja a velocidad constante entregando aire, pero una vez llegado al set-point se pone en vacío, hasta que la presión baje a otro set-point y vuelve a cargar. En vacío el compresor consume 15 a 35% de la carga plena, lo cual resulta ineficiente con respecto a otros sistemas de control.
 - Controles modulantes: Trabajan estrangulando el aire en la succión del compresor por medios mecánicos.
 - Control maestro de secuenciación simple: Los compresores individuales se ponen en línea o fuera de línea en respuesta a la demanda de presión medida del sistema.
 - Control multimaestro: Cuatro o más compresores se manejan al mismo tiempo utilizando un sistema avanzado de control de compresores, cada compresor funciona a un nivel que produce la operación más eficiente.
 - Control con variadores de frecuencia en motor (VFD): El VFD varía la frecuencia de la electricidad alimentada al motor del compresor y permite variar su RPM acoplándose a la demanda de aire. Es una opción de control al adquirir un nuevo compresor o modernizarlo. La frecuencia de arranques se reduce y son más suaves.

Caso 5: Mejora del sistema de aire comprimido en una planta⁷

Información general:

Empresa	: En reserva
Ubicación	: Estados Unidos
Tamaño de la empresa	: Grande
Actividad	: Fabricación de repuestos para automoviles
Etapas/proceso en que aplica	: Servicios auxiliares

⁷ Kaeser Compressors. Case Study: Automotive Overhaul
New equipment and smart controls drive a dynamic energy efficiency transformation. Recuperado de:
<https://ca.kaeser.com/en/compressed-air-resources/references/success-stories/automotive-overhaul.aspx>
(16/10/2023)

Clases CIIU aplicables : N/A
al caso

Descripción:

Problema:

Un fabricante de repuestos para automóviles estaba experimentando graves ineficiencias en su sistema de aire comprimido. Tres compresores centrífugos ventilaban el aire no utilizado y el compresor de tornillo se encendía y apagaba con demasiada frecuencia porque el sistema no estaba controlado adecuadamente. Además, el mantenimiento anual era excesivo y costaba alrededor de 109 000 US\$/año.

Solución:

Se realizó un análisis integral de la demanda de aire para determinar el perfil de demanda real. Con base a ello, se diseñó un nuevo sistema más eficiente que incluía un controlador maestro del sistema (Sigma Air Manager - SAM), un compresor de tornillo con VSD de 450 HP, un compresor de tornillo de 250 HP, y el compresor de tornillo anterior. Los compresores centrífugos subutilizados fueron retirados.

Resultado:

El controlador SAM monitorea los compresores y selecciona la combinación de unidades con mayor eficiencia energética para satisfacer la demanda fluctuante. El consumo energético se ha reducido en 1 093 600 kWh/año. El sistema también tiene costos de mantenimiento mucho más bajos y con SAM equilibrando las horas de carga entre los compresores.

Beneficios:

➤ **Beneficios económicos**

- Ahorro en costos de energía: 129 046 US\$/año
- Reducción en servicios utilitarios: 169,857 US\$/año
- Ahorro total durante el primer año: 298,893 US\$/año
- Plazo de recuperación simple: 17 meses

➤ **Beneficios ambientales**

Reducción de las emisiones de GEI por el menor consumo de electricidad en planta.

Medida 3.9: Uso de motores eficientes

Aproximadamente el 97% del costo en el ciclo de vida de un motor corresponde al consumo de energía, solamente el 2% corresponde a la inversión inicial y el 1% al costo de mantenimiento. Por ello, la adecuada selección inicial y una inversión mayor en un motor de alta eficiencia, genera ahorros importantes dada la larga vida útil que tienen los motores (20 años o más)⁸.

La eficiencia de un motor eléctrico es la relación entre la potencia de salida (mecánica) y la potencia de entrada (eléctrica). La potencia de salida es siempre

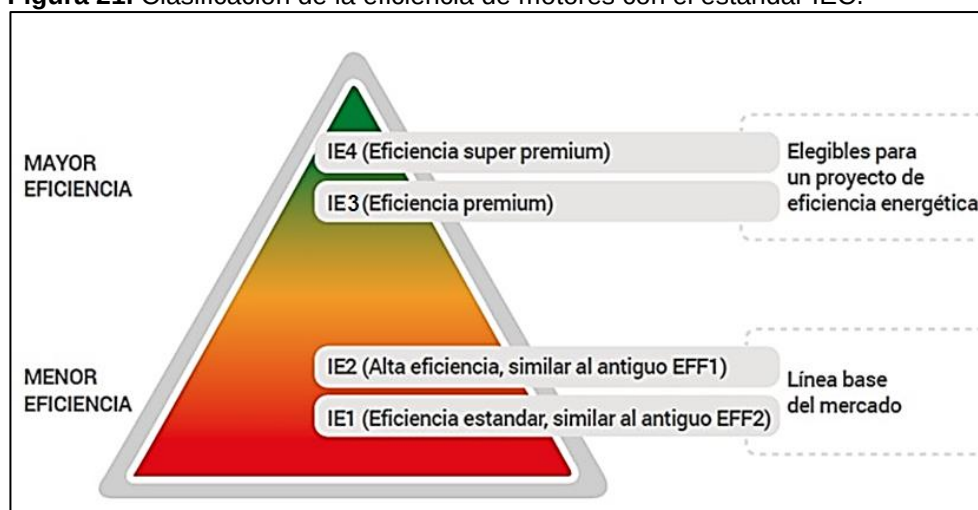
⁸ Guía para la evaluación de elegibilidad de financiación de proyectos de eficiencia energética - Tipo de proyecto: Motores de alta eficiencia. CAF.

menor a la potencia de entrada ya que parte de la energía se pierde como calor y fricción durante la conversión eléctrica-mecánica. En el diseño de un motor se trata de minimizar dichas pérdidas para aumentar la eficiencia.

Hay que tener en cuenta también que la mayoría de motores se diseñan para trabajar entre el 50 y 100% de la carga nominal, siendo que la eficiencia máxima se suele alcanzar cerca del 75% de carga nominal, disminuyendo la eficiencia a cargas más altas o bajas.

En la **Figura 21** se muestra los diferentes estándares de eficiencia de motores bajo el estándar de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas en inglés).

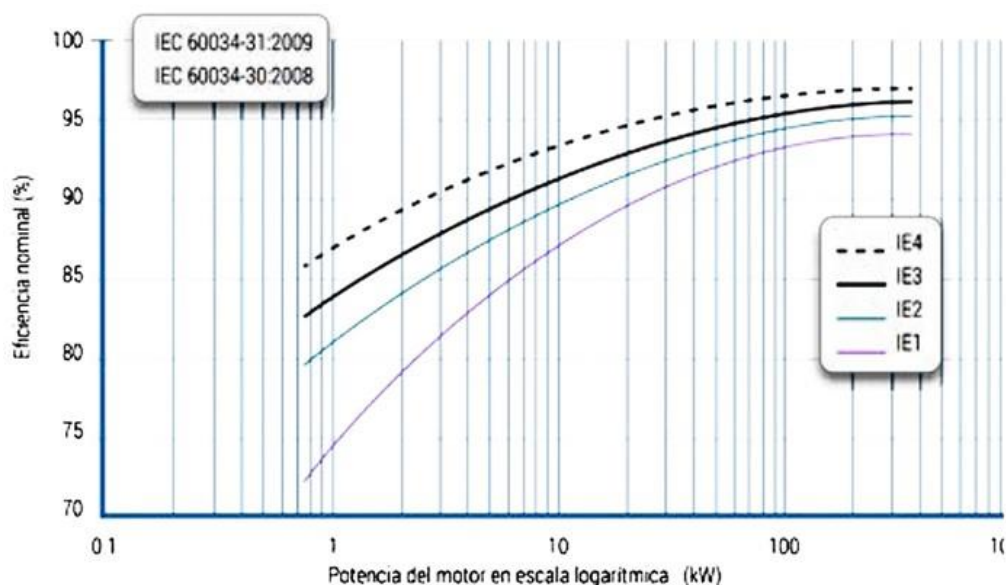
Figura 21. Clasificación de la eficiencia de motores con el estándar IEC.



Fuente: CAF

La eficiencia nominal de un motor depende de su potencia, un motor de mayor eficiencia consume menos energía para desarrollar la misma potencia mecánica:

Figura 22. Eficiencia de un motor de acuerdo con el estándar y la potencia



Fuente: CAF

Un proyecto de eficiencia en motores consiste en determinar cuáles motores antiguos de eficiencia estándar son susceptibles de ser reemplazados por motores de mayor eficiencia de manera rentable, es decir que el ahorro de energía pague la inversión en el nuevo motor.

El reemplazo de los motores estándar existentes tiene que estudiarse caso por caso (potencia, antigüedad, estado de conservación, horas de uso al año), incluso realizando mediciones de carga en periodos representativos de operación.

En principio, los motores candidatos serían los que reúnen los siguientes requisitos:

- Mayor potencia (digamos mayor a 10 HP).
- Operación continua (mas de 2000 h/año).
- Antiguos con más de 15 o 20 años.
- Que hayan sido reparados (rebobinados).
- Los que trabajen con sobrecarga o muy baja carga.

Adicionalmente, es posible incluir en la inversión la instalación de variadores de frecuencia para optimizar la operación del motor en aquellos procesos de operación con condiciones variables.

Medida 3.10: Uso de variadores de frecuencia

Un variador de frecuencia (VFD, del inglés Variable Frequency Drive), es un dispositivo utilizado para controlar la velocidad y la potencia de motores eléctricos al variar la frecuencia y la tensión suministrada a estos motores.

Un VFD es muy útil en aquellos casos en donde un equipo accionado por un motor eléctrico de cierta potencia trabaja a cargas variables y un número significativo de horas al año.

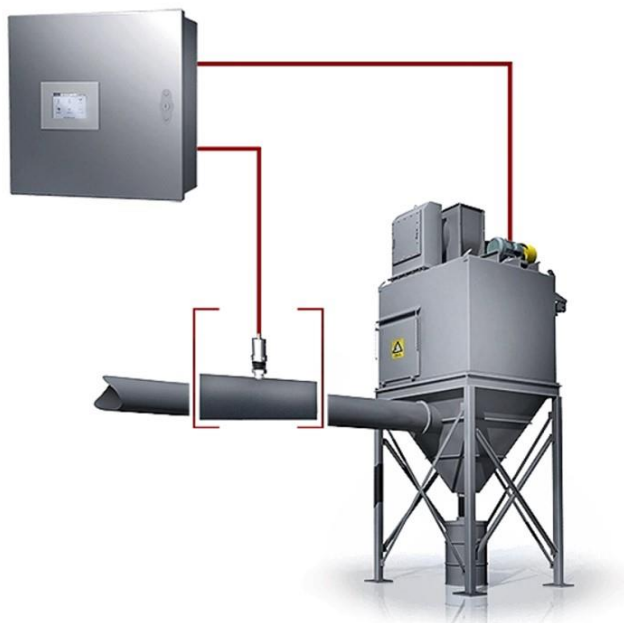
La aplicación de un VFD en una fundición puede rendir beneficios operativos y en el consumo de energía en varias áreas de la operación:

- **Control de velocidad en motores:** Los VFD permiten variar la velocidad de motores eléctricos de forma precisa y eficiente, en transportadores, mezcladoras, bombas y otros equipos.
- **Control de la temperatura en hornos:** En hornos de fundición, los VFD se utilizan para controlar la velocidad de los ventiladores o sopladores que regulan la temperatura y la circulación de aire en el horno. Esto permite un control más preciso de la temperatura y reduce el consumo de energía.
- **Reducción de picos de corriente:** Al arrancar motores de gran potencia, se pueden producir picos de corriente que pueden sobrecargar la red eléctrica. Los VFD permiten un arranque suave, lo que reduce los picos y protege la infraestructura eléctrica.
- **Optimización de procesos de fundición:** En fundiciones que utilizan colada continua, un VFD puede ajustar la velocidad de las cintas transportadoras, las

bombas y otros equipos para adaptarse a las condiciones de flujo de metal fundido, lo que optimiza el proceso y reduce los desperdicios.

- **Regulación de la presión en ventiladores y bombas:** Los VFD pueden utilizarse para ajustar la velocidad de sopladores y bombas, lo que permite mantener una presión constante y ajustarla según las necesidades.

Figura 23: Aplicación de VFD en el ventilador de un filtro de mangas



Fuente: AIREX Industries

Tener en cuenta que un VFD puede incrementar las pérdidas en el motor (3-5%) e introducir armónicos en la red, por lo que es necesario el uso de filtros (hasta 97% reducción).

3.3.2. Reemplazo de energía

En el Perú las fundiciones usan diferentes fuentes de energía como los combustibles fósiles (Gas natural, GLP, Diésel B5 principalmente) y electricidad, la cual es generada en un 44% en centrales termoeléctricas y un 56% en centrales que usan fuentes renovables (hidroenergía, eólica y solar)⁹. Por ello, desde el punto de vista ambiental, usar electricidad en el Perú resulta en una menor emisión indirecta de CO₂ en comparación con el uso de los combustibles fósiles (ver **Tabla 13** antes presentada); y en algunos casos, cuando la tarifa eléctrica es baja, también en reducción de costos en la planta.

Medida 3.11: Reemplazo de montacargas Diesel/GLP por electricos

En el mercado local se ofrecen montacargas industriales, ya sea en venta o rentados, que funcionan con diferentes tipos de energía, según preferencias del usuario, que en principio optan por las unidades que usan GLP por ser lo tradicionalmente usado.

⁹ Según Estadísticas de operación del SEIN 2022 (COES).

Existe la opción de usar montacargas eléctricos en lugar de unidades a GLP, con un beneficio en el costo de operación y reducción de emisiones de CO₂.

A continuación, se presenta un caso de una planta que reemplazó sus montacargas a GLP por otros eléctricos, obteniendo beneficios económicos y ambientales.

Caso 6: Reemplazo de montacargas a GLP por eléctricos

Información general:

Empresa	:	Fundición Ferrosa S.A.C.
Ubicación	:	Lima
Tamaño de la empresa	:	Mediana
Actividad	:	Fabricación de piezas de hierro, acero, inoxidable, manganeso, alto cromo
Etapas/proceso en que aplica	:	Servicio auxiliar
Clases CIIU aplicables al caso	:	2599 - Fabricación de otros productos elaborados de metal N.C.P.

Descripción:

La empresa empleaba 3 montacargas a GLP alquilados a un tercero, y en planta se hacía el reemplazo de los balones de GLP. Se llegó a un acuerdo con el proveedor para un nuevo contrato, pero con alquiler de montacargas eléctricas, para lo cual el proveedor suministró los vehículos y la estación de carga de baterías.

Figura 24. Estación de carga de baterías



Figura 25. Montacargas con batería eléctrica



Beneficios:

➤ Beneficios económicos

- La empresa ha logrado un ahorro 5 000 Soles/mes.
- No se realizó ninguna inversión en la empresa.

➤ Beneficios ambientales

Reducción de las emisiones de CO₂ ya que no hay emisiones de gases de combustión de GLP.

Medida 3.12: Aplicación de energía solar

La aplicación de la energía solar en las fundiciones puede ser desafiante debido a la alta demanda energética y la necesidad de temperaturas altas en los procesos de fundición de metales. Sin embargo, existen algunas formas en que la energía solar puede aplicarse en las fundiciones dependiendo de la latitud de ubicación de la planta:

Generación de electricidad: La energía solar fotovoltaica (paneles solares) se puede utilizar para generar electricidad para alimentar algunas cargas menores como iluminación (interna y perimetral), equipos de aire acondicionado, aparatos de oficina. Los paneles solares pueden instalarse en espacios libres disponibles como techos de oficinas, almacenes, estacionamientos, siempre y cuando brinden acceso seguro y permitan soportar el peso de los paneles, además de tener la orientación conveniente.

Calentamiento de agua: Los sistemas solares térmicos (termas solares) pueden utilizarse para calentar agua, la cual puede ser útil en procesos de fundición específicos o incluso aseo del personal. Dicha aplicación es común en lugares de la sierra del Perú.

Almacenamiento de energía: Combinar sistemas de energía solar con sistemas de almacenamiento de energía, como baterías, puede permitir un suministro más constante y controlado de energía solar, lo que es especialmente útil en aplicaciones críticas donde se requiere un suministro ininterrumpido.

3.3.3. Eficiencia de materiales

La aplicación de la eficiencia en el uso de materiales en una fundición es fundamental para reducir el desperdicio de materiales, reducir costos y minimizar los residuos. En lo que sigue, se presentan algunas medidas de eficiencia de materiales en una fundición, pero tener en cuenta que la aplicación puede variar según el tipo de fundición y los materiales utilizados.

Medida 3.13: Minimización del consumo de resina y aglutinante

La minimización del consumo de productos químicos se puede lograr mediante la optimización de los controles del proceso y el manejo de materiales. En lo que sigue se describen las medidas del proceso.

Una manera común de compensar un control deficiente del proceso es hacer un consumo excesivo de aglutinantes, lo que ocasiona su desperdicio. A continuación, se indican, como ejemplo, algunos parámetros clave para una buena gestión del aglutinante:

- **Consistencia de la arena:** Usar una arena de una calidad acorde con el aglomerante. Un almacenamiento bien realizado de la arena y sus pruebas de laboratorio (pureza, tamaño de grano, forma, humedad) son de vital importancia.

Un bajo contenido de finos y una cantidad máxima de arena reutilizada reducirán la cantidad de resina necesaria.

- Control de temperatura: La temperatura de la arena debe mantenerse en un rango estrecho, con controles periódicos y ajuste de la adición del endurecedor. Colocar el calentador de arena justo antes del mezclador permite un control estricto de la temperatura.
- Mantenimiento y limpieza de mezcladoras.
- Calidad del molde: Comprobar, solucionar y prevenir defectos de moldeo.
- Tasas de adición: la adición de aglutinante adecuada depende del tipo de aglutinante, la superficie de la arena y el tamaño de la fundición.
- Funcionamiento del mezclador: La optimización del rendimiento del mezclador implica el seguimiento y control de su operación.

La **Tabla 17** enumera las variables del proceso de mezcla que son fáciles de medir. La interconexión de los controles con alarmas permite alertar al operador sobre cualquier condición anómala.

Tabla 17. Variables de proceso como indicadores del desempeño del mezclador

Variable de proceso	Comentario	Instrumentación
Flujo de arena	Puede variar como resultado de obstrucciones en la compuerta de descarga que altera el flujo de arena.	Caudalímetro de impacto.
Temperatura de arena	Determina la velocidad de endurecimiento y la cantidad/tipo de endurecedor requerido.	Se puede utilizar un instrumento de control de proceso para ajustar la adición del endurecedor para compensar los cambios en la temperatura de la arena.
Consumo de potencia	Proporciona un indicador de limpieza del mezclador.	Indicador de potencia del motor.
Flujo de resina y endurecedor	Puede variar como resultado de bombas desgastadas, cambios de viscosidad con la temperatura, bloqueos o fugas en tuberías y boquillas, pegado de válvulas antirretorno, etc.	Caudalímetro de desplazamiento positivo, electromagnéticos o coriolis.
Horas de operación	Útil para evaluar el rendimiento frente a los costos de capital y mantenimiento.	

Esta técnica se aplica a todas las fundiciones que utilizan arenas aglomeradas químicamente.

Varias fundiciones han logrado reducciones en la adición de aglutinante del 5 al 25%, además de casi eliminar la producción de moldes de desecho. Dado que los VOCs constituyen hasta el 50-60% en peso del aglutinante, y la mayoría se emite durante el mezclado de arena y la colada, al usar menos aglutinante, se emite menos VOCs al ambiente.

Medida 3.14: Recuperación mecánica de arena

a) Recuperación de arena fijada en frío

Para la recuperación de arenas de fraguado en frío (por ejemplo, arena de furano) y arena de núcleos sin curar, se utilizan técnicas mecánicas simples que incluyen: la rotura de pedazos, la segregación de los granos de arena y limpieza por fricción intergranular, con el consiguiente desempolvado y enfriamiento hasta la temperatura de trabajo. Se utilizan varios tipos de trituradoras (por ejemplo, impacto, mandíbulas). La técnica se puede utilizar para toda arena de fraguado en frío, excepto la arena de silicato.

El beneficio de la regeneración mecánica es la reducción del consumo de arena virgen y de la arena residual que se dispone en relleno. Para arenas de furano fraguadas en frío, se ha reportado una regeneración de alrededor del 78% o más del 90%. La arena regenerada se puede reutilizar en el mismo ciclo de moldeo, con pequeñas adiciones de arena virgen para compensar las pérdidas de calidad.

Requiere energía adicional y provoca emisiones de polvo adicionales y residuos de polvo a disponer.

b) Recuperación de arena aglomerada con arcilla o químicamente con rueda abrasiva

El sistema utiliza una rueda abrasiva que gira horizontalmente para eliminar la capa dura de bentonita de la arena, y también los aglutinantes químicos de los granos de arena. Alrededor de la muela hay una rueda de paletas que gira lentamente, que mueve continuamente la arena hacia la rueda.

c) Recuperación de arena usando tambor de impacto

Se basa en la molienda intergranular de la arena y resulta mejor para arena unida químicamente. La arena se introduce en un tambor con un eje interno giratorio, equipado con pequeñas cuchillas. Los granos de arena impactan contra la pared del tambor y entre sí. Este impacto produce una acción de limpieza mecánica abrasiva. Los finos se eliminan con el gas de escape.

Si se aplica para una mezcla de arena con bentonita/orgánico, la recuperación va precedida por un separador magnético, para eliminar la arena verde.

d) Recuperación de arena usando sistema neumático.

En un sistema neumático, los aglutinantes se eliminan de los granos de arena mediante abrasión e impacto. La energía es dada por una corriente de aire comprimido, dando como resultado la eliminación simultánea del polvo. Una ventaja es que puede controlar la dirección y velocidad de la arena. Debido al uso de aire comprimido, el consumo de energía es mayor en comparación con los sistemas mecánicos puros.

Medida 3.15: Recuperación térmica de arena

La recuperación térmica utiliza calor para quemar aglutinantes y contaminantes y requiere una operación mecánica previa para obtener una arena de tamaño correcto y separar algún contaminante metálico, y también puede incluir una abrasión (parcial) de la bentonita y la eliminación de polvo.

El calentamiento de la arena se realiza en un horno de lecho fluidizado a una temperatura entre 700 y 800 °C. También se utilizan hornos rotatorios u hornos de hogares múltiples. El calor se aporta por combustión de gas, calentadores eléctricos o emisores de infrarrojos de onda corta. Los gases de salida se queman aparte para eliminar el CO y los VOCs que puedan estar presentes, y se enfrían (con o sin recuperación de calor) antes de conducirlos a un filtro de mangas.

Los sistemas térmicos se utilizan normalmente para sistemas de arena químicamente aglomerada y arena mixta, siempre que la proporción de la primera (núcleos) sea suficientemente alta. Sin embargo, se indica que algunos aglomerantes pueden dejar residuos de sales inorgánicas en la superficie del grano; asimismo las resinas furánicas provocan la emisión de SO₂ si se utilizan ácidos sulfónicos como agente endurecedor. Si se utiliza ácido fosfórico como endurecedor, pueden quedar residuos de sales de fósforo que se acumulan en la arena.

El grado de implementación de la regeneración térmica es bajo en comparación con la mecánica.

Medida 3.16: Minimización de formación de escoria

La formación de escoria durante el proceso se puede minimizar aplicando medidas tales como:

- Utilizar chatarra limpia.
- Utilizar una temperatura del metal más baja.
- Evitar picos de temperatura elevados.
- Evitar tiempos prolongados de permanencia del metal fundido en el horno de fusión.
- Hacer un uso adecuado de los fundentes.
- Elegir adecuadamente el revestimiento refractario del horno.
- Refrigerar con agua las paredes del horno para evitar el desgaste del revestimiento refractario.
- Desnatado de aluminio líquido.
- Usar aire comprimido para recuperar los residuos de aluminio.
- Separar las virutas de metal de los aceites mediante secado.

Con dichas medidas se minimiza la generación de residuos y se reduce las emisiones a la atmósfera.

Medida 3.17: Mejora del rendimiento de la fundición y reducción de la chatarra

El rendimiento del metal es la relación entre una buena fundición y el total de metal fundido, lo cual resulta en valores menores al 100% debido a las pérdidas de metal (pérdidas por fusión, metal derramado, etc.) y al metal de retorno (metal raspado, canales, chatarra fundida). En Europa por ejemplo las fundiciones tienen rendimientos tal como se muestra en la **Tabla 18**.

Tabla 18. Rendimiento de metal (%) en fundiciones europeas según muestra estadística

Dato	Fundiciones de hierro	Fundiciones de acero	Fundiciones no ferrosas
Promedio	51	53	56
Media	58	57	60
Percentil 20	5	41	39
Percentil 80	80	69	85
Número de valores	73	23	45

Fuente: TWG, Data collection for the SF BREF review, 2021

Una mejora del rendimiento implica reducir la pérdida y la cantidad de metal devuelto, para lo cual se pueden aplicar las siguientes medidas:

- Aplicar un método eficiente para: diseño adecuado de copas de vertido, canales, mazarotas, compuertas, y rendimiento optimizado de la caja (piezas fundidas/metal vertido en un molde). Una herramienta valiosa es el uso de simulación asistida por computadora de fundición, vertido y solidificación.
- Aplicar buenos procedimientos en las operaciones de fusión y vertido: con el fin de reducir pérdidas de fusión, excesiva escoria, etc.

- Aplicar buenas prácticas de moldeo y fabricación de machos: con el fin de reducir descartes por deficiencias en las operaciones de fabricación de moldes y machos.
- Aplicar refundición directa y evitar materiales de bebedero.

El aumento del rendimiento del metal da como resultado un menor consumo de energía, arena y aditivos por unidad de buena fundición.

3.4. Estrategia 4: Logística inversa

La economía circular busca mantener el valor de los bienes y servicios en los mercados, así, la logística inversa se ocupa del retorno de los productos y materiales luego de una actividad productiva o del consumo final, con el objetivo de reducir la pérdida de estos materiales. Sin embargo, para que la estrategia funcione, es necesario generar capacidades e infraestructura adecuada con un sistema de segregación en la fuente, recolección y tratamiento óptimo y eficiente desde el consumidor hasta el fabricante o proveedor. Siendo así, la participación del consumidor es indispensable para la marcha y sostenibilidad de esta estrategia, ya que participa de manera activa en el sistema, y asegura la calidad de los materiales recuperados para facilitar su integración en las cadenas de reciclaje.

La logística inversa no solo puede contribuir a la reducción de residuos y de costos de producción (con el debido análisis de los costos en la cadena); sino que también puede mejorar la reputación de la empresa en términos de sostenibilidad y responsabilidad social.

A continuación, se describe algunas medidas de logística inversa que pueden aplicarse en una fundición:

Medida 4.1: Recogida de chatarra

La recogida de chatarra es un componente esencial de la logística inversa en una fundición. En este caso, la fundición establece un sistema para recolectar piezas y productos que contienen metal reciclable, que pueden provenir de los clientes o incluso de procesos de desecho de otras industrias.

Ello implica implementar programas de recogida, donde se alienta a los clientes a devolver productos obsoletos o piezas metálicas desgastadas en lugar de desecharlas. Esto puede involucrar puntos de recogida o acuerdos de devolución con distribuidores o minoristas.

Medida 4.2: Retorno de embalajes y envases

En algunos casos, las fundiciones utilizan envases o embalajes especiales para el transporte de productos, y la logística inversa se aplica al retorno y la reutilización de esos envases o embalajes:

- Envases y embalajes reutilizables: En lugar de utilizar envases de un solo uso, las fundiciones pueden implementar envases y embalajes reutilizables, como

contenedores metálicos o pallets de madera, que se devuelven después de su uso. Esto reduce la necesidad de producir nuevos envases constantemente.

- **Gestión de la logística de envases:** Para hacer que el sistema funcione, se debe establecer un proceso de seguimiento y gestión de envases y embalajes. Esto incluye etiquetar, rastrear y gestionar los envases a medida que se envían y se devuelven.
- **Inspección y mantenimiento:** Los envases reutilizables deben inspeccionarse y mantenerse regularmente para asegurarse de que estén en buenas condiciones. Esto puede incluir reparaciones y mantenimiento preventivo.

Medida 4.3: Reparación y remanufactura

En lugar de desechar productos o piezas defectuosas, considerar la posibilidad de repararlas o remanufacturarlas para que puedan volver al mercado con un uso extendido. Ver también Medida 12.1.

3.5. Estrategia 5: Simbiosis Industrial

El modelo de economía circular requiere de la acción colaborativa entre las empresas de la misma cadena de valor o de aquellas que representan otros sectores, esto con el fin de poder generar en sus modelos de negocios medidas que permitan la optimización de recursos y energía.

La simbiosis industrial es una forma de intermediación para reunir a las empresas en colaboraciones innovadoras, y en las que ambas se benefician, identificando oportunidades para la valorización o aprovechamiento de los residuos o mermas de una empresa y su utilización como materia prima para otra¹⁰.

En la misma línea, la simbiosis supone una transacción en las empresas participantes de forma que las salidas de una sirvan como entradas de otras. A este emparejamiento se conoce como “establecimiento de sinergias” ya que los beneficios globales de esta transacción son mayores que la suma de los beneficios individuales por separado.

La simbiosis industrial se puede aplicar entre una fundición y otras empresas de la siguiente manera:

Medida 5.1: Intercambio de residuos

Los residuos de arena de fundición (RAF), es decir la arena de moldeo no recuperable, podrían ser entregadas a otras empresas para ser utilizadas como materia prima en la producción de cemento, en la preparación de concreto y en la preparación de carpetas asfálticas. En esos casos la fundición evita pagar por la disposición de las RAF en relleno y las otras empresas reducen costos en materias primas. Ver también Medida 10.4.

¹⁰ Fostering Industrial Symbiosis for a Sustainable Resource Intensive. (s.f). *¿Qué es la simbiosis industrial?* Recuperado de: <https://fissacproject.eu/es/que-es-la-simbiosis-industrial/> (21/10/2023).

Medida 5.2: Colaboración en investigación y desarrollo

La colaboración en proyectos de investigación y desarrollo con empresas relacionadas puede conducir a la mejora de procesos, la innovación y la adopción de prácticas más sostenibles en la fundición. Por ejemplo, un grupo de empresas de fundición y alguna universidad podrían investigar cómo se podría utilizar los RAF en la construcción o la producción de materiales de construcción.

3.6. Estrategia 6: Industria 4.0

Industria 4.0 es un término utilizado para referirse a la cuarta revolución industrial. Al igual que las revoluciones industriales anteriores, se caracteriza por la implementación de nuevas tecnologías que hacen que la producción sea más eficiente, centrándose en la automatización de tareas rutinarias, lo que trae beneficios como el ahorro de tiempo y energía, facilita el flujo de trabajo en un ambiente más seguro, reduciendo los costos de producción¹¹.

Puede que la Industria 4.0 no sea de necesidad para todos los casos, pero puede ser de gran ayuda para las industrias que operan en un entorno altamente competitivo. En el mundo digital todo es posible, pero sin un retorno de la inversión adecuado, dichas tecnologías pueden resultar irrelevantes.

Fundición 4.0 es parte de la Industria 4.0 centrada explícitamente en las industrias de fundición, y se desarrolló para mejorar aspectos como la seguridad, el control de calidad, la información de la cadena de suministro, la eficiencia y el análisis de datos a través de tecnología de automatización.

Fundición 4.0 incluye varias tecnologías como la fundición a presión inteligente, inteligencia artificial/aprendizaje automático, robots y servicios en la nube para gestionar datos.

Medida 6.1: Fundición a presión inteligente

La fundición a presión inteligente, en las fundiciones no ferrosas, es un aspecto notable de la automatización que se creó para paliar, mediante software de aprendizaje automático, una serie de fallas tales como: piezas fundidas dañadas, errores de producción y bajo control de calidad, lo cual se traduce en pérdidas económicas para la empresa.

Según *General Die Casters Inc.*, la fundición a presión automatizada ha demostrado los siguientes beneficios:

- Mejora en la calidad del producto.
- Mayor productividad.
- Reducción de residuos.
- Procesos de fundición a presión más seguros.

Dichos beneficios en conjunto dan como resultado mayores ganancias y menos errores en el proceso de fundición a presión.

¹¹ Foundry Automation. Recuperado de: <https://www.generalkinematics.com/blog/foundry-automation/>. (24.10.23)

Medida 6.2: Automatización de fundición mediante IA

La mayor parte de la IA, en lugar de la inteligencia real, usa el aprendizaje automático, el cual utiliza algoritmos basados en datos existentes para realizar estimaciones o predicciones fundamentadas.

Además del uso de la IA en la creación de piezas fundidas, también puede usarse para minimizar la chatarra y reducir costos. Al igual que con la fundición a presión, la IA puede realizar simulaciones de piezas fundidas para minimizar la chatarra sobrante y aumentar la calidad de la fundición.

Si bien la IA puede aumentar la precisión y automatizar muchos procesos, no pretende reemplazar a los operadores e ingenieros de planta, pues éstos tienen supervisar la IA para garantizar que no haya errores y que todo funcione sin problemas.

Medida 6.3: Soluciones inteligentes para la cadena de suministro

La automatización con IA puede mejorar la gestión de la cadena de suministro de las fundiciones, optimizando el monitoreo y la comunicación de un proveedor a otro. Así, existen software de cadena de suministro inteligente que pueden monitorear información como:

- Lugares de envío.
- Volumen de envíos.
- Materiales disponibles para enviar.
- Costos de envío.
- Etc.

Utilizando el aprendizaje automático, el software de cadena de suministro inteligente puede determinar la manera más óptima de obtener materiales al menor costo y más rápido. Además, puede predecir obstrucciones o retrasos dentro de la cadena de suministro debido a elementos como el clima.

Medida 6.4: Automatización de equipos de fundición

Una fundición puede avanzar hacia la automatización actualizando sus equipos a estándares modernos. Los equipos antiguos requieren más mantenimiento y mano de obra que los equipos con tecnología más moderna con menos errores y mayor productividad. Por ejemplo, muchas fundiciones utilizan equipos separados de acondicionamiento de arena, fundición/enfriamiento y sacudida; sin embargo, existen equipos especializados, como VIBRA-DRUM, que pueden hacer las tres cosas simultáneamente en una sola máquina y ocupan menos espacio y energía.

Otra forma de automatizar las fundiciones es empleando equipos robóticos, los cuales pueden automatizar partes del proceso de manipulación de materiales, mejorando la seguridad de la fundición. Por ejemplo, se pueden utilizar robots para las siguientes actividades rutinarias:

- Manipular materiales a altas temperaturas, eliminando el riesgo de quemaduras y otras lesiones asociadas con dicho manipuleo.
- Descarga de piezas fundidas en bruto para colocarlas en una faja transportadora.
- Vehículos guiados automáticamente que transfieren piezas a unidades de mecanizado, donde los tornos CNC producen componentes de tolerancia estricta.
- Apilamiento de piezas en pallets.

3.7. Estrategia 7: Uso compartido

Se entiende por uso compartido a la capacidad de brindar acceso a productos, equipamiento, espacios, y otros recursos, maximizando su utilización, ya sea en la modalidad de contrato entre empresas, alquiler a mediano plazo, suscripción o uso recurrente, entre otros.

La estrategia 7 de uso compartido en el sector fundición, comprende principalmente las siguientes medidas:

Medida 7.1: Compartir maquinaria de fundición

La maquinaria de fundición que se puede compartir entre diferentes empresas o fundiciones puede variar según las necesidades y la disponibilidad de recursos. Algunas máquinas y equipos comunes que pueden compartirse incluyen:

Sistemas de moldeo y modelado: Las máquinas de moldeo y modelado, como las impresoras 3D utilizadas para crear modelos de moldes, son equipos costosos. Compartir estos sistemas puede ayudar a reducir los gastos de capital y mejorar la eficiencia en la producción.

Equipos de tratamiento térmico: Los equipos utilizados para el tratamiento térmico de piezas fundidas, como los hornos de temple, pueden compartirse para garantizar un proceso de tratamiento eficiente y controlado.

Máquinas de limpieza y acabado: Las máquinas como granalladoras y máquinas de desbarbado, son costosas. Compartir las puede ayudar a reducir los costos operativos.

Herramientas de diseño y simulación: Software de diseño 3D y software de simulación de procesos de fundición pueden utilizarse de manera conjunta para diseñar y optimizar piezas y procesos.

Equipos de inspección no destructiva: Equipos de radiografía y ultrasonido, pueden ser compartidos para garantizar la integridad de las piezas.

Equipos de laboratorio: Laboratorios de análisis metalúrgicos y de calidad pueden compartirse para pruebas y análisis, lo que puede ser beneficioso para fundiciones más pequeñas.

Sistema de recuperación de arena: Una planta que cuenta con el sistema de recuperación de arena usada, puede ponerla a disposición de otras fundiciones que no la tienen, de tal manera que la primera obtiene ingresos y las segundas reducen costos en la compra de arena virgen.

La viabilidad del uso compartido de maquinaria y equipos depende de varios factores, como la proximidad geográfica de las empresas, la compatibilidad de los procesos y la colaboración entre las partes interesadas. Las fundiciones deben establecer acuerdos y protocolos claros para compartir maquinaria de manera eficiente y segura.

Medida 7.2: Compartir recursos de logística

Las empresas pueden colaborar para compartir recursos logísticos, como flotas de transporte o rutas de envío, lo que puede reducir los costos y las emisiones de carbono.

Medida 7.3: Alquiler conjunto de almacenes

Compartir almacenes entre fundiciones puede mejorar la eficiencia y reducir costos, tomando en cuenta los siguientes pasos y consideraciones:

Identificación de socios potenciales: Buscar otras empresas en la misma zona industrial que puedan estar interesadas en compartir almacenes para necesidades similares.

Evaluación de espacio y capacidad: Determinar la cantidad de espacio disponible en el propio almacén y capacidad adicional para almacenar productos de otras empresas, verificando si se tiene estanterías, sistemas de seguridad, etc.

Acuerdos y contratos: Establecer contratos claros con las otras empresas incluyendo puntos como la duración del contrato, el costo del espacio compartido, las responsabilidades de cada parte, la seguridad y las políticas de acceso. Asimismo, definir una estrategia de salida en caso de que alguna de las partes decida dejar de utilizar el espacio de almacenamiento compartido.

Seguridad y control de acceso: Implementar medidas de seguridad y control de acceso para proteger las existencias almacenadas, pudiendo incluir sistemas de seguridad, cámaras de vigilancia y políticas de acceso.

Gestión y seguimiento: Establecer un sistema de gestión eficiente para llevar un registro de las existencias almacenadas y el espacio asignado a cada empresa, ello para evitar confusiones y garantizar la disponibilidad de espacio cuando sea necesario.

Seguro de almacenamiento: Asegurarse que las empresas que comparten el almacén tengan una cobertura de seguro para proteger sus activos almacenados.

3.8. Estrategia 8: Segundo uso

La estrategia de segundo uso se refiere a la reutilización de productos, materiales o recursos para una finalidad similar a la original, en lugar de desecharlos. En el contexto de las fundiciones, la reutilización de equipos y la venta de excedentes pueden generar ingresos adicionales y contribuir a la sostenibilidad al reducir la generación de residuos.

A continuación, se describen medidas de segundo aplicables a las fundiciones.

Medida 8.1: Reutilización de equipos

El reacondicionamiento de equipos se refiere a la restauración, reparación o actualización de maquinaria y equipos que se consideran obsoletos o en mal estado para que puedan seguir siendo utilizados, tales como:

Hornos de fundición: Si una fundición está actualizando sus hornos o tiene equipos obsoletos, estos pueden ser vendidos o reacondicionados para su uso en otras fundiciones o aplicaciones industriales.

Máquinas de moldeo: Equipos de moldeo pueden ser reacondicionados y vendidos a otras fundiciones que buscan expandir su capacidad de producción.

Equipos de tratamiento térmico: Hornos y equipos utilizados para el tratamiento térmico de piezas fundidas, como hornos de temple, pueden ser reacondicionados y reutilizados.

Sistemas de transporte y manipulación: Equipos de transporte, como grúas y transportadores, pueden ser reacondicionados y reutilizados en otras instalaciones industriales.

Medida 8.2: Venta de excedentes

La venta de excedentes se refiere a la comercialización de materiales, equipos o activos que ya no son necesarios en una fundición pero que pueden tener valor para otras empresas o industrias. Esto puede incluir la venta de:

Materiales: Metales y aleaciones en exceso que no se necesitan para la producción pueden venderse a otras empresas que los requieran.

Piezas fundidas en exceso: Si una fundición tiene piezas fundidas en exceso que no cumplen con los estándares de calidad pero que aún pueden ser reutilizadas, pueden venderse a empresas que puedan reacondicionarlas.

Arena de moldeo reciclada: La arena de moldeo reciclada que ya no se necesita en una fundición puede ser vendida a otras fundiciones o empresas que utilizan arena de moldeo.

Productos químicos y consumibles: Productos químicos y consumibles en exceso, como lubricantes o abrasivos, pueden ser vendidos o compartidos con otras empresas industriales.

Equipos de oficina: Equipos de oficina en desuso, como computadoras, impresoras y muebles de oficina, pueden ser donados, revendidos o reciclados.

3.9. Estrategia 9: Comunidades locales

Esta estrategia está relacionada con fortalecer y empoderar a las comunidades locales, priorizando lo que se encuentra disponible a nivel local, así como en la

creación de capacidades y redes, la co-creación de soluciones, la mejora del empleo y la reducción de las desigualdades.

La estrategia de comunidades locales en el sector fundición, comprenden principalmente las siguientes medidas:

Medida 9.1: Entrega de residuos aprovechables a recicladores formales en el marco del programa RECICLA para su valorización

El estado peruano¹² favorece la protección, capacitación y promoción del desarrollo social y laboral de los trabajadores del reciclaje, promoviendo su formalización, asociación y contribuyendo a la mejora en el manejo y reaprovechamiento de los residuos sólidos en el país.

Las fundiciones generan residuos con alto potencial de valorización que pueden ser entregados a los recicladores formalizados en el marco del programa RECICLA, siempre y cuando sean residuos no peligrosos, tales como:

- a) Papel mezclado: está constituido por papeles de oficina, papel de informática, papel satinado, papel encerado, papel periódico y otros.
- b) Cartón: está constituido por medios ondulados, cajas o cartones ondulados y otros.
- c) Plástico: todos los plásticos.
- d) Metales ferrosos: acero, hojalatas, latas bimetálicas.
- e) Metales no ferrosos: latas de aluminio, papel de aluminio, cobre, bronce y otros.
- f) Vidrio: todos los vidrios de diferentes colores.
- g) Caucho: todos los cauchos.
- h) Telas: diferentes colores y calidades.
- i) Orgánico: restos de alimentos que se descomponen, y de la poda de áreas verdes.

Medida 9.2: Contratación de trabajadores de las zonas aledañas a la empresa

La contratación de trabajadores de las zonas aledañas a la empresa es una forma de apoyar a la comunidad local y promover una mayor integración con el entorno. A continuación, se indican algunas estrategias para contratar empleados locales:

Conectar con la comunidad local: Establecer una presencia visible en la comunidad a través de participación en eventos locales, ferias de empleo, actividades benéficas o patrocinios de eventos comunitarios.

Publicar ofertas de empleo en sitios públicos: Anunciar ofertas de empleo en tableros de anuncios comunitarios, sitios web locales, periódicos locales y redes sociales dirigidas a la comunidad.

Ofrecer pasantías: Ofrece pasantías para estudiantes locales, lo que puede ayudar a la empresa a identificar talento local y contar con futuros empleados.

¹² Según Decreto Supremo N° 005-2010-MINAM, que aprueba el Reglamento de la Ley N° 29419, Ley que regula la actividad de los recicladores.

Promoción interna: Fomentar el desarrollo profesional y la promoción interna de los empleados actuales de la comunidad local, lo que puede aumentar la lealtad y la permanencia en la empresa.

Red de empleados actuales: Los empleados actuales pueden recomendar candidatos locales de calidad para puestos vacantes.

La contratación de empleados locales puede tener beneficios significativos, incluida una mayor participación de la comunidad, una fuerza laboral más estable y una reputación positiva en la comunidad.

3.10. Estrategia 10: Reciclaje

Estrategia que propone reciclar residuos del proceso de fundición, tanto dentro de la planta como externamente, reduciendo así la dependencia de las materias primas vírgenes o la disposición de residuos

La estrategia 10 de reciclaje en el sector fundición, comprende principalmente las siguientes medidas:

Medida 10.1: Reciclaje interno de chatarra

La chatarra interna de fundición se produce al retirar alimentadores y canales, en el control de calidad y en las operaciones de acabado. La cantidad de chatarra interna se puede obtener del rendimiento del metal según **Tabla 18**. Para minimizar los residuos de fundición, lo normal es que la chatarra interna se devuelva como alimentación al horno.

En las fundiciones de acero, los operadores retornan hasta el 60 % de la chatarra interna como máximo en el metal de carga debido al contenido de gas disuelto de dicha chatarra. Las virutas pueden provocar un exceso de oxidación del metal fundido.

En el caso de la fundición de hierro nodular, el reciclaje de chatarra interna también es limitado, ya que podría añadirse una gran cantidad de sílice (alrededor del 1 % en muchos casos) al hierro líquido durante la fusión del metal. En algunos casos, no es posible refundir toda la chatarra interna porque el contenido final de sílice sería demasiado alto (típicamente de 2,5 % a 3 % en las piezas fundidas).

En el caso del hierro gris o nodular, el plomo o el bismuto son muy perjudiciales para las propiedades del metal al solidificarse. Si ha habido un caso de contaminación, la chatarra interna no debería reciclarse.

Medida 10.2: Reciclaje interno de arena de machos aglomerada con resinas

La producción de machos o núcleos genera residuos de arena en forma de machos rotos, machos con pequeñas fallas y exceso de arena aglomerada con resinas de poliuretano y furano.

Para el reciclaje de los residuos de arena de machos se requiere implementar una unidad combinada de rotura y tratamiento del material residual. La arena resultante

se puede mezclar con arena nueva para la producción de nuevos machos. Esta técnica se aplica solamente a arenas aglomeradas con resina de poliuretano (caja fría) y furano; y es viable para una producción intensiva de machos.

La implementación de la técnica requiere cambios en el control del proceso, pues será necesario determinar la proporción óptima de arena recirculada y nueva. Además, se podría requerir cambios en la adición o composición del aglomerante. La técnica permite una recirculación interna del 5-10 % de la arena de machos, que de otro modo se dispondría como residuo.

Medida 10.3: Reciclaje externo de residuos

En general, los residuos de una fundición comprenden los siguientes:

- Arenas de moldeo usadas no recuperables.
- Polvos de materias primas, humos de fundición, partículas de operaciones de acabado captados en filtros de mangas.
- Escorias de la fusión y tratamiento del metal.
- Virutas del desbarbado y talleres.
- Abrasivos usados del granallado.
- Residuos refractarios de crisoles y cucharas.
- Contenedores de productos químicos y lubricantes.
- Restos de maderas de embalajes y modelos.
- Residuos industriales inertes en general.
- Papel, cartón, plásticos.

Dichos residuos deberían recuperarse para su reciclaje siempre que sea posible, en especial las arenas de moldeo no recuperables que representan alrededor del 80% de los residuos producidos por las fundiciones.

Medida 10.4: Reciclaje externo de arenas usadas de moldeo

La arena usada y la arena de tamaño pequeño del circuito de arena o de la regeneración de arena para moldeo pueden encontrar algunas aplicaciones externas de reciclaje, tales como:

- Construcción vial.
- Materiales de construcción (por ejemplo, cemento, ladrillos, tejas).
- Relleno de cavidades mineras.
- Construcción de rellenos de residuos (por ejemplo, vías, cubiertas permanentes).

Los límites de dichas aplicaciones están dados por criterios técnicos para los materiales de construcción y/o criterios ambientales para la aplicación dada.

Los criterios ambientales se basan generalmente en las propiedades de lixiviación y el contenido de compuestos orgánicos de las arenas usadas, lo cual se establece en ciertos países.

Las arenas usadas por lo general muestran un bajo potencial de lixiviación de metales. Se pueden superar los valores límite en el caso de arenas con alto

contenido de aglomerantes orgánicos o con aditivos específicos, como el carbón brillante.

Debido a su alto contenido de cuarzo y granulometría adecuada, la arena usada puede reemplazar a la arena virgen en la construcción de carreteras. Su aplicación en la fabricación de materiales de construcción (hormigón, ladrillos, tejas, lana de vidrio, etc.) es técnicamente factible, pero requiere un mayor nivel de control de composición y logística. Las aplicaciones a escala industrial que han resultado exitosas en Europa son:

- Bases de carreteras.
- Material de relleno.
- Material de drenaje.
- Elementos de concreto.
- Producción de cemento (en Alemania esta aplicación es de gran importancia).
- Relleno de cavidades mineras (tiene buena capacidad de soporte).
- Cobertura final de rellenos de residuos.
- Material de construcción para el refuerzo de diques.
- Vitricación de residuos peligrosos.

En la **Tabla 19** se incluye un resumen de las aplicaciones para los diferentes tipos de arena usada a reciclar.

Otros campos de aplicación son la fabricación de ladrillos, la fundición secundaria de cobre y la recuperación de zinc.

En general se puede decir que la arena usada no suele requerir ningún tratamiento previo, tan solo su acopio y almacenamiento por separado para su transporte hasta el destino final. Mas bien, podría ser necesario un control de calidad de la arena usada mediante análisis periódicos.

En la “*Guía de residuos sólidos y material de descarte con enfoque de economía circular para la industria de fundición*”, que complementa la presente Guía, se ha incluido tres casos extranjeros para el reciclaje externo de las arenas usadas de fundición:

- Caso 1: Arena de fundición como materia prima alternativa en la fabricación de cemento
- Caso 2: Arena de fundición en la construcción de viviendas
- Caso 3: Arena de fundición como ingrediente de pavimento asfáltico

Lo que correspondería hacer a las fundiciones peruanas es buscar empresas donde se pueda reciclar las arenas usadas obteniendo beneficios mutuos en un marco de circularidad.

Tabla 19. Aplicaciones de reciclaje externo de arena usada

RESUMEN DE APLICACIONES DE RECICLAJE	ARENA					
	Arena verde	Fenólica alcalina	Fenólica uretano	Furano	Casco de resina	Silicato sódico
Usos en construction						
Asfalto	x	x	+	+	+	O
Fabricación de bloques	+	x	+	+	x	+
Fabricación de ladrillos	x	x	+	+	+	
Cemento	x	x	+		x	x
Concreto		x	+	+	+	
Sustituto de agregado fino	x	x	+	+	+	+
Concreto celular, etc.	x	x	+			
Aislante/mineral/vidrio	+	+	+	+	+	+
Producción de mortero						+
Construcción de base de carretera		x	+		+	x
Filtro de techumbre				x		
Reciclaje en otra fundición						
Adición de arena verde				X		
Usos por tipo de suelo						
Topsoil artificial	x	+	+	x	+	
Relleno - tapado	x	x	+			
Relleno - cobertura diaria	x	x	+	x	x	x
Relleno - revestimiento	+					
Modificador/mejorador de suelo	+	+	+	+	+	+
Usos misceláneos						
Medio abrasivo/arenado		x	+			
Adiciones de fundición		+	+		+	+
Vitrificación de residuos	+	+	+		+	+
x Aplicación probada, con proyectos exitosos en el Reino Unido. + Aplicación que ha sido probada en teoría, pero no se está ejecutando ningún proyecto en el Reino Unido. O No apto para su reciclaje en forma no tratada.						

Fuente: The Castings Development Centre, 1999. TWG, 2002

3.11. Estrategia 11: Servitización

La estrategia de servitización se centra en ofrecer la experiencia de uso al cliente, en lugar de la venta de productos. Así, el cliente paga por el tiempo de uso y rendimiento -no por el producto-, mientras que el proveedor mantiene la propiedad del producto durante todo el ciclo de vida. Al basarse en una estrategia donde el cliente paga por el uso y no por la propiedad, hay un mayor estímulo para diseñar productos más duraderos y que puedan repararse con mayor facilidad.

En el caso de las fundiciones, la servitización podría darse ofreciendo a los clientes mayores (industrias, minas, etc.) servicios de reciclaje y reposición de piezas fundidas, lo cual no solo agrega valor a los productos de fundición; sino que también demuestra un compromiso con la sostenibilidad y la economía circular.

Medida 11.1: Servicio de reciclaje y reposición

Los servicios de reciclaje y reposición por parte de una fundición se centran en la gestión sostenible de las piezas fundidas fabricadas para sus clientes al final de su vida útil.

Se puede ofrecer servicios de reciclaje de piezas fundidas que ya no pueden cumplir su función original. Estas piezas se recogen y funden de nuevo para la producción de nuevas piezas que se reponen en la planta del cliente, todo ello bajo un contrato específico.

Incluso si las piezas fundidas han quedado obsoletas o ya no cumplen con eficacia su función, se puede ofrecer servicios de rediseño y modernización. Esto implica mejorar o actualizar las piezas para que sigan siendo efectivas en las aplicaciones actuales.

Caso 7: Mejora de una pieza de fundición para molino de bolas¹³

Información general:

Empresa	:	Fundición Ferrosa S.A.C.
Ubicación	:	Lima – Perú
Tamaño de la empresa	:	Mediana
Actividad	:	Fabricación de piezas de hierro, acero, inoxidable, manganeso, alto cromo
Etapas/proceso en que aplica	:	Diseño y fundición
Clases CIIU aplicables al caso	:	2599 - Fabricación de otros productos elaborados de metal N.C.P.

Descripción:

Fundición Ferrosa realizó un nuevo diseño de placa de revestimiento enfocado al sistema de ajuste para molino de bolas.

Este aporte se hizo en la «Tercera Hackatón 2018: innova, emprende y soluciona los desafíos del sector minero energético», iniciativa impulsada por la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE) y el Centro de Desarrollo Emprendedor de la Universidad ESAN, que cuenta con el apoyo del Instituto de Ingenieros de Minas del Perú y el Ministerio de la Producción.

Beneficios:

La innovación tecnológica incrementa la vida útil de las placas y evita que compañías mineras generen gran cantidad de residuos debido al desgaste de dichas piezas.

3.12. Estrategia 12: Reparación

La reparación es una estrategia que plantea la capacidad de restituir la funcionalidad de un producto tras la aparición de un fallo o defecto. Al reparar un producto se extiende su vida útil, evitando la generación de residuos y los impactos ambientales asociados.

La estrategia 12 de reparación en el sector fundición, comprende principalmente la siguiente medida:

¹³ Revista Energiminas. Edición N° 105. *Fundición Ferrosa presentó nuevo diseño de placa de revestimiento para molino de bolas*. Recuperado de: <https://energiminas.com7fundicion-ferrosa-presento-nuevo-diseño-de-placa-de-revestimiento-para-molino-de-bolas/> (27/10/2023)

Medida 12.1: Servicio de mantenimiento y reparación de piezas a clientes

Los servicios de mantenimiento y reparación en una fundición implican ofrecer a sus clientes asistencia para mantener y reparar piezas fundidas a lo largo de su vida útil, lo que puede ser particularmente relevante en industrias donde la durabilidad y la longevidad de las piezas son fundamentales.

Cuando las piezas fundidas se desgastan o sufren daños, se puede brindar servicios de reparación. Esto puede incluir soldadura, rectificado, reemplazo de componentes y cualquier otro trabajo necesario para restaurar la funcionalidad de las piezas.

Caso 8: Mantenimiento y reparación de piezas metálicas

Algunas fundiciones ofrecen servicios de mantenimiento y reparación de piezas metálicas a sus clientes. Por ejemplo, Metalock Engineering es una empresa que ofrece servicios de reparación de piezas de fundición en todo el mundo. Posee técnicas especializadas de reparación en frío de grietas, roturas o daños en piezas de fundición, acero o aluminio. Metalock Engineering también ofrece servicios de reparación de piezas de fundición in situ, lo que significa que pueden realizar el trabajo en el propio emplazamiento para ahorrar tiempo y evitar desmontajes innecesarios.

Capítulo 4: Transitando hacia una economía circular

4.1. Pasos para transitar a una economía circular

Ante los desafíos mundiales, tales como el cambio climático, el agotamiento de recursos, la pérdida de biodiversidad, entre otros, es necesario acelerar la transición hacia un modelo de economía circular.

Los pasos propuestos en la presente guía para transitar hacia una economía circular en las empresas, han sido adaptados de la iniciativa Colombia Productiva (2020). Se trata de cinco pasos continuos que se proponen seguir para implementar estrategias y medidas de circularidad en los modelos de negocio, como se muestra en la Figura 26. Pasos de transición hacia una economía circular. siguiente:

Figura 26. Pasos de transición hacia una economía circular.



Fuente: Adaptado de Centro de Producción Colombia Productiva, 2020.

4.1.1 Paso 1. Sensibilizar

Está referido a adquirir conocimientos y entender la importancia del modelo de economía circular, además de los beneficios que puede tener la empresa en lo económico, ambiental y social. En este paso, la gerencia debe adquirir conocimiento de lo que implica la implementación de estrategias para transitar hacia una economía circular para luego sensibilizar y crear consciencia, y motivación a los trabajadores mediante charlas, videos, talleres, entre otros medios informativos. Por ejemplo, charlas con los siguientes temas: uso eficiente en el uso de recursos, valorización de los residuos industriales, experiencias o iniciativas de EC en empresas del mismo rubro, etc.

4.1.2 Paso 2. Analizar

Es en este paso la empresa debe elaborar un diagrama de flujo por procesos o realizar el Análisis de Ciclo de Vida de sus productos o servicios, en los cuales se identifican y cuantifican las entradas de materiales (kg), agua (m³) y energía (kWh). Además, se debe identificar y cuantificar las salidas de los residuos sólidos generados (kg), efluentes (m³) y emisiones (kg).

A partir del flujo de entradas y salidas la empresa determina las medidas que responden a las siguientes preguntas orientadoras:

- ¿En qué procesos se presenta mayor consumo de materias primas, insumos, energía, agua?

- ¿En qué procesos se generan la mayor cantidad de residuos que se pueden prevenir?
- ¿Qué tipos de residuos se generan y cuál es su posible oportunidad de valorización?
- ¿Existen sinergias con otras empresas para aprovechar infraestructura, maquinaria, residuos y otros?

4.1.3 Paso 3. Priorizar

Una vez determinadas las medidas en el paso 2 de analizar, se debe tomar la decisión sobre las medidas que se van a implementar de manera prioritaria, en función a las estrategias de circularidad con las que están relacionadas. Se pueden seleccionar varias estrategias y medidas de manera previa, para tener opciones amplias de implementación.

La priorización se puede realizar evaluando el aspecto económico (generación de nuevos ingresos, ahorros en costos de materiales, agua y energía), social (generación de empleo), ambiental (eficiencia de recursos, disminución de la contaminación, conservación de la biodiversidad) y la factibilidad de implementar la oportunidad en términos de requerimientos técnicos, administrativos y financieros.

4.1.4 Paso 4. Planificar

Para cada estrategia de economía circular identificada en el paso 3 es necesario desarrollar un plan de acción que detalle:

- Estrategia: Componente de circularidad a implementar como el ecodiseño, intercambiar, reparar, reciclar, entre otras desarrolladas en el capítulo tres.
- Medida: Acciones que puede tomar la empresa para obtener beneficios económicos, ambientales y/o sociales.
- Objetivo de la medida: Descripción clara y concisa de lo que la empresa quiere alcanzar al implementar la medida en un determinado tiempo.
- Indicadores económicos, ambientales y/o sociales: Característica observable y medible usada para mostrar los cambios y progresos, resultado de la implementación del objetivo.
- Meta: Valor esperado del indicador.
- Actividades para la implementación de la medida: Acciones que se llevan a cabo en un periodo de tiempo determinado para lograr el objetivo de la medida.
- Recursos: Inversión que realiza la empresa en términos monetarios, de horas/hombre, investigación, materiales, entre otros.
- Responsables: Áreas o personas de la empresa encargadas de implementar las medidas.

- Mes y año de inicio y fin de la implementación de la medida: Periodo establecido para la ejecución de la medida.

Tabla 20. Plantilla de plan de acción para implementar estrategias de economía circular

Estrategia	Medida	Objetivo	Indicador/Meta			Actividades para la implementación de la medida	Recursos	Responsable	Mes y año de Inicio y fin de la implementación.
			Económico	Ambiental	Social				
Reciclar	Elaborar pantuflas a partir de residuos de tela abatanada	Introducir una nueva línea de negocio con enfoque de sostenibilidad a diciembre del 2024.	Indicador: Porcentaje de productos circulares ofertados. Meta: Producir al mes 150 pares de pantuflas.	Indicador: Volumen de residuos reciclados Vs residuos generados. Meta: Reciclar trimestralmente el 80% de los residuos.	Indicador: Porcentaje de de empleos generados directamente e indirectamente. Meta: Generar al año 10 puestos de	a. Clasificación de residuos de tela abatanada por color. b. Capacitación al personal en la elaboración de pantuflas. c. Diseño de prototipo de modelos de pantuflas. d. Lanzamiento del producto. e. Producción y venta.	Económicos	Jefa de diseño	agosto de 2022 - diciembre de 2024.
Segundo uso						a. b. c.			
Virtualizar						a. b. c.			

Fuente: Modelo de plantilla adaptada de la Guía de Buenas Prácticas de Ecoeficiencia Perú de Promperú

En el

Anexo 3: Indicadores de circularidad, se detalla algunos indicadores de circularidad para los aspectos del uso de los recursos, generación de residuos, y de los aspectos sociales y económicos.

4.1.5 Paso 5. Monitorear

En este paso, las empresas deben medir y monitorear el porcentaje de cumplimiento de implementación de las estrategias/medidas de economía circular descritas en el plan de acción. Asimismo, con la finalidad de evaluar dicho cumplimiento, se debe establecer una frecuencia para el monitoreo.

Para ello la empresa debe reunirse con los responsables de la implementación de las estrategias/medidas y revisar el cumplimiento de las actividades de manera periódica. Se recomienda que las reuniones sean mensuales con el fin de dar un seguimiento continuo en la implementación de la medida.

Durante el monitoreo se recopila información sobre el avance de ejecución de las actividades programadas. El porcentaje de cumplimiento se medirá en base a las actividades ejecutadas entre las actividades planificadas de tal modo que se puedan realizar medidas correctivas o de mejora.

Anexos

Anexo 1: Tabla de actividades económicas con la CIIU Rev.4 para el sector de la industria de fundición

CIIU Rev. 4	Descripción
2431	FUNDICIÓN DE HIERRO Y ACERO Se incluyen las siguientes actividades: • Fundición de productos semiacabados de hierro. • Fundición de hierro gris. • Fundición de grafito esferoidal. • Fundición de productos de hierro maleable. • Fundición de productos semiacabados de acero. • Fundición de piezas de acero. • Fabricación de tubos, caños y perfiles huecos y de conexiones de tubos y caños de hierro. • Fabricación de tubos y caños de acero sin costura mediante fundición centrífuga. • Fabricación de conexiones de tubos y caños de acero.
2432	FUNDICIÓN DE METALES NO FERROSOS Esta clase comprende las siguientes actividades: • Fundición de productos semielaborados de aluminio, magnesio, titanio, zinc, etcétera. • Fundición de piezas de metal ligero. • Fundición de piezas de metal pesado. • Fundición de piezas de metales preciosos. • Fundición a presión de piezas de metales no ferrosos.

Fuente: INEI. Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas – Revisión 4.

Anexo 2: Glosario de términos

Aprovechamiento (de residuos sólidos): Volver a obtener un beneficio del bien, artículo, elemento o parte del mismo que constituye residuo sólido. Se reconoce como técnica de aprovechamiento el reciclaje, recuperación o reutilización.

Big Data: almacenamiento de grandes cantidades de datos, y a los procedimientos usados para encontrar dentro de esos datos patrones susceptibles de ser empleados en múltiples esferas del mundo de la empresa y de la investigación.

Ciclo biológico: Es propio de la naturaleza y del ambiente y se centra en devolver los residuos biológicos de vuelta a la naturaleza de una manera segura; siendo aprovechados y permitiendo la regeneración de recursos renovables.

Ciclo técnico: Este ciclo tiene por objeto garantizar que los productos, componentes y materiales estén diseñados y comercializados de una manera que permite que sean reutilizados, reincorporados, remanufacturados, reutilizados todas las veces que sea posible.

Cambio climático: Hace referencia a los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos. Si bien estos cambios pueden ser naturales, desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido el principal motor del cambio climático, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles.

Desarrollo sostenible: Aquel desarrollo que pueda satisfacer las necesidades para las generaciones actuales y futuras sin dañar a los recursos o los organismos biológicos en el planeta.

Economía circular: Enfoque sistémico para el diseño de procesos, productos/servicios y modelos de negocio, que permite el crecimiento económico sostenible mediante la gestión de los recursos de manera más eficaz como resultado de hacer que el flujo de materiales sea más circular y reducir y, en última instancia, eliminando desperdicios. La energía necesaria para alimentar esto debería ser extremadamente eficiente y renovable por naturaleza.

Intercambiar: Implementar los cambios necesarios para reemplazar materiales, fuentes de energía, procesos y/o tecnologías por otros que permitan optimizar y ahorrar recursos a fin de mitigar el impacto.

Internet of Things: es la interconexión de los procesos, productos y servicios, a través de la utilización masiva intensiva de internet móvil, sensores e inteligencia artificial, permitiendo la optimización de la eficiencia de un modo global.

Logística inversa: Proceso de planificación, implantación y control de forma eficiente y al costo óptimo del flujo de materias primas, materiales en curso de producción y productos acabados, así como el de la información relacionada, desde el punto de consumo hacia el punto de origen con el objeto de recuperar el valor de los materiales.

Materiales reciclables: Aquellos materiales que por sus características mantienen una alta calidad al ser reciclados.

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): Adoptados por las Naciones Unidas en 2015, son un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad.

Residuo sólido: Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento resultante del consumo o uso de un bien o servicio, del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención u obligación de desprenderse, para ser manejados priorizando su valorización y en último caso, su disposición final.

Simbiosis industrial: Utilizar materiales, productos o infraestructura de una cadena de valor a otra a través de la 'cascada' de recursos. Esto ahorra costos de nuevos materiales, incluyendo energía.

Valores Máximos Admisibles (VMA): Es la concentración de los parámetros establecidos en el Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA, contenidos en las descargas de las aguas residuales no domésticas a descargar en los sistemas de alcantarillado sanitario y que puede influenciar negativamente en los procesos de tratamiento de las aguas residuales, al exceder dichos valores.

Valorización: Cualquier operación cuyo objetivo sea que el residuo, uno o varios de los materiales que lo componen, sea reaprovechado y sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales o recursos en los procesos productivos. La valorización puede ser material o energética.

Vida útil: Tiempo de funcionamiento de materiales, componentes y productos, determinado por la asignación de valor por parte del usuario. Por ejemplo, cuando los materiales son reusados o reciclados, su vida útil se extiende.

Anexo 3: Indicadores de circularidad

El índice de circularidad es una medida de la eficiencia de los procesos de producción en cuanto al uso de recursos materiales, energéticos y humanos, así como en la gestión de los residuos que genera la actividad, y los aspectos económicos relacionados con las medidas implementadas.

Para obtener un indicador de circularidad, se pueden seguir los siguientes pasos:

- 1) Identificar los flujos de materiales y energía en la industria de fundición. Esto incluye la identificación de los procesos de producción, los materiales y personal utilizados, los residuos generados, y el consumo de energía.
- 2) Evaluar la eficiencia de los procesos de producción y la gestión de residuos. Esto implica medir la cantidad de recursos utilizados en la producción y la cantidad de residuos generados. También se deben evaluar las prácticas de gestión de residuos, como la reutilización, el reciclaje y la recuperación de energía. Asimismo, se deben determinar los aspectos económicos (ahorros, ganancias) implicados en las medidas adoptadas.
- 3) Calcular el índice de circularidad según lo indicado en las Tablas 21 a 23 que abarcan los aspectos del uso de recursos, residuos, los aspectos sociales y económicos implicados.
- 4) Establecer objetivos de mejora. Una vez que se ha calculado el índice de circularidad, se pueden establecer objetivos de mejora para aumentar la eficiencia de los procesos de producción y la gestión de residuos. Estos objetivos deben ser específicos, medibles, alcanzables, relevantes y oportunos.

Tabla 21. Indicadores de circularidad para recursos y residuos

Indicador	Estrategias de economía circular asociadas
❖ Índice de consumo de materia prima (volumen consumido / volumen de producción).	Ecodiseño, intercambio, simbiosis industrial, biodiseño, industria 4.0, reciclaje, entre otras estrategias.
❖ Estas tablas Índice de circularidad de material (cantidad de material reciclado utilizado / cantidad total de material utilizado).	Ecodiseño, intercambio, biodiseño, reciclaje, entre otras estrategias.
❖ Índice de consumo de agua (volumen consumido / volumen de producción).	Ecodiseño, intercambio, simbiosis industrial, industria 4.0, reciclaje, entre otras estrategias.
❖ Índice de consumo energético (kWh consumidos / volumen de producción).	Ecodiseño, intercambio, industria 4.0, entre otras estrategias.
❖ Porcentaje de consumo de energías alternativas (kWh energía renovable + kWh de co-procesamiento) / kWh totales de energía*100).	Ecodiseño, intercambio, industria 4.0, entre otras estrategias.

Indicador	Estrategias de economía circular asociadas
❖ Porcentaje de recirculación de agua (m^3 tratados y recirculados / m^3 totales de agua consumida*100).	Ecodiseño, intercambio, industria 4.0, reciclaje, entre otras estrategias.
❖ Tasa de recuperación de residuos de embalajes provenientes de productos de la compañía o procesos productivos (volumen de residuos de embalaje recuperados / volumen total de embalaje consumidos).	Simbiosis industrial, logística inversa, reciclaje, entre otras estrategias.
❖ Tasa de generación de residuos peligrosos (volúmenes de residuos peligrosos / volumen de producción).	Ecodiseño, intercambio, biodiseño, reciclaje, entre otras estrategias.
❖ Tasa de generación de RAEE (volumen de RAEE / volumen de producción).	Ecodiseño, intercambio, biodiseño, reciclaje, entre otras estrategias.
❖ Porcentaje de reciclaje (volumen de residuos reciclados / volumen de residuos generados).	Simbiosis industrial, reciclaje, entre otras estrategias.

Tabla 22. Indicadores de circularidad de aspectos sociales

Indicador	Estrategias de economía circular asociadas
❖ Número de nuevos empleos generados directos e indirectos (conteo simple).	Ecodiseño, intercambio, simbiosis industrial, biodiseño, industria 4.0, comunidades locales, segundo uso, logística inversa, reciclaje, entre otras estrategias.
❖ Número de actores locales articulados (conteo simple).	Simbiosis industrial, comunidades locales, entre otras estrategias.
❖ Horas de trabajo voluntarias en trabajos locales (conteo simple).	Comunidades locales.
❖ Número de líneas sociales lanzadas (conteo simple).	Comunidades locales.

Tabla 23. Indicadores de circularidad de aspectos económicos

Indicador	Estrategias de economía circular asociadas
❖ Porcentaje de productos circulares en el portafolio (número de referencias circulares ofertadas / número de referencias totales ofertadas*100).	Ecodiseño, intercambio, simbiosis industrial, biodiseño, industria 4.0, comunidades locales, segundo uso, logística reversa, reciclaje, entre otras estrategias.
❖ Cantidad de soles ahorrados en costos de producción (inversión en	Todas las estrategias.

Indicador	Estrategias de economía circular asociadas
soles antes de la aplicación de la medida o estrategia / inversión en soles después de la aplicación de la medida o estrategia).	
❖ Cantidad de soles ganados en ingresos (ganancia en soles antes de la aplicación de la medida o estrategia / ganancia en soles después de la aplicación de la medida o estrategia).	Todas las estrategias.

Anexo 4: Sellos y certificaciones aplicables al sector fundición

Tabla 24. Listado de sellos y certificaciones aplicables al sector fundición

Sello	Descripción
	Huella de Carbono Perú: La Huella de Carbono Perú es una herramienta oficial del promovida por el Ministerio del Ambiente que permite reconocer cómo las organizaciones públicas y privadas han logrado gestionar sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en beneficio del ambiente. Más información en: https://huellacarbonoperu.minam.gob.pe/
	Acuerdo de Producción Limpia (APL): Son instrumentos voluntarios promovidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM), que introduce en las actividades productivas un conjunto de acciones para que las empresas transiten hacia modelos de circularidad, mejorando así las condiciones para la optimización en el uso de recursos y la prevención o minimización de la generación de los residuos sólidos. Asimismo, los titulares de actividades productivas, extractivas y de servicios pueden suscribir voluntariamente APL en materia de residuos sólidos con el MINAM y/o la autoridad competente, de corresponder. Más información en: https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/214671-acuerdos-de-produccion-limpia-entre-el-minam-y-empresas-privadas-promueven-la-economia-circular
 (*)	Acuerdos de Producción Más Limpia (AP+L) Los Acuerdos de Producción Más Limpia son instrumentos de promoción promovidos por el Ministerio de la Producción, que tienen como objetivo introducir en la actividad de la industria manufacturera o de comercio interno, un conjunto de acciones que mejoren las condiciones en las cuales el titular realiza sus actividades, para lograr la ecoeficiencia y alcanzar un adecuado equilibrio entre la gestión productiva y la protección ambiental. Que trasciendan al cumplimiento de la legislación vigente. Más información en: https://www.gob.pe/institucion/produce/normas-legales/2919204-146-2022-produce
	Cradle to Cradle Certified® <i>Cradle to Cradle Certified</i> o Certificación de la Cuna es una estándar multinivel que certifica el producto en cinco categorías: materiales respetuosos con la salud, circularidad del producto, aire limpio y protección del clima, gestión del agua y suelo, justicia social. Asimismo, se definen como un estándar global para productos que son seguros, circulares y fabricados de manera responsable. Más información en: https://www.c2ccertified.org/

(*)Precisar que, a la fecha, los Acuerdos de Producción Más Limpia del PRODUCE, no cuentan con un logo específico, por ello, se ha colocado en forma referencial el logo de PRODUCE.

Anexo 5: Normas técnicas y legales vinculadas a la economía circular

Plan Nacional de Competitividad y Productividad

Mediante Decreto Supremo N° 237-2019-EF se aprobó el “Plan Nacional de Competitividad y Productividad”, el cual contiene 84 medidas concretas de corto, mediano y largo plazo para incrementar sostenidamente el bienestar de todos los peruanos.

Dentro del Plan podemos encontrar el Objetivo Prioritario 9 (OP9): Sostenibilidad Ambiental, donde se establece como objetivo promover la sostenibilidad ambiental en la operación de actividades económicas. Su cumplimiento apunta hacia una mayor competitividad del país a través de un mejor uso de los recursos naturales, de la adopción de métodos de producción y patrones de consumo que fomenten el tránsito hacia una economía circular, generando beneficios entre los que resaltan la reducción de los costos de producción por la optimización de los procesos productivos y de la gestión integral de los residuos sólidos.

Conoce más en:

https://www.mef.gob.pe/concdecompetitividad/Plan_Nacional_de_Competitividad_y_Productividad_PNCP.pdf



Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en Sector Industria

Mediante Decreto Supremo N° 003-2020-PRODUCE, se aprobó la denominada “Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en Sector Industria”, la cual fue elaborada en conjunto por el Ministerio de la Producción (PRODUCE) y el Ministerio de Ambiente (MINAM), a fin de impulsar el crecimiento económico y el desarrollo industrial inclusivo y sostenible.

Esta iniciativa contiene las acciones que desarrollará el gobierno peruano para impulsar y promover la transición de un modelo económico lineal a uno circular en las industrias manufactureras y de procesamiento industrial pesquero.

Conoce más en:

<https://www.gob.pe/institucion/produce/normas-legales/444490-003-2020-produce>



Instituto Nacional de Calidad

El Instituto Nacional de Calidad (INACAL), organismo adscrito al Ministerio de la Producción, aprobó la Guía Peruana “GP 127:2021. ECONOMÍA CIRCULAR -Marco para la implementación de los principios de la economía circular en las organizaciones.”, que establece un marco de orientación sobre cómo implementar los principios de la economía circular dentro de las organizaciones públicas y privadas, a fin de promover prácticas responsables en el manejo de sus recursos, rediseñando su modelo de negocio con propuesta de valor.



La Guía Peruana es aplicable a cualquier organización, independientemente de su ubicación, tamaño, sector y tipo, las cuales podrán realizar la transición a un modo de funcionamiento más circular y sostenible, contribuyendo de manera importante a la conservación de los recursos, mantener el valor de los productos y materiales el mayor tiempo posible, y minimizando la generación de residuos.

Conoce más en: <https://www.gob.pe/institucion/inacal/noticias/607065-inacal-aprobo-guia-peruana-para-impulsar-la-implementacion-de-la-economia-circular-en-las-organizaciones>

Pacto Verde Europeo

En diciembre del 2019 la Comisión Europea aprobó el denominado “Pacto Verde Europeo”, el cual establece como objetivo la carbononeutralidad de Europa para el año 2050. Para lograr ello, establece una ambiciosa hoja de ruta hacia una economía circular climáticamente neutra, en la que el crecimiento económico esté disociado del uso de los recursos.



En un futuro, el Pacto Verde afectará la exportación de bienes y servicios a la Unión Europea, priorizando aquellos que cuentan con un origen sostenible

Conoce más en: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es

Objetivos de desarrollo Sostenible (ODS)

Los ODS promovidos por las Naciones Unidas, con el compromiso del Perú, establecieron 17 ejes de acción con un alcance al 2030, entre ellos, el ODS 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, abarca la eficiencia en el uso y la gestión de los recursos naturales (meta 12.2), los efectos ambientales, tales como la gestión de residuos (meta 12.5), y la liberación de contaminantes, en especial de sustancias químicas (meta 12.4).

Conoce más en:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>



Portada Contexto Objetivos ¿Qué puedo hacer? Alianzas Noticias y Medios de Información Cumbre sobre los ODS

Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles



Anexo 6: Literatura recomendada

- 1) Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Smitheries and Foundries Industry. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). Joint Research Centre. Directorate B – Growth and Innovation Circular Economy and Industrial Leadership Unit. European IPPC Bureau, Draft 1 (February 2022).

Ver:

https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2022-02/SF_BREF_D1_web.pdf

- 2) Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ferrous Metals Processing Industry. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), Joint Research Centre. Circular Economy and Industrial Leadership Unit. European IPPC Bureau. Final Draft (October 2021)

Ver:

https://aida.ineris.fr/sites/aida/files/documents-bref/FMP%20BREF_Final%20Version.pdf

- 3) EPA. Energy Efficiency and Cost Saving Opportunities for Metal Casting An ENERGY STAR® Guide for Energy & Plant Managers January 2016

Ver:

<https://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/ENERGY%20STAR%20Metal%20Casting%20Energy%20Guide.pdf>

- 4) U.S. DOE. Implementation of metal casting best practices. January 2007

Ver:

<https://www.energy.gov/eere/amo/articles/itp-metal-casting-implementation-metal-casting-best-practices>

- 5) EPA Environmental management of foundries. Updated April 2016

Ver:

https://www.epa.sa.gov.au/files/477262_guide_foundries.pdf

- 6) IFC. Environmental, Health, and Safety Guidelines for Foundries. 2007

Ver:

<https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/2000/2007-foundries-ehs-guidelines-en.pdf>

Anexo 7. Obligaciones generales ambientales

(Según Anexo 11 de la Resolución Ministerial N° 0147-2023-PRODUCE: Aprobación de Disposiciones Técnicas Ambientales - DTA para las actividades de la industria manufacturera)

Tema/Aspecto ambiental	Fuente de obligaciones	Obligaciones
Manejo de materiales e insumos peligrosos	Reglamento de Gestión Ambiental para la Industria Manufacturera y Comercio Interno aprobado por Decreto Supremo N° 017-2015-PRODUCE.	- Contar con un inventario de los materiales e insumos peligrosos. - Contar con las Fichas de Datos de Seguridad (Material Safety Sheet - MSDS) para cada uno de los materiales e insumos peligrosos. - Adoptar medidas para el adecuado manejo y almacenamiento de los materiales e insumos peligrosos, conforme a lo señalado en las Fichas de Datos de Seguridad (Material Safety Sheet - MSDS).
Residuos sólidos	Decreto Legislativo N° 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, su Reglamento aprobado por Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM y sus modificatorias.	- Entregar los residuos debidamente segregados en la fuente, a los operadores de residuos sólidos debidamente autorizados; así como a las asociaciones de recicladores formalizadas, siempre que se trate de residuos sólidos similares a los municipales. - Contar con áreas, instalaciones y contenedores apropiados para el acopio y almacenamiento adecuado de los residuos desde su generación, en condiciones tales que eviten la contaminación del lugar o la exposición de su personal o terceros, a riesgos relacionados con su salud y seguridad. - Conducir un registro interno sobre la generación y manejo de residuos sólidos en las instalaciones. - Contratar a una Empresa Operadora de Residuos Sólidos (EO-RS) para el manejo de los residuos sólidos no municipales fuera de las instalaciones industriales o productivas. - Los residuos sólidos no peligrosos (cartón, papel, plásticos, vidrios, así como, residuos orgánicos) se podrán entregar al servicio de recojo municipal de su jurisdicción, en un volumen de hasta 150 litros diarios. O pueden ser entregados a las organizaciones de recicladores formalizados, en el marco del Programa de Segregación en Fuente y Recolección Selectiva de los residuos sólidos. - El transporte de residuos sólidos peligrosos para su disposición final en un relleno de seguridad debe realizarse a través de una EO-RS debidamente autorizada. Por cada transporte de residuos sólidos se debe registrar un manifiesto de residuos sólidos peligrosos (MRSP). Una copia del documento debe ser conservada por la empresa. - Brindar las facilidades necesarias a las autoridades competentes para el adecuado cumplimiento de sus funciones. - Establecer e implementar las estrategias y acciones conducentes a la valorización de los residuos como primera opción de gestión. - Está prohibido la quema y la mezcla de los residuos sólidos en general. - Está prohibido el abandono, vertido o disposición de residuos en lugares no autorizados por la autoridad competente o aquellos que establezca la Ley. - El almacenamiento de los residuos sólidos se debe realizar en forma segregada, en espacios exclusivos para este fin, considerando su naturaleza física química y biológica, así como las características de peligrosidad, incompatibilidad con otros residuos y las reacciones que puedan ocurrir con el material de recipiente que lo contenga, con la finalidad de evitar riesgos a la salud y al ambiente. - El almacenamiento de los residuos sólidos debe cumplir con la Norma Técnica Peruana 900.058:2019 GESTIÓN DE

Tema/Aspecto ambiental	Fuente de obligaciones	Obligaciones
		RESIDUOS. Código de colores para el almacenamiento de residuos. - El almacenamiento central de residuos sólidos peligrosos debe realizarse en un ambiente cerrado, en el cual se almacenan los residuos compatibles entre sí. El diseño del almacén central debe considerar: • Un área acondicionada y techada ubicada a una distancia determinada teniendo en cuenta la peligrosidad del residuo, su cercanía a áreas de producción, servicios, oficinas, almacenamiento, materias primas o de productos, entre otros. • Distribuir los residuos peligrosos de acuerdo a su compatibilidad física, química o biológica. • Contar con sistemas de impermeabilización, contención y drenaje acondicionados. • Contar con pasillos o áreas de tránsito que permitan el paso de maquinaria, equipos y personal de seguridad en caso corresponda. • En caso se generen gases volátiles, contar con detectores de gases o vapores con alarma audible. • Contar con señalización en lugares visibles que indiquen la peligrosidad de los residuos. • Contar con sistemas de alerta contra incendios, dispositivos de seguridad operativos y equipos. • Contar con sistemas de higienización operativos. - Los residuos sólidos peligrosos no podrán permanecer almacenados en instalaciones del generador de residuos sólidos no municipales por más de 12 meses. - Otras condiciones que pueda establecer la autoridad competente.
Ruido	Decreto Supremo N° 085-2003-PCM, que aprueba el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Ruido**	Debe tener en consideración las disposiciones del Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para ruido aprobado por Decreto Supremo N° 085-2003-PCM. Debe considerar las disposiciones contenidas en el artículo 49 y en los numerales 1.2 y 3.4 del artículo 80 de la Ley N° 27972, Ley Orgánica de Municipalidades, referidas al control y fiscalización de ruidos, que pudieran resultar aplicables a sus actividades
Emisiones	Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental para Aire y establece Disposiciones Complementarias* Ley N° 27972, Ley Orgánica de Municipalidades	La empresa debe tener en consideración las disposiciones del Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM por el cual se aprueban los Estándares de Calidad Ambiental para Aire. Debe considerar, además, las disposiciones contenidas en el artículo 49 y en los numerales 1.2 y 3.4 del artículo 80 de la Ley N° 27972, Ley Orgánica de Municipalidades, referidas al control y fiscalización de la emisión de humos, gases y demás elementos contaminantes de la atmósfera y el ambiente, que pudieran resultar aplicables a sus actividades.
Efluentes	Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA, que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario	Efluentes vertidos al alcantarillado: Obligaciones derivadas del Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario aprobado por Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA, dentro de las que se incluyen las indicadas en el artículo 8 de dicha norma. Efluentes vertidos a un cuerpo natural de agua: Contar con las autorizaciones respectivas de la autoridad del recurso hídrico, para el vertimiento de aguas residuales, conforme a las disposiciones de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos.

Tema/Aspecto ambiental	Fuente de obligaciones	Obligaciones
	Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos y su Reglamento aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG	
Uso de agua	Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos y su Reglamento aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG	Contar con las autorizaciones respectivas de la autoridad del recurso hídrico, para el uso de agua de una fuente natural, conforme a lo dispuesto en el Título IV de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos y su Reglamento aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG.
Compatibilidad de uso	Ley N° 27972, Ley Orgánica de Municipalidades	Se debe considerar que la actividad desarrollada debe ser compatible con la zonificación y/o uso de suelo asignado por la autoridad municipal, conforme a lo señalado en el artículo 79 de la Ley N° 27972, Ley Orgánica de Municipalidades, así como en otras normas municipales referidas a zonificación, que resulten aplicables.
Fiscalización ambiental	Reglamento de Supervisión aprobado por Resolución de Consejo Directivo N° 006-2019-OEFA/CD. Artículos 4 y 5 del Reglamento del Reporte de Emergencias Ambientales de las actividades bajo el ámbito de competencia de OEFA aprobado por Resolución de Consejo Directivo N° 018-2013-OEFA/CD y modificado por Resolución de Consejo Directivo N° 028-2019-OEFA-CD, entre otras.	- Mantener en custodia toda la información vinculada al cumplimiento de sus obligaciones fiscalizables por un plazo de cinco (5) años contado a partir de su emisión, esta debe ser entregada al supervisor cuando este la requiera. - Brindar al supervisor todas las facilidades para el traslado y acceso a la unidad fiscalizable, sin que medie dilación alguna. Dichas facilidades incluyen el acceso a todas las áreas y componentes, así como la recopilación de información acerca de la operatividad de la unidad fiscalizable y del cumplimiento de las obligaciones fiscalizables del administrado. En caso de ausencia del representante del administrado, el personal encargado debe permitir el ingreso del supervisor a la unidad fiscalizable en un plazo razonable. - Comunicar al OEFA la emergencia de manera inmediata a la toma de conocimiento hasta dentro de las doce (12) horas de ocurrencia del evento, conforme al Formato de Reporte Preliminar de Emergencias Ambientales. - Realizar el Reporte Final al OEFA dentro de los diez (10) días hábiles de ocurrida la emergencia ambiental, conforme al Formato de Reporte Final de Emergencias Ambientales.
Otras	Reglamento de Gestión Ambiental para la Industria Manufacturera y Comercio Interno aprobado por Decreto Supremo N° 017-2015-PRODUCE. Otras normas de carácter transectorial	- Contar con personal capacitado, propio o subcontratado, en los aspectos, normas, procedimientos e impactos ambientales asociados a su actividad. - Cumplir con las otras obligaciones que pudieran ser aplicables a sus actividades en razón a normas transectoriales o municipales, como por ejemplo el contar con Licencia de Funcionamiento, obligaciones de carácter sanitario, entre otras que pudieran aprobarse.

* Los titulares de las actividades industriales manufactureras y de comercio interno deben cumplir con todas las normas generales emitidas para el manejo de residuos sólidos, aguas, efluentes, emisiones, ruidos, suelos, conservación del patrimonio natural y cultural, zonificación, construcción y otros que pudieran corresponder; se encuentren o no incluidos en el presente Anexo.

** Conforme al numeral 31.4 del artículo 31 de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, ninguna autoridad judicial o administrativa podrá hacer uso de los estándares nacionales de calidad ambiental con el objeto de sancionar bajo forma alguna a personas jurídicas o naturales, a menos que se demuestre que existe causalidad entre su actuación y la transgresión de dichos estándares.