

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



**Minería Urbana: Tecnología y Metodología para el Reciclaje de
Televisores de Tubos de Rayos Catódicos**

Tesis para obtener el grado académico de Doctor en Ingeniería que
presenta:

Marco Antonio Gusukuma Higa

Asesor:

Ramzy Francis Kahhat Abedrabbo

Co-asesor:

Adolfo Pillihuamán Zambrano

Lima, 2022



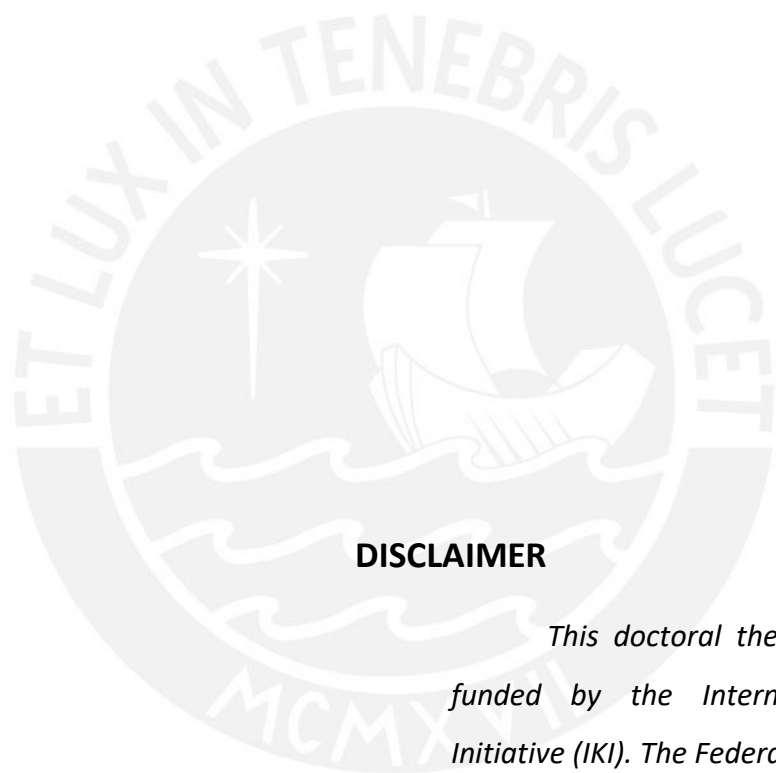
DEDICATORIA

Al amor de mi vida...



AGRADECIMIENTO

El autor desea agradecer a todas aquellas personas que contribuyeron por medio de sus valiosas opiniones con este proyecto. Además, desea agradecer encarecidamente a la Red Peruana de Ciclo de Vida y Ecología Industrial, con el profesor Ian Vázquez Rowe a la cabeza, y especialmente los profesores Ramzy Kahhat y Alexis Dueñas por su apoyo incondicional durante su transición de la industria a la academia.



DISCLAIMER

This doctoral thesis was partially funded by the International Climate Initiative (IKI). The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB) supports this initiative on the basis of a decision adopted by the German Bundestag.

ACERCA DEL AUTOR

Ingeniero Químico (UNI) y Maestro en Ciencias con Mención en Ingeniería Industrial (UNI). En la actualidad se desempeña como docente ordinario del Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú y sus intereses académicos se relacionan con la ecología industrial, la ecoinnovación en productos y servicios y en la planificación de sistemas complejos.

La presente tesis toma como insumos principales dos artículos de investigación publicados en revistas arbitradas (Gusukuma et al., 2022; Gusukuma & Kahhat, 2018) y un artículo en proceso de publicación a la fecha de la sustentación.

ÍNDICE

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
DISCLAIMER.....	4
ACERCA DEL AUTOR	5
ÍNDICE.....	6
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
DESCRIPTORES TEMÁTICOS	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN.....	15
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.1. DIAGNÓSTICO Y ENUNCIADO DEL PROBLEMA.....	19
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	28
1.3. DELIMITACIÓN DE LOS OBJETIVOS	28
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	28
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
1.4. IMPORTANCIA, ALCANCE, JUSTIFICACIÓN Y LIMITACIONES	29
1.4.1. IMPORTANCIA DEL TEMA	29
1.4.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	30
1.4.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	31
1.4.4. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	31

CAPÍTULO II: EL MARCO TEÓRICO	33
2.1. METODOLOGÍAS DE REFERENCIA	33
2.1.1. EL ANÁLISIS DE FLUJO DE MATERIALES	33
2.1.2. LA AUTORREDUCCIÓN Y LA RECUPERACIÓN DEL PLOMO.....	35
2.1.3. EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA BAJO LA PERSPECTIVA INSUMO-PRODUCTO (EEIOA).....	39
2.2. MARCO TEÓRICO	41
2.2.1. LA SOSTENIBILIDAD	41
2.2.2. LA ECOINNOVACIÓN.....	42
2.2.3. LA RELACIÓN ENTRE LA INNOVACIÓN Y LA SOSTENIBILIDAD	44
2.2.4. LA CREACIÓN DE VALOR SOSTENIBLE.....	45
2.2.5. FACTORES CLAVE Y BARRERAS PARA LA ECOINNOVACIÓN	46
2.2.6. ECONOMÍA CIRCULAR, MINERÍA URBANA Y LOS RAEE	47
2.2.7. EL RECICLAJE DE TUBOS DE RAYOS CATÓDICOS (CRT)	49
2.2.8. EL APAGÓN ANALÓGICO	50
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	53
3.1. TAXONOMÍA DE LA INVESTIGACIÓN	53
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN: EL ESTUDIO DE CASO.....	53
3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	54
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	59
4.1. LA TENENCIA DE ELECTRODOMÉSTICOS EN LOS HOGARES PERUANOS	59
4.1.1. LAS IMPORTACIONES DE ELECTRODOMÉSTICOS EN EL PERÚ (2001-2019)	59
4.1.2. EL INVENTARIO DE ELECTRODOMÉSTICOS EN EL PERÚ (2001-2019).....	61
4.1.3. FACTORES DE CRECIMIENTO DEL INVENTARIO DE ELECTRODOMÉSTICOS EN EL PERÚ ...	63
4.2. LAS EMISIONES DE GEI DE LOS ELECTRODOMÉSTICOS PRESENTES EN LOS HOGARES	65
4.2.1. GENERACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	66
4.2.2. ANÁLISIS DE KUZNETS DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	67

4.3. EL IMPACTO DE LOS CAMBIOS TECNOLÓGICOS SOBRE EL INVENTARIO DE TELEVISORES EN EL PERÚ.....	69
4.4. FLUJOS E INVENTARIOS DE TELEVISORES DE RAYOS CATÓDICOS EN EL PERÚ	70
4.4.1. IDENTIFICACIÓN DE ACTORES Y PROCESOS	71
4.4.2. DEFINICIÓN DE LAS ECUACIONES DE BALANCE.....	71
4.4.3. ANÁLISIS DE LOS INVENTARIOS Y FLUJOS DE CRT EN LOS HOGARES	73
4.5. APLICACIÓN DE LA AUTORREDUCCIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE PLOMO A PARTIR DEL VIDRIO DE LOS CRT	78
4.5.1. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGENTE FUNDENTE.....	78
4.5.2. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE REACCIÓN	79
4.5.3. PRIMER ENSAYO PILOTO	80
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	88
RELACIÓN DE ANEXOS.....	109

LISTA DE TABLAS

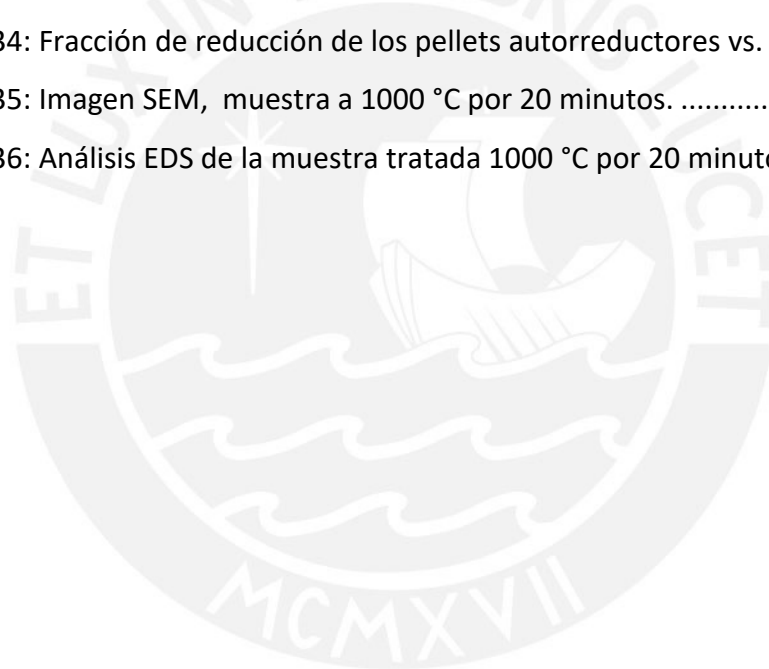
Tabla 1: Electrodomésticos incluidos en la Encuesta Nacional de Hogares	21
Tabla 2: Enfoques para estimar datos durante la realización del AFM	34
Tabla 3: Resumen de procesos pirometalúrgicos para la recuperación del plomo a partir del vidrio de CRT	38
Tabla 4: Estructura de la Matriz Insumo Producto (Matthews et al., 2015)	41
Tabla 5: Taxonomía de la Investigación	55
Tabla 6: Elementos de los Respectivos Casos de Estudio	56
Tabla 7: Resultados de los inventarios en los hogares (2001-2019).....	62
Tabla 8: Comparación de los resultados de INGEI versus los obtenidos mediante el EEIOA para Perú	67
Tabla 9: Inventarios proyectados de CRT-TV y plomo al año 2025	75



LISTA DE FIGURAS

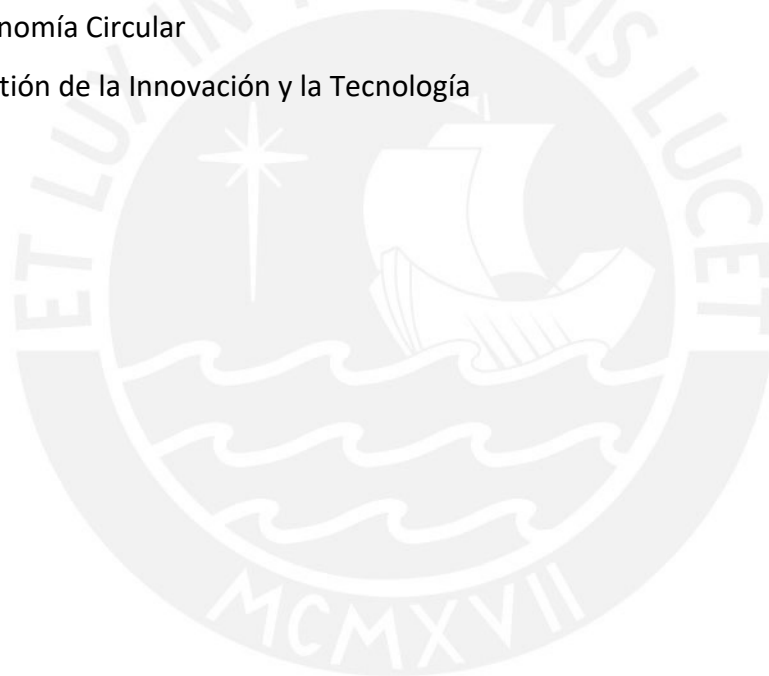
Figura 1: Importaciones de electrodomésticos seleccionados por la Encuesta Nacional de Hogares (ENAH): 2001-2019.....	20
Figura 2: Porcentajes de comercialización de CRT-TV (ENAH): 2004-2017	22
Figura 3: Porcentajes de hogares que cuentan con al menos un televisor, de acuerdo con la ENAH: 2004-2017	23
Figura 4: Porcentajes de hogares que cuentan con al menos un televisor, de acuerdo con la ENAH: 2004-2017.....	24
Figura 5: Esquema de un CRT.....	25
Figura 6: Contenidos de óxidos en los embudos de CRT	26
Figura 7: Ejemplo ficticio de AFM con 8 nodos y 11 flujos	33
Figura 8: Etapas para la realización de un AFM	35
Figura 9: Diagrama de Ellingham para el sistema Pb/C	37
Figura 10: Condiciones de equilibrio de la reacción de Boudouard ($C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$) a 1 atm	37
Figura 11: Ciclo de Vida.....	40
Figura 12: Metodología general de la investigación	58
Figura 13: Importaciones de electrodomésticos en el Perú (2001-2019)	60
Figura 14: Importaciones de electrodomésticos: masa vs unidades.....	61
Figura 15: Posesión de electrodomésticos en los hogares (2001 al 2019).....	62
Figura 16: Evolución de la masa promedio de electrodomésticos en los hogares....	62
Figura 17: Porcentaje de posesión de electrodomésticos en los hogares (2001 al 2019)	63
Figura 18: Masa promedio de los electrodomésticos (2001 - 2019)	64
Figura 19: Curvas ambientales de Kuznets	65
Figura 20: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	66
Figura 21: emisiones de GEI e Inventario de electrodomésticos vs. PBI por hogar ..	67
Figura 22: Valores normalizados de las variables demográficas y económicas respecto al crecimiento de inventario de electrodomésticos en los hogares y las emisiones de GEI	68

Figura 23: Importaciones de televisores, (2001-2019), en unidades	69
Figura 24: Inventarios de televisores (2001-2019)	70
Figura 25: Actores y procesos del sistema	72
Figura 26: Importaciones de CRT-TV, (2005-2017)	73
Figura 27: Inventario de CRT-TV en los hogares, escenario Mixed-EOL (2005-2017)...	74
Figura 28: Inventario de CRT-TV en los hogares, escenario CRT-EOL (2005-2017) ...	75
Figura 29: Inventario de plomo, Households, (2005-2017), $\alpha = 5\%$	76
Figura 30: Inventario de plomo, B&P, (2005-2017), $\alpha = 5\%$	76
Figura 31: Inventario de CRT-TV en los hogares	77
Figura 32: Inventario de plomo en los CRT-TV en los hogares	77
Figura 33: Variación del volumen de pellets vs. tiempo, para diferentes % of CaO..	79
Figura 34: Fracción de reducción de los pellets autorreductores vs. tiempo.....	80
Figura 35: Imagen SEM, muestra a 1000 °C por 20 minutos.	81
Figura 36: Análisis EDS de la muestra tratada 1000 °C por 20 minutos	82



DESCRIPTORES TEMÁTICOS

- Residuos de Artefactos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)
- Análisis de Flujo de Materiales (AFM)
- Autorreducción
- Economía Circular
- Gestión de la Innovación y la Tecnología



RESUMEN

Le economía circular es una de las formas en las que el crecimiento económico sea independiente a sus correspondientes impactos ambientales al cambiar de un patrón de producción y consumo de extraer, usar y disponer a otro en el cual la mayor cantidad de materiales pueda retornar a los procesos de producción. Los artefactos eléctricos y electrónicos (AEE) al final de su vida útil pueden constituirse en una fuente de materiales valiosos en vez de ser dispuestos en un relleno de seguridad ocupando espacio innecesariamente.

El objetivo de esta tesis consiste en determinar si los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) pueden ser fuente de materiales valiosos en vez de ser dispuestos en un relleno de seguridad utilizando como objeto de estudio los televisores de tubos de rayos catódicos (CRT-TV). Para esto, se analizó la tenencia de electrodomésticos en los hogares peruanos, se evaluó el impacto de los cambios tecnológicos en la posesión de televisores en el Perú, examinándose además los flujos e inventarios de CRT-TV entre los años 1998 a 2017 y se determinó la factibilidad de recuperar el plomo de las pantallas de los CRT-TV a través de la autorreducción. De forma complementaria, se estimó el consumo de energía de los electrodomésticos en los hogares utilizando el análisis insumo-producto extendido ambientalmente (EEIOA, por sus siglas en inglés).

Los resultados indican, en síntesis, que los inventarios de electrodomésticos y sus emisiones de GEI asociadas a su fase de uso continuarán aumentando, que existirán cantidades importantes de televisores obsoletos al final del apagón que deben ser procesados y que la opción de utilizar pellets autorreductores para recupera el plomo es prometedor, aunque aún requieren de pruebas adicionales

Palabras clave: Economía Circular, Minería Urbana, AFM, EEIOA, recuperación de plomo, autorreducción.

ABSTRACT

The circular economy is one of the ways in which economic growth is independent of its corresponding environmental impacts by shifting from a production and consumption pattern of extract, use and dispose to one in which as many materials as possible can be returned to the production process. Waste of electrical and electronic equipment (WEEE or e-waste) can become a source of valuable materials rather than being disposed of in a landfill taking up unnecessary space.

The objective of this thesis is to determine whether waste electrical and electronic equipment (WEEE) can be a source of valuable materials instead of being disposed of in a landfill using cathode ray tube televisions (CRT-TV) as the object of study. For this, the ownership of household appliances in Peruvian households was analyzed, the impact of technological changes on the ownership of televisions in Peru was evaluated, and the flows and inventories of CRT-TVs between the years 1998 to 2017 were also examined, and the feasibility of recovering lead from CRT-TV screens through self-reduction was determined. In a complementary manner, the energy consumption of household appliances was estimated using the environmentally extended input–output analysis (EEIOA).

The results indicate, in summary, that the inventories of household appliances and their GHG emissions associated with their use phase will continue to increase, that there will be significant quantities of obsolete TV sets at the end of the switch-off that need to be processed, and that the option of using self-reducing pellets to recover lead is promising, although it still requires further testing.

Keywords: Circular Economy, Urban Mining, AFM, EEIOA, lead reclamation, self-reduction

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad es un constructo reciente; pero que a su vez ha sido inherente a la aparición de la sociedad, por lo que su presencia o ausencia ha sido causante del apogeo u ocaso de diversas civilizaciones a lo largo de la historia (Goldstein, 2007). Desde tiempos antiguos, la humanidad empezó a tener consciencia de cuál era su relación con su entorno. Por esta razón quizás sea que los orígenes de la sostenibilidad sean de carácter espiritual para explicar la relación entre la sociedad y los elementos bióticos y abióticos que le rodean (Mebratu, 1998).

Para lograr estilos de vida más sostenibles, la economía circular podría ser una opción válida en la que el patrón de producción y consumo “lineales”, consistente en la dinámica extraer-consumir-disponer, transite a patrones “circulares”, en lo que los bienes a su fin de ciclo de vida sean reciclados y se mantengan en la tecnosfera de forma indefinida (de Wit et al., 2018), en vez de ser enterrados de forma indefinida en una instalación de disposición final de residuos. En ese sentido, la minería urbana puede constituirse es una aplicación práctica del concepto de economía circular recuperando materiales valiosos de todo aquel producto que podría terminar siendo enterrado en una instalación de disposición final de residuos sólidos (Cossu et al., 2012).

Los artefactos eléctricos y electrónicos (AEE), que son todos aquellos que necesitan de energía eléctrica para funcionar y cumplir sus propósitos (D.S. N°009-2019-MINAM), pueden ser un indicador del crecimiento de una sociedad pues éstos impactan en las vidas de las personas mejorando su calidad de vida, por ejemplo, facilitándoles diversas tareas diarias tal como lo hacen los electrodomésticos de línea blanca (lavadoras, cocinas, entre otros), y cambiando la manera entre la que los miembros de una sociedad interactúan y se comunican. Esta situación no es ajena al Perú, durante estos últimos años, el consumo de AEE ha venido en aumento particularmente de estos últimos veinte años, tal como se muestra en la figura 1.

Empero, es importante mencionar que la adquisición de AEE por la población acarrea la generación de impactos ambientales, entre los cuales se encuentra las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante su fase de uso, y la generación de residuos de artefactos eléctricos y electrónicos (RAEE). Los RAEE son considerados un tipo especial de residuos debido a que pueden contener no solo sustancias valiosas, sino también otras que son peligrosas para la salud humana y para el ambiente (Kumar et al., 2017). Tomando como ejemplo los televisores, la población ha sido testigo de los cambios tecnológicos relacionados con el cambio de tecnologías de proyección de imágenes y el cambio a la televisión de señal digital, con lo que se abre una línea de investigación interesante respecto al tratamiento de RAEE en vez de limitarse a dismantelar, recuperar los materiales tales como metales y plásticos en este proceso de dismantelamiento, y exportación de aquellos componentes que contienen materiales valiosos; pero que aún no se cuenta con la tecnología necesaria para su tratamiento en el país.

La presente tesis consiste en el estudio del potencial de implementar la economía circular desde la perspectiva de la recuperación de materiales valiosos a partir de los residuos de artefactos eléctricos y electrónicos en el Perú, para lo cual se hace un estudio descriptivo para ver la evolución de inventario de AEE en el Perú a través del Análisis de Flujo de Materiales (AFM), así como realizar una estimación de las emisiones de GEI utilizando el análisis de ciclo. En segundo lugar, tomando como caso los aparatos de televisión, se realiza un estudio similar considerando el efecto del cambio de la tecnología de proyección de imágenes y la introducción de la televisión digital terrestre (TDT) en el Perú considerando qué hacer cuando los televisores de tubos de rayos catódicos (CRT-TV) queden inoperativos al no poder recibir señal digital. Finalmente, se evalúa la posibilidad de utilizar la técnica de pellets autorreductores para la reducción del plomo presente en los tubos de rayos catódicos en una reacción sólido-gas en vez de los procesos convencionales sólido-líquido.

El primer capítulo consta del planeamiento de la investigación: en este se hace una descripción del problema respecto a las tendencias en el consumo de electrodomésticos en el Perú, para sí obtener las correspondientes preguntas de

investigación y los objetivos de la tesis. Además de indicar la importancia, justificación, limitaciones y alcance de la tesis.

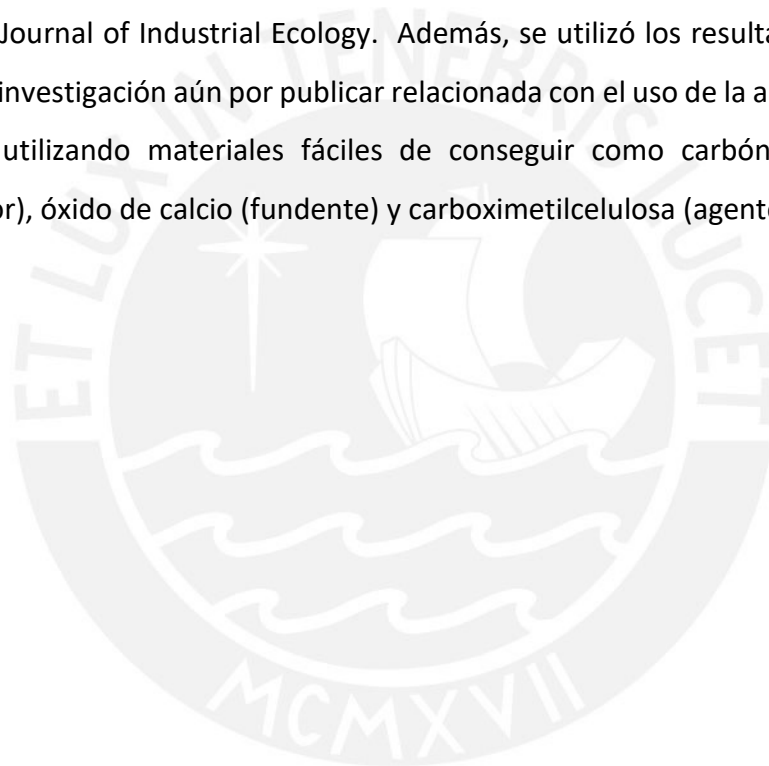
El segundo capítulo trata en su primera parte sobre las metodologías de referencia: el análisis de flujo de materiales (AFM), la autorreducción del plomo mediante el uso de pellets autorreductores (*self-reducing pellets*, SRP), y el análisis insumo-producto extendido ambientalmente (*environmentally extended input-output analysis*, EEIOA) para la estimación de emisiones de GEI utilizando datos de carácter económico. La segunda parte, en cambio, describe todos los elementos necesarios para comprender la presente tesis tales como las relaciones entre la sostenibilidad y la innovación, la generación de valor sostenible, la economía circular, la minería urbana y su relación con los RAEE.

El tercer capítulo indica la taxonomía de la investigación, el uso del estudio de caso como herramienta principal de investigación, la taxonomía de la investigación, de acuerdo con la propuesta de Barrantes (2008) y la descripción de la metodología seguida en los tres insumos principales de la tesis, de acuerdo con Hernández Sampieri y Mendoza Torres (2018)

El cuarto capítulo hace una síntesis de las investigaciones realizadas de acuerdo con los cinco objetivos específicos planteados en esta tesis relacionados con: la tenencia de AEE en los hogares peruanos, la emisión de GEI en la fase de uso de los AEE y un análisis utilizando la curva ambiental de Kuznets, el impacto del salto tecnológico en la tenencia de televisores y la posibilidad de utilizar una técnica que proviene de la siderurgia para recuperar el plomo de los CRT. Los resultados indican, en síntesis, que a pesar de la dematerialización de ciertos AEE, la tendencia en número y en masa, así como las emisiones asociadas a su fase de uso tienen tendencia creciente; que al final de apagón analógico, en el cual la señal analógica dejará de transmitirse, quedará una cantidad significativa de televisores inservibles que deberán ser procesados para recuperar el plomo y usar el silicio para otros usos en vez de ser enterrados en un relleno sanitario de seguridad, y que la extracción de plomo de los CRT mediante el uso de pellets autorreductores es prometedora y requiere de investigaciones más detalladas.

El quinto y último capítulo trata sobre las conclusiones de estas tesis acordes con objetivo general y sus correspondientes objetivos y las recomendaciones que quedan respecto a los actores que participan en los procesos de producción (importación) y consumo de AEE.

Finalmente, la presente investigación se basa principalmente en los artículos *Electronic waste after a digital TV transition: Material flows and stocks* (Gusukuma & Kahhat, 2018), publicado en la revista. *Resources, Conservation and Recycling*, así como el artículo *Evolution of the stock of electrical and electronic equipment in the Peruvian residential sector* (Gusukuma, Kahhat & Cáceres 2022), publicado en la revista *Journal of Industrial Ecology*. Además, se utilizó los resultados preliminares de una investigación aún por publicar relacionada con el uso de la autorreducción del plomo utilizando materiales fáciles de conseguir como carbón vegetal (agente reductor), óxido de calcio (fundente) y carboximetilcelulosa (agente aglutinante).



CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. DIAGNÓSTICO Y ENUNCIADO DEL PROBLEMA

1.1.1. Definición del Problema

El número de electrodomésticos en los hogares se ha incrementado de forma significativa durante los últimos años, cambiando el estilo de vida de las personas, particularmente en las formas en las que interactúan y se comunican entre ellas (Turkle, 2017). Se estima que la ganancia en el sector de electrodomésticos de línea blanca será de 261 mil 220 millones de dólares en 2022, con un crecimiento anual para el periodo 2022-2025 de 10,15% (Statista, 2021b), mientras que en el sector de electrónica de consumo, se esperan ganancias de 781 mil 580 millones de dólares y una tasa de crecimiento de 7,62% (Statista, 2021a). Además, esta adopción de dispositivos de tecnologías de la información y comunicación en los hogares también está asociados a temas tales como la convergencia de prestaciones en un solo dispositivo, por ejemplo, en el caso de los teléfonos inteligentes, lo cual tendría como consecuencia dejar de adquirir otros equipos tales como reproductores de música, cámaras de fotos, entre otros. No obstante, existe una tendencia creciente en la posesión de estos dispositivos, así como los impactos ambientales generados en su fase de uso (Ryen et al., 2015).

En el caso de Perú, la situación no es distinta. Debido a la política macroeconómica mantenida por el Estado Peruano durante los últimos 20 años, se ha incrementado la posesión de artefactos electrodomésticos en los hogares, considerando que forman parte importante de su vida diaria y que se considera como un indicador socioeconómico por diversas razones (INEI, 2019). Por ejemplo, aquellas familias que no contaban con un refrigerador en su casa estaban forzadas a ir al mercado con mayor frecuencia que aquellas que sí contaban con este electrodoméstico, aumentando su exposición al virus SARS-Cov-2 simplemente por

la frecuencia por la que tenían que ir al mercado para abastecerse de alimentos (Peru21, 2020). La figura 1 muestra la evolución de las importaciones de aquellos electrodomésticos seleccionados por la Encuesta Nacional de Hogares (ENAHO) para estimar el nivel de pobreza de las familias en el Perú.

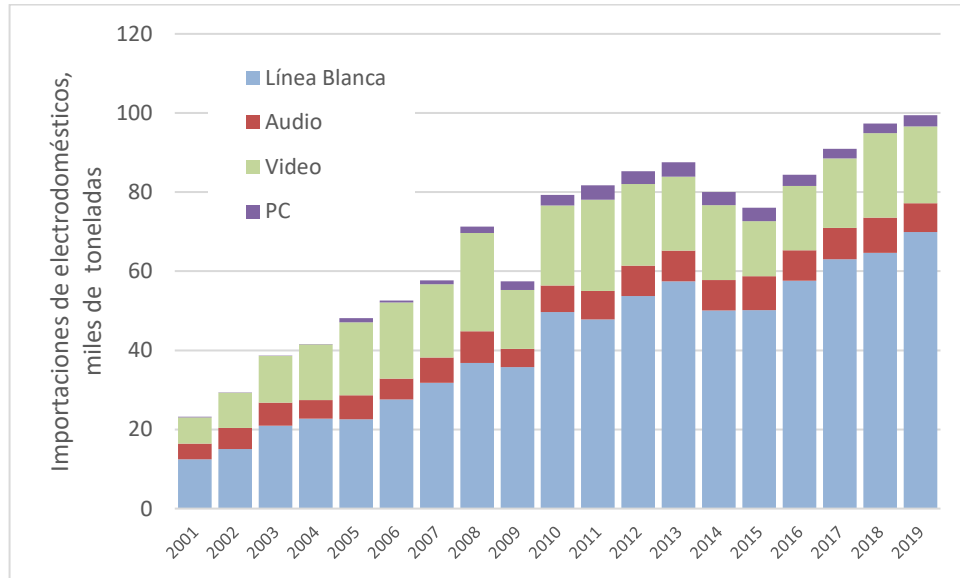


Figura 1: Importaciones de electrodomésticos seleccionados por la Encuesta Nacional de Hogares (ENAHO): 2001-2019 (Gusukuma, Kahhat & Cáceres, 2022)

El aumento de los inventarios de los hogares de equipos electrónicos principalmente está relacionado con los patrones de consumo de energía. Es por esta razón que es importante entender las tendencias en la posesión de artefactos eléctricos y electrónicos podría ser importante, por ejemplo, para la estimación del consumo eléctrico en los hogares, así como el desarrollo de políticas para la mejora de la eficiencia energética en el sector residencial (Heidari & Patel, 2020), que pueden repercutir positivamente en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Crosbie, 2008; Newell & Siikamäki, 2014). Además, la reducción de GEI contribuiría con la meta de reducir en 30% las emisiones de GEI en el año 2030, tal como se ha comprometido en el Acuerdo de Copenhague (Vázquez-Rowe et al., 2019).

La generación de residuos de artefactos eléctricos y electrónicos (RAEE) es un problema de escala mundial. En el año 2019 se generaron 53.6 millones de toneladas de RAEE, equivalente a 7.3 kg per cápita (Forti et al., 2020), lo que los convierte en una fuente de materias primas para la industria, lo cual estaría alineado con el

concepto de Economía Circular (The Ellen MacArthur Foundation, 2013) y minería urbana de metales preciosos (Jingru Liu et al., 2020; Zhu et al., 2017)., pudiendo ser fuente de materiales valiosos para la industria tales como el cobalto de las baterías recargables, el indio de las pantallas de cristal líquido y el oro de los circuitos impresos (Althaf et al., 2020; Wagner et al., 2021; Zhilyaev et al., 2021). No obstante, es importante mencionar que en el Perú existe también un mercado informal relacionado con la gestión de residuos sólidos de artefactos eléctricos (Espinoza et al., n.d.; Hieronymi et al., 2012; Kahhat & Williams, 2009b; Williams et al., 2013), el cual es posible que no realice la recuperación de materiales valiosos de forma segura para la salud humana y el ambiente.

Tabla 1: Electrodomésticos incluidos en la Encuesta Nacional de Hogares

	Categoría	Electrodoméstico	Categoría UNU (Forti et al., 2018)
1	Audio	Radio	0403
2	Video	TV a color (CRT)	0407
3	Video	TV (P. Plana)	0408
4	Audio	Equipo de Sonido	0403
5	Video	Reproductor DVD	0404
6	Video	Reproductor VHS	0404
7	Computadora	PC (Escritorio)	0302
8	Computadora	Laptop	0303
9	Línea Blanca	Plancha	0201
10	Línea Blanca	Licuada	0201
11	Línea Blanca	Horno	0103
12	Línea Blanca	Refrigeradora	0108
13	Línea Blanca	Lavadora	0104
14	Línea Blanca	Horno microonda	0114

Las encuestas nacionales son herramientas útiles para medir variables tales como el empleo, condiciones de vida, ingresos, entre otras (Feres & Medina, 2001). siendo la posesión de AEE una variable relacionada con el bienestar de los hogares, por lo que los datos de estas encuestas de diversos países incluyen tasas de adopción

de AEE en los hogares (Silva, 2018). La tabla muestra los AEE incluidos en la Encuesta Nacional de Hogares (ENAH), elaborada anualmente por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, n.d.)

Dentro de los AEE incluidos en la ENAH, están incluidos los receptores de televisión (TV), los cuáles son un elemento importante en los hogares en el mundo y de los que usuarios han sido testigos de su transformación en los últimos años. Por ejemplo, el cambio en su morfología a equipos más esbeltos con pantallas más grandes, entre otras mejoras relacionadas con su desempeño ambiental, en particular sobre el consumo energético durante la fase de uso (Aoe, et al., 2003; Teunissen, et al., 2012; Harrison & Scholand, 2014, Bhakar et al.; 2015), así como una serie de acciones y estándares para reducir su impacto sobre el ambiente (Köhler, 2013). Desde el punto de vista del consumidor, los avances de la tecnología de proyección de imágenes han sido beneficiosas para mejorar su experiencia de uso.

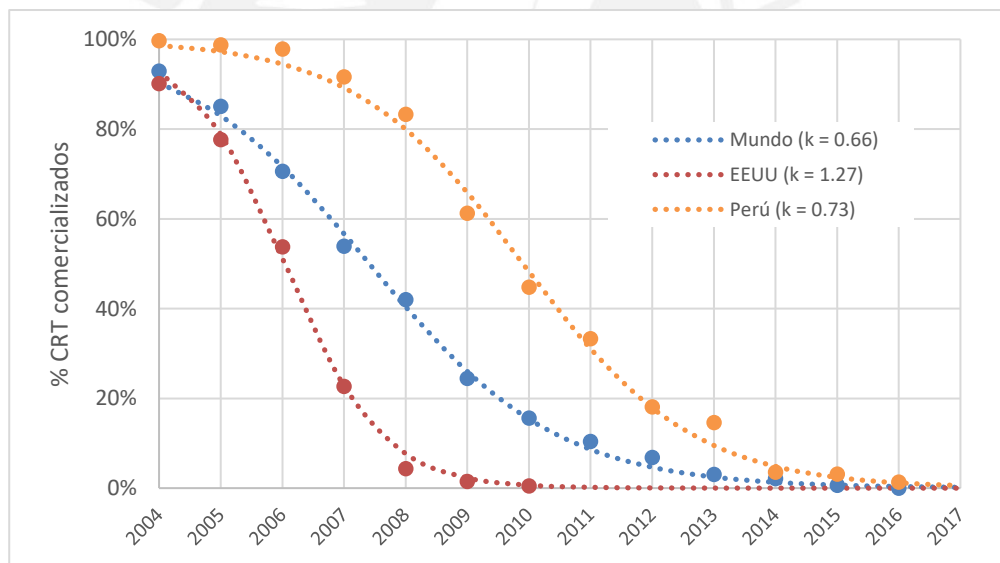


Figura 2: Porcentajes de comercialización de CRT-TV (ENAH): 2004-2017 (Gusukuma & Kahhat, 2018)

Los tubos de rayos catódicos (Cathode Ray Tubes, CRT), han sido la tecnología predominante por más de 70 años debido a la madurez de su tecnología, confiabilidad y costos bajos de producción (Lairaksa, et al., 2013). Pero tal como ha ocurrido en otras tecnologías, éstas son desplazadas por otras con más y mejores prestaciones, tal como se ha observado en el reemplazo de pantallas tipo CRT por tecnologías de pantallas planas de cristal líquido (Singh, et al., 2016). Por lo tanto, la desaparición de los televisores con pantalla de tubo de rayos catódicos (CRT-TV) es

consecuencia del salto tecnológico y que ha sido un fenómeno global. La figura 2 muestra los porcentajes de CRT-TV comercializados, mostrándose su tendencia decreciente a desaparecer del mercado en el mundo, en los Estados Unidos y en Perú, observándose que mientras en el Perú el proceso de reemplazó empezó después, en el año 2016 se observa que en los tres casos esta tecnología es casi inexisten en estos mercados.

Las importaciones de televisores en el Perú no solo han mantenido una tendencia creciente en los últimos años, sino también evidencian el cambio tecnológico que han experimentado estos artefactos electrodomésticos. Mientras que en la figura 3 se muestra el aumento de porcentaje de hogares que cuentan con al menos un televisor, la figura 4 muestra la evolución de las importaciones: mientras que en los primeros años mostrados la tecnología predominante era la de tubos de rayos catódicos, en la actualidad la tecnología dominante es la de pantallas de cristal líquido, retroiluminadas con diodos emisores de luz (LED).

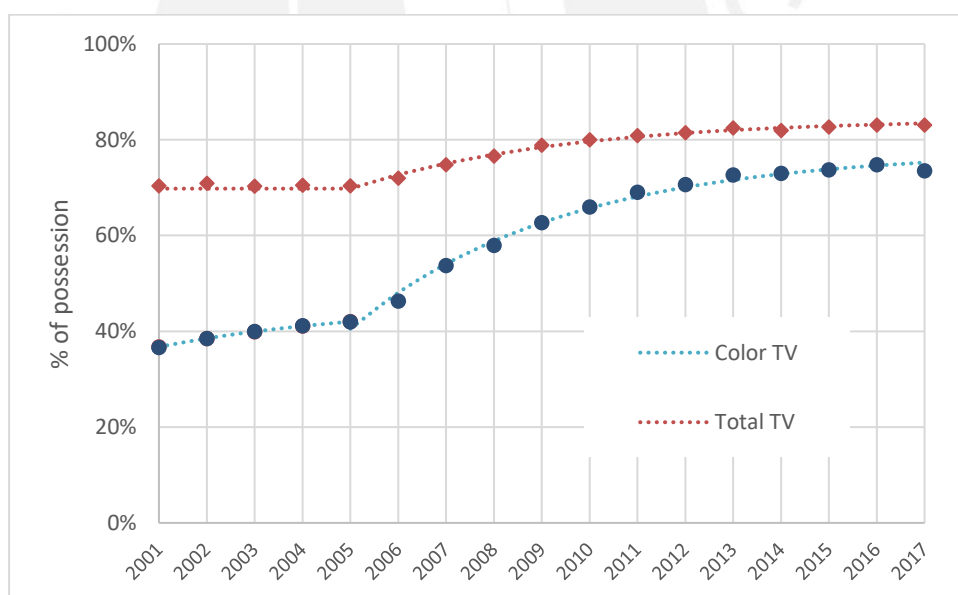


Figura 3: Porcentajes de hogares que cuentan con al menos un televisor, de acuerdo con la ENAHO: 2004-2017 (Gusukuma & Kahhat, 2018)

El apagón analógico es el proceso que está realizando el estado peruano para reemplazar el estándar de transmisión analógico estadounidense NTSC (National Television Standards Committee), por la versión brasileña del estándar japonés ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial). Este cambio tendrá una serie

de beneficios para los usuarios. Entre tantos, se tiene un mejor uso del espectro electromagnético para una transmisión de imágenes con mejor resolución y una mayor variedad de canales (Rojas, 2016), asegurar el futuro de la transmisión digital terrestre y la posibilidad de ofrecer servicios gratuitos basado en la televisión digital terrestre (TDT) (DigiTAG, 2008). Se esperaba que este proceso debía acabar en todo el territorio nacional al final del año 2025 (R.S. N°019-2009-MTC, 2009; D.S. N°020-2014-MTC, 2014); pero de acuerdo con el decreto supremo que modifica el numeral 15.1 del artículo 15 del Plan Maestro para la Implementación de la Televisión Digital, éste será postergado para el año 2027 (D.S. 007-2021-MTC, 2021).

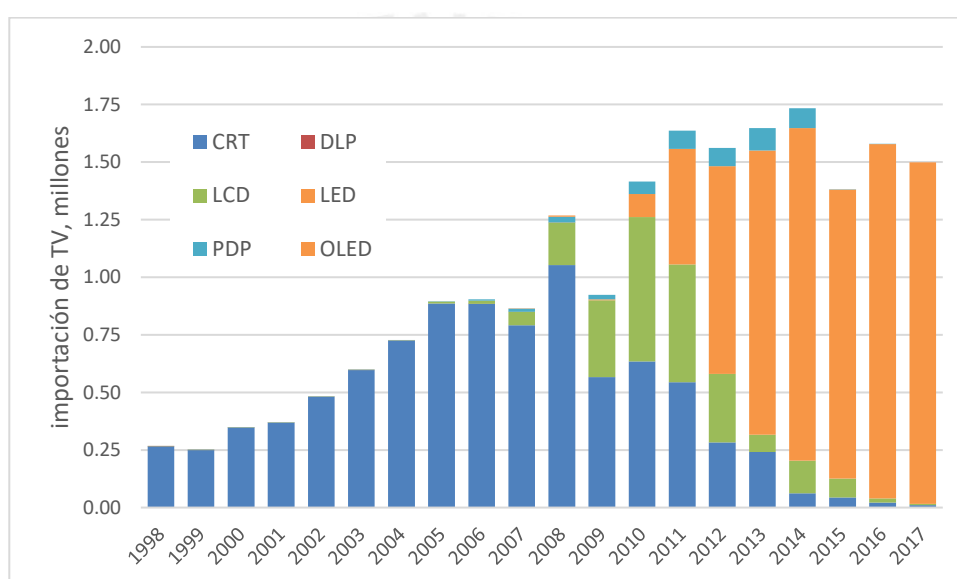


Figura 4: Porcentajes de hogares que cuentan con al menos un televisor, de acuerdo con la ENAHO: 2004-2017

CRT: tubo de rayos catódicos; DLP: procesamiento digital de luz, LCD: pantalla de cristal líquido, PDP: pantalla de plasma, LED: pantalla retroiluminada con diodos emisores de luz, OLED: diodos emisores de luz orgánicos (Gusukuma & Kahhat, 2018)

El apagón analógico, en conjunto con el cambio tecnológico, tendrán como consecuencia que los CRT-TV dejarán de ser útiles para los consumidores y todos querrán deshacerse de estos. Se tiene por ejemplo en caso de los Estados Unidos, que después de la implementación en 2013 de la televisión digital (Digital Television Transition and Public Safety Act, 2005; DTV Delay Act, 2009), existía un inventario en los hogares equivalentes a 232 millones de unidades esperando a ser recicladas, reusadas o exportadas para reciclaje (Shaw Environmental Inc., 2013). Mientras que, en el caso de México, primer país en Latinoamérica en completar el apagón analógico, el periodo de transición sufrió muchos inconvenientes tales como el adelantamiento

de la transición del año 2025 al 2021 (Cervantes, 2014); la ausencia de legislación respecto al manejo de RAEE y deficiencias en la cadena de suministros de RAEE (González, 2015); la falta de planes de fin de vida de los CRT-TV, entre otros) (René, 2015). En síntesis, la implementación de estándar ISDB-T, de no implementarse las políticas necesarias tendrán consecuencias no solo para la economía de las personas, sino traerá impactos negativos en el ambiente.

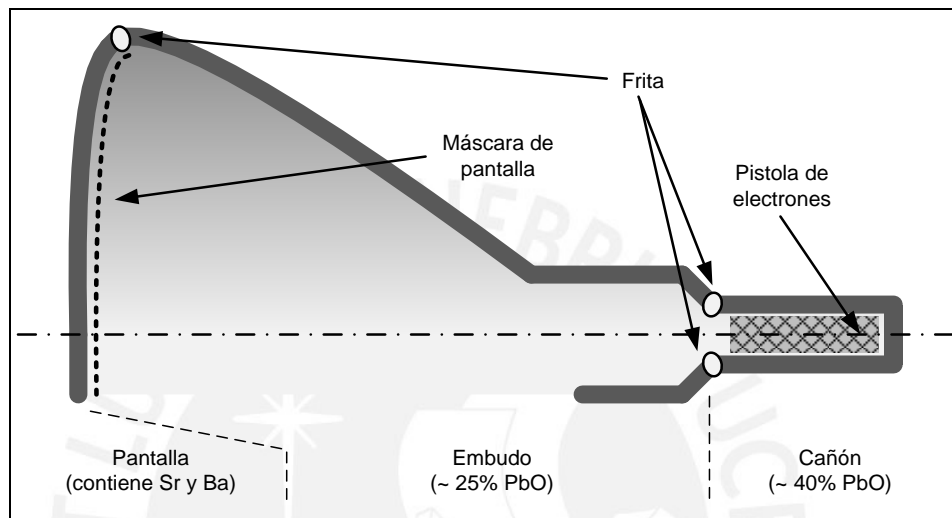


Figura 5: Esquema de un CRT (adaptado de Méar, et al., 2006)

Los CRT-TV contienen materiales valiosos que pueden ser recuperados, también cuentan con materiales peligrosos durante su manipulación tales como el plomo en los tubos de rayos catódicos, lo cual los convierte en residuos sólidos peligrosos CRT, elemento principal de este tipo de electrodomésticos, consiste en una botella al vacío que contiene la pistola de electrones y una pantalla fluorescente y está compuesto de 3 secciones –pantalla, usualmente libre de plomo, embudo y cuello–, unidos por medio de una frita, que es un tipo de vidrio de bajo punto de fusión y de un contenido alto de plomo (Herat, 2008), tal como se muestra en la figura 5. La función del plomo en un CRT es evitar que los rayos X escapen fuera del CRT (Andreola, et al., 2007; Lee, et al., 2000; Musson, et al. 2000). El plomo tiene un excelente comportamiento absorbiendo rayos X; solo puede ser en el embudo debido a que al ser irradiado produce un efecto parduzco en la pantalla. Mientras que bario, estroncio y zinc se utilizan en la pantalla, el plomo se utiliza en el embudo debido a su menor costo (Méar, et al., 2006, Andreola et al., 2007). La figura 6 se muestra la composición promedio de los embudos de los CRT obtenidos de diversas fuentes.

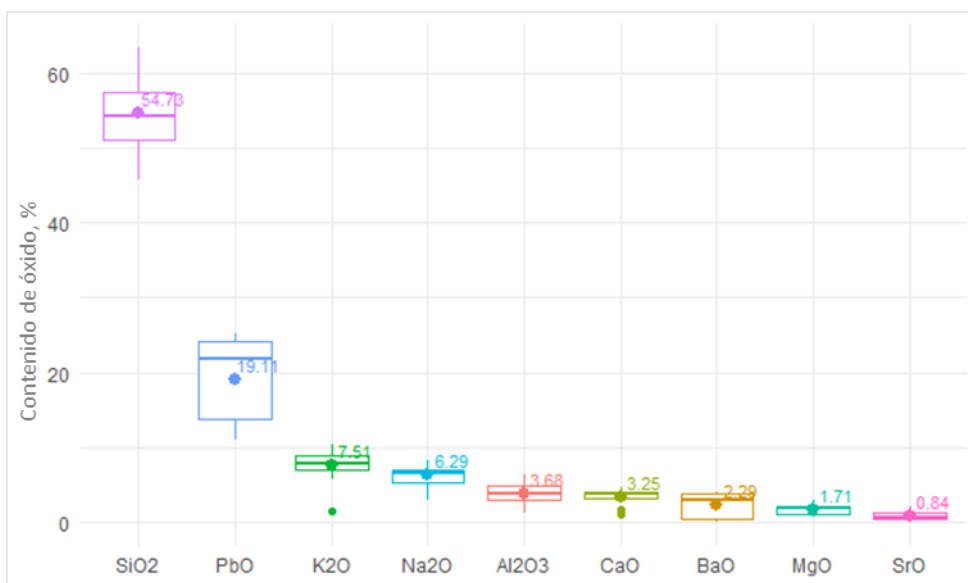


Figura 6: Contenidos de óxidos en los embudos de CRT

Adaptado de: (Grause, et al., 2014; Hiroyoshi, et al., 2013; ICER, 2004; Ling & Poon, 2014; Mostaghel & Samuelsson, 2010; Mueller, et al., 2012; Shi, et al., 2011; Yu, et al., 2016; Zhang et al., 2016)

Una vez que los CRT TV llegan a su fin de vida, éstos se convierten en un serio problema ambiental: Los CRT en sí mismos no son atractivos para ser reciclados debido a que son voluminosos, costosos de transportar y no se degradan fácilmente (Mueller et al., 2012). El reciclado de los CRT y otros equipos electrónicos en los países en desarrollo por el sector informal ha sido estudiado (Estrada-Ayub & Kahhat, 2014; Kahhat & Williams, 2009a, 2012; Lepawsky & Billah, 2011), en donde se observa que estos procesos no son llevado a cabo en condiciones seguras para la salud humana y el ambiente. Esto es, cuando el proceso de reciclado es llevado a cabo por el sector informal los materiales valiosos aquellos materiales que no tienen un valor económico terminan en un relleno sanitario o un botadero (Kahhat & Williams, 2009b; Xu et al., 2012). Además, contienen una serie de sustancias tóxicas tales como plomo, bario y cadmio que pueden causar daños a la salud humana cuando manipulados en procesos de reciclaje (Lecler, et al., 2015) De acuerdo con la legislación peruana, los CRT son considerados residuos sólidos peligrosos debido a su contenido de plomo, por lo que necesariamente deben ser dispuestos en un relleno sanitario de seguridad (D.S. 057-2004-PCM, 2004) debido al riesgo que el plomo lixivie, causando serios daños al ambiente y la salud humana (Junxiao Liu et al., 2011; Musson et al., 2000; Williams et al., 2008). Aun así, el plomo es un recurso estratégicamente importante por sus aplicaciones industriales (Agrawal et al., 2004).

La morfología del vidrio de plomo ha sido ampliamente estudiada debido a su importancia en la industria óptica: La temperatura de transición (T_g) del embudo del CRT es de 505 °C, mientras que la temperatura de ablandamiento (T_s) es de 750 °C (Andreola et al., 2007). Los sistemas PbO-SiO₂ tienen diversas aplicaciones en la óptica y en la protección contra la radiación (Kohara et al., 2010). Los átomos de plomo están fijos en las cavidades de la red vítrea, consistente en una red -O-Si-O- o puede formar parcialmente parte de la red vítrea como -O-Si-O-Pb-O- (Sasai et al., 2008). Dependiendo de la concentración de plomo, las estructuras SiO₄ y PbO_x actúan como formadores o modificadores de red (Alderman et al., 2013; Kohara et al., 2010; Mizuno et al., 2005; Wang & Zhang, 1996; Witkowska et al., 2005). Por lo tanto, la forma en la que el plomo está en la estructura cristalina hace difícil separar al plomo bajo condiciones normales de presión y temperatura (Miyoshi et al., 2004).

Los procesos de reciclaje del vidrio se clasifican de acuerdo con el destino del material. Los procesos de lazo cerrado (*glass-to-glass*) eran idóneos pues el material era reciclado para producir tubos de rayos catódicos. Sin embargo, esta tecnología de proyección de imágenes está en declive en favor de las pantallas de cristal líquido. Por otro lado, existen procesos en los que el vidrio de CRT se procesan para otros usos diferentes tales como esponja de vidrio (Chen et al., 2009), mayólicas (Andreola et al., 2007) y como agregado en concreto (Ling & Poon, 2014). Sin embargo, estos procesos no resuelven el problema de las sustancias peligrosas tales como bario, estroncio y plomo contenidas en los CRT-TV (Herat, 2008).

Los procesos de tratamiento de los CRT deben considerar los siguientes factores: Deben ser económicamente atractivos (Xu et al., 2012), considerando que el plomo no es tan valioso como otros metales tales como el oro y la plata (Yu et al., 2016). Los productos del tratamiento deberán tener un segundo uso o retornarán como materias primas a los procesos productivos (Nnorom et al., 2011), considerando que los procesos *glass-to-glass*, ya no son una opción disponible (Gusukuma & Kahhat, 2018). La innovación en búsqueda de nuevos procesos debe ser fomentada para implementar procesos rentables, amigables con el ambiente y seguros en su operación (Herat, 2008; Qi et al., 2019). Para volver el proceso de reciclaje más rentable, la logística reversa deberá ser más eficiente para reducir

costos excesos de transporte, por lo que es recomendable que el material sea procesado localmente (Mueller et al., 2012). Además, el proceso seleccionado debe considerar la mitigación de sus impactos ambientales y la exposición a materiales peligrosos para la salud (Nnorom et al., 2011). En conclusión, es necesaria la búsqueda de un proceso que extraiga el plomo del vidrio de CRT para poder utilizarlo en otros usos de forma segura (*glass-to-lead*).

1.1.2. Enunciado del Problema

Considerándose que si no se hace nada por resolver esta situación ocurrirá un problema que afectará a la población desde el punto de vista económico, social y ambiental, la pregunta de investigación de esta tesis será postulada de la siguiente manera:

- *¿De qué manera se puede aprovechar los tubos de rayos catódicos al final de su vida útil en vez de ser dispuestos en un relleno sanitario de tipo industrial?*

Para responder a la pregunta general de investigación, las siguientes preguntas específicas son redactadas:

- *¿Cómo es la tenencia de electrodomésticos en los hogares peruanos?*
- *¿Cuál es la tendencia en las emisiones de gases de efecto invernadero como consecuencia del uso de electrodomésticos en los hogares peruanos?*
- *¿De qué forma los cambios en la tecnología afectan el inventario de televisores en el Perú, tanto de los usuarios residenciales como comerciales?*
- *¿Cómo son los flujos de televisores de tubos de rayos catódicos (CRT-TV), ¿en los procesos de importación, consumo y fin de vida en el Perú?*
- *¿Cuál sería el tratamiento más adecuado para reciclar los tubos de rayos catódicos (CRT)?*

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.3. DELIMITACIÓN DE LOS OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de esta tesis está definido de la siguiente manera:

- *Estudiar el comportamiento del RAEE como fuente de recursos al final de su ciclo de vida en vez de ser dispuestos en un relleno de seguridad industrial, utilizando como caso de estudio el reciclaje de tubos de rayos catódicos.*

1.3.2. Objetivos específicos

Para poder cumplir con el objetivo general de esta investigación, los siguientes objetivos específicos son redactados:

- *Analizar la tenencia de electrodomésticos en los hogares peruanos considerados en la Encuesta Nacional de Hogares.*
- *Estimar las emisiones de gases de efecto invernadero como consecuencia del uso los electrodomésticos presentes en los hogares considerados en la Encuesta Nacional de Hogares.*
- *Evaluar el impacto de los cambios tecnológicos sobre el inventario de televisores en el Perú.*
- *Examinar los flujos e inventarios de CRT-TV en el Perú, desde el año 1998 al 2017.*
- *Determinar si el uso de la técnica de pellets autorreductores sirve para la extracción del plomo del vidrio de CRT.*

1.4. IMPORTANCIA, ALCANCE, JUSTIFICACIÓN Y LIMITACIONES

1.4.1. Importancia del tema

Los RAEE son un tipo especial de residuos debido a que contienen materiales valiosos que pueden ser recuperados; pero que requieren procesos complejos para su recuperación además de contener ciertas sustancias peligrosas necesarias para su funcionamiento. Por esta razón están fuera de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (D.L. N° 1278, 2016) y tienen su propia normativa (Ley N°1672, 2013). De acuerdo con las proyecciones realizadas a escala global, el consumo de artefactos en los hogares irá en aumento (Statista, 2021b, 2021a), situación que será similar en el Perú, de acuerdo con lo mostrado en la figura 1, a pesar que existan factores tales como la convergencia de funciones o la miniaturización de componentes que resulten en equipos de una menor masa, pero con más y mejores prestaciones.

Los RAEE, además de ser un problema ambiental respecto a la generación de residuos sólidos, puede ser también una fuente de recursos no renovables, así como una fuente de generación de empleo calificado, en el cual, muchas operaciones de recuperación de materiales valiosos realizadas en el exterior se realicen en el país. En ese sentido, será necesario invertir en investigación y desarrollo para posteriormente, realizar procesos de transferencia tecnológica en los que se buscaría en la industria operadores interesados en estos procesos.

1.4.2. Justificación de la Investigación

La presente investigación tiene una justificación práctica pues busca solucionar un problema inminente a través de diversas metodologías y herramientas existentes tales como el análisis de flujo de materiales (AFM) y los pellets autorreductores (SRP). En ambos casos ambas han demostrado su eficacia en los usos que se les ha dado, por lo que esta investigación busca combinarlas para mostrar evidencia objetiva de lo que ocurriría si no se diseñan políticas idóneas para el tratamiento de los CRT-TV cuando ya no puedan recibir señal analógica y proponer un tratamiento para recuperar el plomo de los CRT y que el vidrio de CRT pueda ser utilizado como material inerte en otros usos sin que exista riesgo de contaminar el agua o el suelo.

Desde el punto de vista metodológico, esta investigación busca validar el método SLTA (Ship-Level Trade Analysis), propuesto por Kahhat y Williams (Kahhat & Williams, 2010, 2012), en el que se utilizan datos de agencias oficiales para resolver los inventarios y los flujos de un sistema de consumo, que utiliza como complemento el método propuesto por Lepawsky y Mc Nabb (Lepawsky & Mc Nabb, 2010) que utiliza factores de aproximación (*proxies*) para estimar inventarios y flujos respectivamente.

Finalmente, desde el punto de vista social y ambiental, esta investigación desea iniciar un cambio en el que los RAEE, a pesar de ser un serio problema ambiental, se conviertan también en una fuente de trabajo calificado en el Perú para la recuperación de materiales valiosos que están siendo procesados en otros países. La recuperación de metales preciosos a partir de RAEE requiere técnicas avanzadas

de extracción, en vez de las prácticas que realiza el sector informal, consistentes en solo la recuperación del material valioso y disponiendo los materiales con bajo valor económico, tales como el vidrio de los CRT, en un relleno sanitario municipal o vertedero (Kahhat & Williams, 2009b; Xu et al., 2012) Además, desde el punto de vista ambiental, esto se constituiría en una oportunidad para reducir la huella de carbono en el tratamiento de RAEE al ya no tener que ser transportados vía marítima hacia los lugares donde se encuentren las plantas de procesamiento.

1.4.3. Alcance de la Investigación

De acuerdo con Hernández Sampieri y colegas (2014), el alcance de la investigación indica aquello que se desea obtener a partir de la investigación, por lo que condiciona la metodología a seguir en la investigación.

La investigación tiene un carácter exploratorio pues escudriña el tema del incremento de los electrodomésticos en los hogares, tanto en cantidad como en masa, siendo de utilidad para tener una idea general del proceso de consumo de electrodomésticos considerados por la ENAHO. Los resultados relacionados con el alcance exploratorio servirán como insumo para los estudios de tipo descriptivo y correlacional que se realizarán en esta investigación.

Respecto al alcance descriptivo, la investigación identifica las variables por la que existe un aumento o una disminución del inventario de electrodomésticos en los hogares, así como en el caso de los CRT respecto a los consumidores residenciales y comerciales. De esta manera, el producto de esta etapa será útil para aquellas investigaciones de carácter correlacional.

Finalmente, el alcance correlacional de esta investigación implica identificar el grado de asociación entre las variables identificadas en las etapas exploratorias y descriptivas desde la perspectiva del consumo de electrodomésticos en el Perú.

1.4.4. Limitaciones de la Investigación

La siguiente investigación cuenta con las siguientes limitaciones: Para la determinación de los inventarios en los hogares solo se consideraron aquellos que la ENAHO tiene en sus cuestionarios. Por ejemplo, no se estimó el inventario de ollas

arroceras en el Perú. Por esta razón se debe considerar que los inventarios en los hogares sean mayores a los presentados. Para resolver esta situación, se utilizó el enfoque propuesto por Williams y colegas (Williams et al., 2012) para establecer un rango de valores en los que se pueda encontrar el valor en kilogramos de los inventarios, ya sea de electrodomésticos en términos generales o de CRT-TV de forma más específica.

En segundo lugar, si bien es cierto que se cuenta con bases de datos exhaustivas y completas (INEI, n.d.; SUNAT, n.d.), existen limitaciones respecto a la disponibilidad de datos: mientras que en el caso de los datos de importaciones SUNAT indica que cuenta con información desde el año 1993, el INEI tiene a disposición los microdatos de la ENAHO desde el año 2001.

En tercer lugar, no se cuenta con datos primarios para determinar los hábitos de consumo de electrodomésticos en el Perú. Por esta razón el AFM realizado utiliza fuentes de datos provenientes de agencias oficiales y que tendrá un carácter mecanicista en el que no se tendrá en cuenta las decisiones individuales de cada uno de los usuarios ante la disyuntiva de renovar o no los equipos que tenga en casa. El estudio estas decisiones está fuera del alcance de esta investigación. Más aún, para poder lidiar con la incertidumbre producto de estas decisiones individuales se utilizó el método de escenarios asociados propuesto por Williams y colegas (Williams et al., 2012)

CAPÍTULO II: EL MARCO TEÓRICO

2.1. METODOLOGÍAS DE REFERENCIA

2.1.1. El Análisis de Flujo de Materiales

El Análisis de Flujo de Materiales (Material Flow Analysis o AFM) es un método que estima flujos e inventarios de productos, sustancias o materiales en un contexto geográfico definido (Graedel & Allenby, 2009). Esta herramienta se ha usado para el análisis de diferentes sistemas sociotécnicos tales como la generación de residuos en el sector de electrónica de consumo (Kahhat & Williams, 2012; Miller et al., 2016; Steubing et al., 2010), el flujo de metales industriales (Graedel et al., 2015; Meylan et al., 2017; Nassar et al., 2015; Park et al., 2011) y la generación de residuos de la construcción y demolición (García-Torres et al., 2017; Huang et al., 2013; Kleemann et al., 2016). La figura 7 muestra un ejemplo ficticio de un AFM, con sus respectivos procesos (nodos) y flujos (líneas).

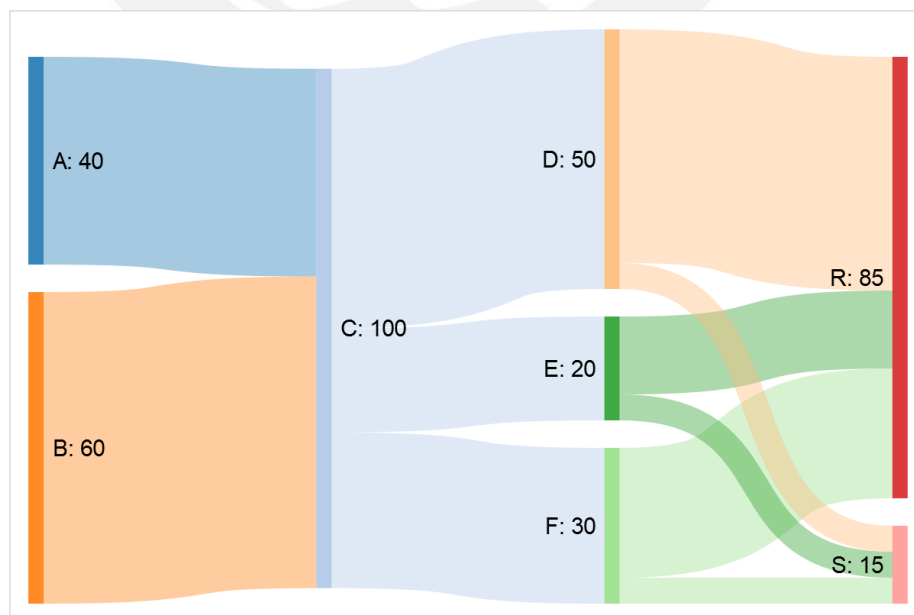


Figura 7: Ejemplo ficticio de AFM con 8 nodos y 11 flujos (elaborado con SankeyMatic)

El AFM es una herramienta poderosa para describir patrones de producción y consumo en los cuales la principal requisito es el cumplimiento de la ley de conservación de la materia en cada uno de los procesos estudiados dentro del sistema sociotécnico de producción o consumo (Fischer-Kowalski & Hüttler, 2008). No obstante, la principal limitación para aplicarla consiste en la carencia de datos necesarios para resolver dichos balances. Por lo tanto, para poder subsanar esta situación se utilizaron los siguientes enfoques, los cuáles son resumidos en la tabla 2:

Tabla 2: Enfoques para estimar datos durante la realización del AFM

Método y Fuente	Descripción
Shipment-Level Trade Analysis (SLTA) (Kahhat & Williams, 2009b, 2012)	Usa los datos de fuentes oficiales para obtener los flujos e inventarios en los procesos
Sales Obsolescence Method (SOM)(Miller et al., 2016)	Se obtienen distribuciones de probabilidad para estimar el tiempo de vida de los dispositivos como un método alternativo para desarrollar el AFM
Técnicas de optimización (Yoshida et al., 2009)	Se propone estimar los flujos del AFM utilizando procedimientos de optimización
Uso de la data de comercio exterior (Lepawsky & Mc Nabb, 2010)	Utilizar flujos como factores (<i>proxies</i>) para estimar indirectamente los flujos de material
Extrapolación de datos (Baldé et al., 2017)	Utilizado para la corrección manual o automática de valores anormales cuando la data no es confiable o en el caso que se debe extrapolar los datos existentes

Para los propósitos de esta tesis, el método STLA será utilizado para estimar los flujos e inventarios de materiales. En el caso de información faltante se utilizará el método de Lepawsky y Mc Nabb para estimar flujos faltantes de forma indirecta. El método de Baldé y colegas será de utilidad cuando exista necesidad de extrapolar los datos a través de regresiones no lineales bajo el supuesto que no existen cambios substanciales en los sistemas que invaliden las curvas obtenidas. Además, el enfoque de Miller de considerar el tiempo de vida de los electrodomésticos como una distribución de variable continua será usado en casos en los que el año de adquisición es relevante para realizar los cálculos del inventario dentro de los límites del sistema.

El AFM puede ser clasificado de acuerdo con el enfoque para la estimación de los flujos. Por ejemplo si es de tipo *bottom-up* que necesita que los procesos sean previamente definidos, mientras que si es de tipo *top-down* los estudios pueden ser realizados sin la necesidad de definir los procesos internos del sistema (Augiseau &

Barles, 2016) Los AFM también podrán ser clasificados de acuerdo con su alcance espacial, pudiendo ser un hogar, una unidad de producción, un sector económico, una región e incluso a escala planetaria así como por su alcance temporal, pudiendo ser estático en un periodo de tiempo determinado así como dinámico en sentido de observar el comportamiento cualquiera de las variables del sistema a ser estudiado (Fischer-Kowalski & Hüttler, 2008). Entonces, el enfoque utilizado para esta investigación consiste en definir los procesos de consumo, el alcance geográfico es a escala nacional y de carácter dinámico para evaluar el comportamiento de los flujos e inventarios de interés en función del tiempo. Las etapas para la realización de un AFM son mostradas en la figura 8:

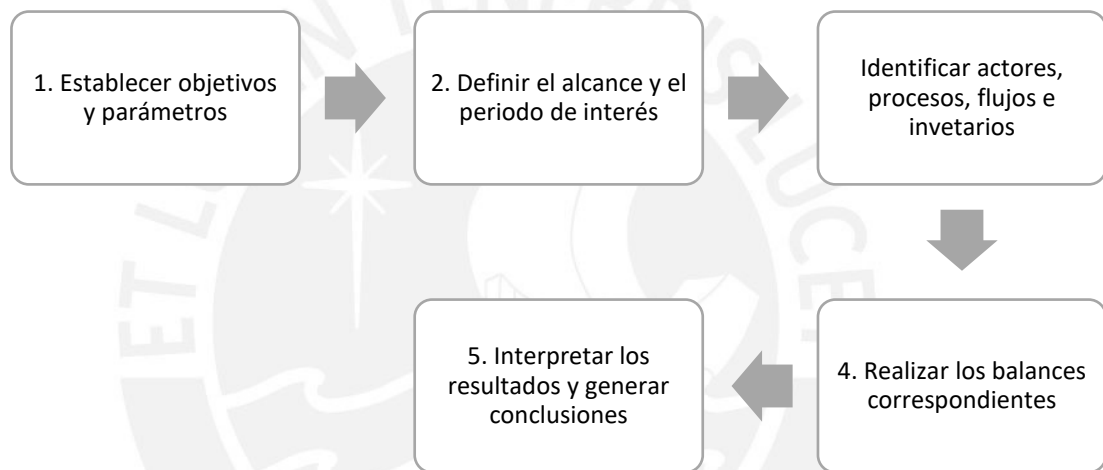
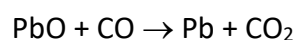


Figura 8: Etapas para la realización de un AFM (Adaptado de: ONUDI, 2008)

2.1.2. La Autorreducción y la Recuperación del Plomo

Las técnicas pirometalúrgicas son efectivas para remover el plomo de la matriz de vidrio, aunque muchas de estas están en su fase de laboratorio (Iniaghe & Adie, 2015; Qi et al., 2019). La reducción con carbón como agente reductor para obtener partículas metálicas a partir de sus óxidos. Este método es utilizado ampliamente en la industria química y metalúrgica (Qi et al., 2019), de acuerdo con la siguiente reacción:



Esta reacción química se caracteriza por ser realizada en fase heterogénea: el oxígeno es desplazado por el monóxido de carbono, el cual migra desde el interior

del material sólido provocando la reducción del óxido de plomo. El mecanismo consiste entonces en una reacción sólido-sólido que ocurre a través de intermediarios en estado gaseoso. La figura 9 muestra el diagrama de Ellingham para el sistema Pb/C en el que se muestra que la reacción es espontánea a partir de los 290 °C, aunque la generación de monóxido de carbono es favorable a partir de los 710 °C y se debe tener en consideración que la temperatura de fusión del óxido de plomo PbO es de 880 °C, mientras que la figura 10 muestra la relación entre la cantidad de CO y CO₂ presente a una atmósfera de acuerdo con la reacción de Boudouard.

Uno de los primeros intentos de reducir minerales de plomo utilizando carbón es el proceso KIVCET Smelting Process, conocido también como Oxygen Flash Cyclone Electro Thermal Process, desarrollado en Kazakhstan y cuya primera unidad comercial fue instalada en 1985. Este proceso fue diseñado para concentrados complejos con un alto contenido de zinc (Total Materia, 2015). La cinética de reacción fue estudiada por Kinaev y colegas, quienes determinaron que la fase limitante de la reducción de la escoria de plomo con el carbón sólido es la reacción propiamente dicha en la interfase gas/escoria (Kinaev, et al., 2005).

El proceso de reducción en fase líquida del vidrio de CRT fue estudiado por Okada y colegas (2012) estudiaron un proceso de reducción con fusión que utiliza carbón activado y carbonato de sodio como agentes reductor y fundente, realizada la reducción a una temperatura de 1200-1400°C por 60 minutos, obteniéndose una recuperación de plomo mayor a 90%. Posteriores mejoras a este proceso y las modificaciones más importantes se muestran en la tabla 3, la cual muestra como principal ventaja las altas tasas de recuperación y que su principal desventaja está en los parámetros de temperatura y tiempo para llevar a cabo la extracción del plomo, además de haber sido realizados a escala de laboratorio. Por otro lado, las técnicas convencionales consistían en fundir el vidrio para extraer el plomo de la parte superior de la fase fundida, extrayéndose solo el 50% del plomo del vidrio y produciendo vapores tóxicos (Korzenski et al., 2015). Además, Nulife, La única operación comercial para reciclar CRT existen en Estados Unidos cerró en 2017 debido a problemas legales con el almacenamiento de los CRT, considerados

productos peligrosos, pero también materia prima de su proceso (E-Scrap News, 2017; Recycling Today, 2017).

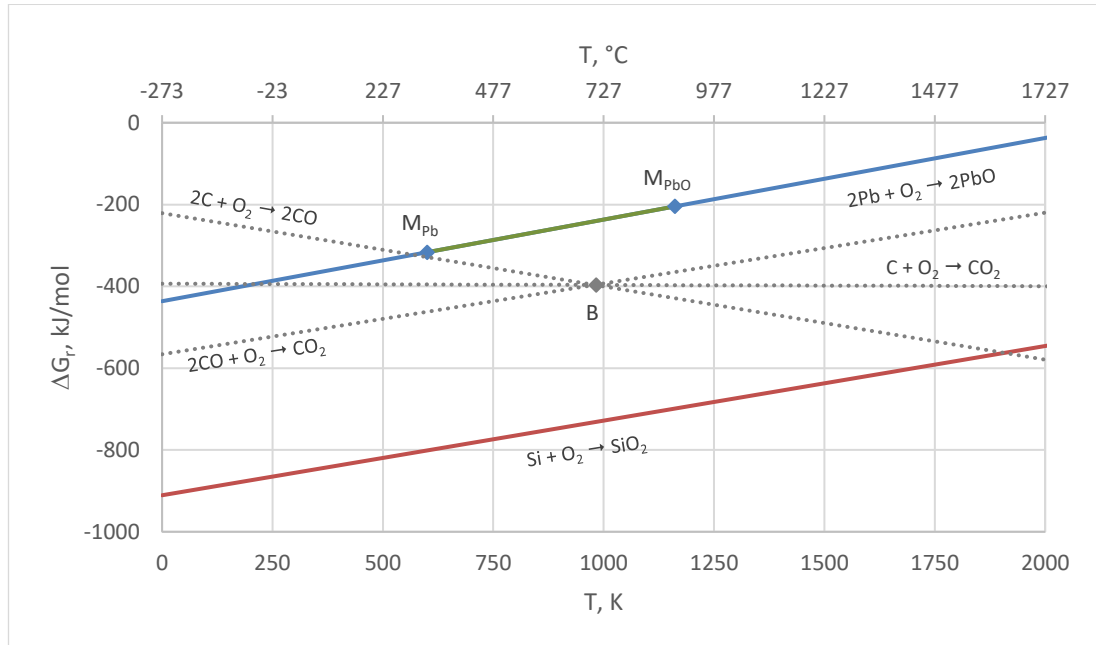


Figura 9: Diagrama de Ellingham para el sistema Pb/C (adaptado de DoITPoMS (2008), datos termodinámicos extraídos de: Jolkkonen (2000). La línea verde entre los puntos M_{Pb} y M_{PbO} limitan el rango de temperaturas en la que la reducción es posible.

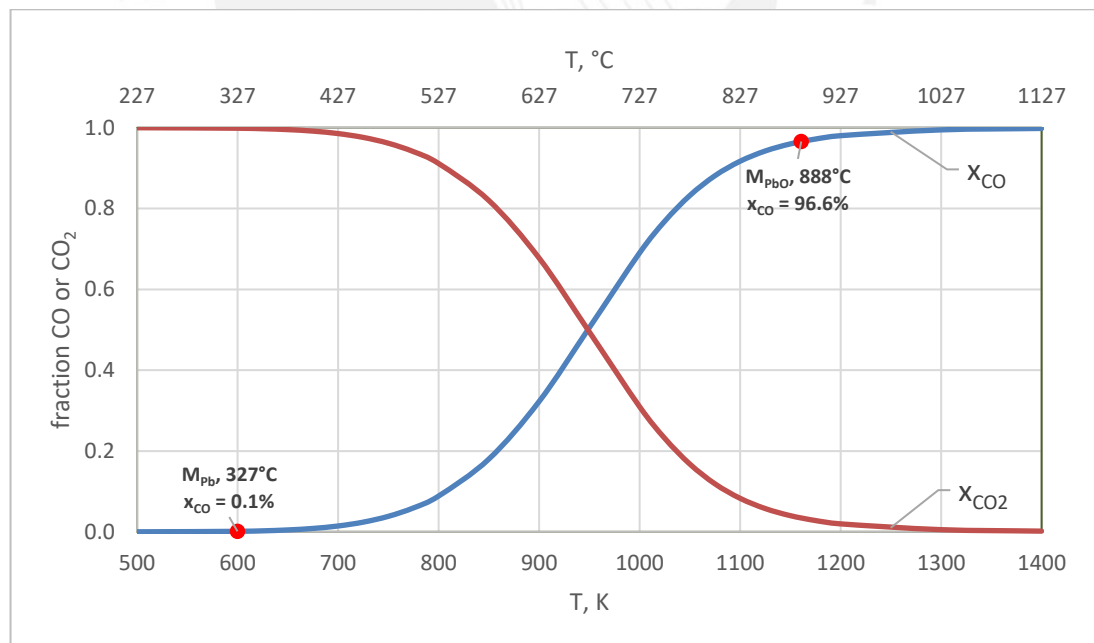


Figura 10: Condiciones de equilibrio de la reacción de Boudouard ($C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$) a 1 atm (adaptado de: Reed (2006), datos termodinámicos extraídos de: Jolkkonen (2000). Los puntos rojos representan los puntos de fusión de del plomo metálico (M_{Pb}) y el óxido de plomo (M_{PbO})

Tabla 3: Resumen de procesos pirometalúrgicos para la recuperación del plomo a partir del vidrio de CRT

Técnica	Remoción de Pb	Características importantes	Referencia
Reducción en fase líquida	92%	10 g de vidrio del embudo de CRT (FG), 0.5 g Na ₂ CO ₃ /g FG, 0.3 g C/g FG no mezclado con FG para crear CO/CO ₂ atmosphere, 1000°C, 60 min	(Okada & Yonezawa, 2013)
	92%	Mejora del trabajo previo al agregar un proceso para recuperar Na ₂ CO ₃ usado como flux	(Okada & Yonezawa, 2014)
	90.3%	No se especifica peso del FG, 0.2 g C/g FG, 950°C, 3 min, horno precalentado	(Lu et al., 2018)
	97.5%	C/Pb (molar) = 0.9, CaO/SiO ₂ = 0.8, 1200°C, 60 min FG/escoria = 0.3	(Lv, et al., 2016)
Otros agentes reductores	58%	Uso de polvo de hierro como agente reductor. 0.5 g Fe/g FG, 700°C, 30 min	(Lu, et al., 2013)
	93%	NaS como agente reductor, recuperación como PbS. 25% Na ₂ CO ₃ , 8% NaS, 1200°C, 120 min	(Hu & Hui, 2017)
Vacío y otras atmósferas	98.6%	Proceso para producción de esponja de vidrio. 5% C, 1000 Pa, 1000°C, 4h	(Chen et al., 2009)
	80%	NaCl, CaCl ₂ , HCl y PVC como agente clorinante, recuperación de Pb volatilizado, mejores resultados con CaCl ₂ 14.2 Cl/Pb, 1000°C, 1 h	(Grause et al., 2014)
	97%	CaCl ₂ como clorinador, % de recuperación como PbCl ₂ , NaCl/CaCl ₂ (molar) 1:1, 35% agente clorinante, 600 ± 50 Pa, 1000°C, 2 h	(Erzat & Zhang, 2014)
	92%	Proceso llevado a cabo en diferentes atmósferas (Normal, Ar, CO ₂ , vacío a 1.3 kPa). 0.05 g C/g FG, 1200°C, 8 h	(Veit, et al., 2015)

El mecanismo de la autorreducción es explicado debido a la gasificación interna del agente reductor y su difusión a través del material aglomerado, siendo esta la etapa limitante de la reacción (Mourão & Takano, 2003; B. Zhang & Xue, 2013). Este tipo de aglomerados puede ser procesados en hornos rotatorios (Gudenau, et al., 2005) y pueden estar conformados solo por los elementos activos de la reacción redox. Sin embargo, para mejorar el proceso previo de aglomeración, y evitar problemas de crepitación e hinchazón durante el proceso, es necesario el uso de agentes aglomerantes (Eisele & Kawatra, 2010; Mantovani & Takano, 2000).

Las principales ventajas de elegir el uso de la autorreducción en vez del utilizar la técnica de fusión en fase líquida se fundamenta en las siguientes razones: además de la dificultad de extraer el plomo mediante procesos hidrometalúrgicos (Qi et al.,

2019), es necesario encontrar un proceso en la que la obtención del plomo sea directa (i.e. pirometalurgia al bajas presiones), el uso de materiales accesibles (e.g. limaduras de hierro como agente reductor, CaCl_2 fuente de cloro o Argón como atmósfera inerte) y que no estén regulado su uso por las leyes peruanas por ley (i.e. carbonato de sodio). También debe reducir las temperaturas y tiempos de reacción para aumentar su rentabilidad. Respecto al proceso de reducción, para poder realizar la reacción en fase sólida, en vez de realizar la reacción en una sola masa se propone realizar la reacción en pellets, para aumentar la velocidad de reacción.

2.1.3. El Análisis de Ciclo de Vida bajo la Perspectiva Insumo-Producto (EEIOA)

Durante la producción de un bien o la prestación de un servicio, son requeridos ciertos flujos de materia y energía necesarios para que la sociedad satisfaga sus necesidades (Haberl et al., 2004), los cuáles deben ser analizados para mejorar el desempeño ambiental de estas dos actividades, ya sea para realizar análisis de comparación o identificar oportunidades de mejora (Augiseau & Barles, 2016). Por tanto, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta útil para determinar los impactos ambientales, tanto para un producto en particular o la función para la que haya sido diseñado (PNUMA, 1996). La figura 11 muestra de forma esquemática el ciclo de vida de un producto, desde la extracción de la materia prima hasta su fin de vida, pasando por sus respectivas etapas intermedias, unidas por las etapas de transporte (flechas rojas) y los flujos inversos para reusar o reciclar los materiales (flechas verdes).

El ACV puede ser realizado desde dos informes diferentes; pero complementarios: El enfoque de procesos requiere resolver todos los procesos delimitados por los objetivos del estudio. Si bien es cierto ofrecen buenos resultados, su principal limitación está en la exhaustividad para recolectar los datos necesarios para realizar los cálculos correspondientes (H.S. Matthews et al., 2015). La alternativa al ACV por procesos es el análisis insumo-producto extendido ambientalmente (*environmentally extended input-output analysis*, EEIOA), el cual se basa en la interrelación económica de los sectores productivos de un país. A pesar de sus limitaciones inherentes relacionados con el propio modelo en sí, tales como el año de referencia para la elaboración de la herramienta y la agregación de industrias

en sectores, se constituye en una herramienta que proporciona resultados aproximados de forma rápida, considerando toda la economía del país, usando como dato la unidades monetarias adicionales que debería producir una economía (Matthews et al., 2015).

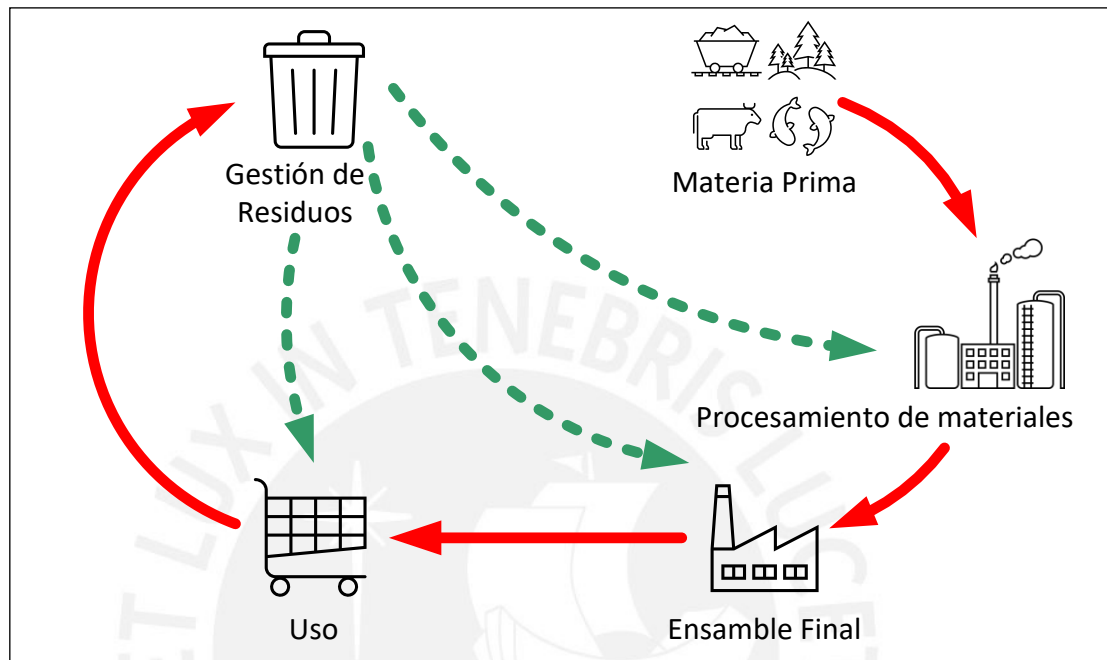


Figura 11: Ciclo de Vida
(adaptado de Matthews y otros, 2015)

El modelo Insumo-Producto (Input-Output) fue desarrollado por Wassily Leontief basado en el trabajo de François Quesnay (Ormazábal, 2003) y tiene por objetivo analizar a una economía a través de interacciones de sus sectores económicos (Nobel-Price, 2019). La tabla 4 muestra la matriz insumo-producto (MIP), la cual representa a la economía por medio de las relaciones entre la producción, la demanda intermedia y el consumo final (CEPAL, 2013). En esta matriz se indican los recursos que se necesitan para la producción de una unidad de producto por cada sector económico, pudiéndose rastrear hasta la extracción de la materia prima necesaria para producirlas.

El modelo matemático para determinar los impactos ambientales a partir del modelo de Leontief detalladamente por Matthews et al (2015) y se muestran los cálculos matriciales necesarios para determinar, en este caso, los impactos ambientales asociados a la producción adicional necesaria para satisfacer el incremento de la demanda final:

Sea la ecuación 1:

$$[I - A]^{-1}Y = X \dots (1)$$

En donde la matriz $[I - A]^{-1}$ es la Matriz inversa de Leontief, el vector columna Y , es aquel que contiene la demanda final por sector económico y el vector columna X , es el que contiene los requerimientos directos e indirectos.

Los impactos ambientales asociados con la producción económica adicional son calculados a través de la ecuación 2:

$$E = RX = R [I - A]^{-1}Y \dots (2)$$

En donde el vector columna E contiene los impactos ambientales por sector económico, la matriz diagonal R , en los que los impactos ambientales por unidad monetaria de producción son colocados en la diagonal principal para cada uno de los sectores económicos.

Tabla 4: Estructura de la Matriz Insumo Producto (Matthews et al., 2015)

Salida desde:	Entrada a:						Demanda Intermedia O	Demanda Final Y	Demanda Total X
	1	2	...	j	...	n			
1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1j}	...	X_{1n}	O_1	Y_1	X_1
2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2j}	...	X_{2n}	O_2	Y_2	X_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮	⋮
i	X_{i1}	X_{i2}	...	X_{ij}	...	X_{in}	O_i	Y_i	X_i
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	X_{n1}	X_{n2}	...	X_{nn}	...	X_{nn}	O_n	Y_n	X_n
Entrada intermedia, I	I_1	I_2	...	I_j	...	I_n	PBI		
Valor agregado, V	V_1	V_2	...	V_j	...	V_n			
Salida total, X	X_1	X_2	...	X_j	...	X_n			

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. La Sostenibilidad

La Sostenibilidad es un concepto inherente a la aparición de la sociedad, explicando en muchos casos el apogeo, y en muchos casos su ocaso, de diversas civilizaciones a lo largo de la historia (Goldstein, 2007). Desde la antigüedad, la

humanidad tenido la necesidad de entender su relación con el entorno que lo rodea, por lo que la espiritualidad, en las etapas incipientes de la civilización, cumplió este rol al celebrar y consagrar las relaciones entre la sociedad y los elementos bióticos y abióticos de los que depende para vivir en armonía con la naturaleza, convirtiéndose en uno de los principios fundamentales de la sostenibilidad (Mebratu, 1998). Sin embargo, la primera definición formal de desarrollo sostenible aparece en el informe de la Comisión Mundial del Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas titulado *Nuestro Futuro Común*, conocido además como el Informe Brundtland (WCED, 1987), la cual contiene dos conceptos clave: las necesidades de la sociedad a ser satisfechas, especialmente la de los más pobres, y las limitaciones impuesta por el sistema sociotécnico sobre el ambiente para lograr una sociedad más próspera.

A pesar que esta definición es genérica, convirtiéndose en una ventaja o desventaja, la definición de la Comisión Brundtland es importante pues establece el punto de partida para definir lo que es insostenible en el presente y preparar los cambios a ser realizados en el sistema sociotécnico para lograr que ésta sea más sostenible (Taylor, 2002). Además, la sostenibilidad debe ser un concepto dinámico que le permita adaptarse a la complejidad del planeta y mejorar su comprensión (Allenby et al., 2007) y nos indica la posibilidad de mantener en equilibrio los precursores para alcanzar un tipo desarrollo del cual se cuenta con poca información (Dourojeanni, 1999). En ese sentido, es importante la comprensión del término para la resolución de una diversidad de problemas relacionados con el impacto de las actividades económicas sobre el medio.

2.2.2. la Ecoinnovación

La innovación es definida como cambios que se deben dar en las organizaciones para mejorar sus resultados como consecuencia de la aplicación de conocimientos y tecnología, ya sean nuevos, existentes o una combinación de ambos, desarrollados interna o externamente para ser aplicados en productos, procesos, en la mercadotecnia o desde el punto de vista organizacional (OECD/Eurostat, 2018). No obstante, existen diversas definiciones respecto a la innovación, la mayoría de autores convergen que la innovación debe tener un impacto positivo en el mercado y debe ser un elemento clave para la competitividad (Anning-Dorson, 2018; Kuncoro

& Suriani, 2018; K. Lee & Yoo, 2019; Pulgarín-Molina & Guerrero, 2017; Urbancova, 2013). En ese sentido, éstas deberán desarrollar estrategias respecto a su interacción con su entorno y determinar si la innovación se constituye como una forma de responder a los factores ambientales o si es el ambiente una barrera para la innovación (OECD/Eurostat, 2018). La ecoinnovación es también definida como el desarrollo y la aplicación de modelos de negocio alineados con la estrategia de la organización que incorpora criterios de sostenibilidad tales como el concepto del ciclo de vida en conjunto de sus socios para la generación de valor para obtener bienes y servicios, mercado y estructuras organizacionales que resultan en un mejor rendimiento y a la competitividad de una empresa. (PNUMA, 2014)

Como tal, la ecoinnovación se puede dar en los procesos, no solamente limitados a los procesos de manufactura (producción más limpia, eficiencia energética, entre otros enfoques) sino también a los procesos organizacionales de las empresas tales como aprendizaje y capacitación. Respecto a su implementación en productos y servicios, éstas pueden estar relacionadas a conceptos tales como el ecodiseño, la dematerialización y la tecnología ambiental. Finalmente, la ecoinnovación en los sistemas no solo implica cambios en los sistemas tecnológicos sino a cualquier cambio que altere las condiciones del mercado. (Bleischwitz et al., 2009). Además, las actividades mencionadas anteriormente pueden analizarse en tres dimensiones: objetivos, que son los ámbitos en los que se debe central el análisis de elementos tales como: productos, procesos, formas de comercialización, organizaciones e instituciones; mecanismos, expresados como las formas en que se realizan los cambios en los objetivos: modificación, rediseño, alternativas y creación; e impactos tales como los efectos de la ecoinnovación en el ambiente (OECD Green Growth Studies, 2010)

De hecho, la búsqueda de la sostenibilidad contribuye con la competitividad de las empresas, obligándolas a cambiar su forma de pensar sobre los productos, tecnologías, procesos y modelos de negocio, siendo también la innovación un factor clave para el progreso de las empresas, en especial en periodos de crisis económica (Nidumolu et al., 2009).

2.2.3. La Relación entre la Innovación y la Sostenibilidad

La relación entre innovación y la sostenibilidad, debe ser en la actualidad el elemento central de la estrategia de sostenibilidad de las empresas en vez de tener una actitud reactiva basada en cambios menores en sus productos o procesos (Nadel, 2019), La relación entre innovación y sostenibilidad es de beneficio mutuo debido a que la sostenibilidad puede ser fuente de ideas para desarrollar nuevos productos, servicios o procesos orientados a estilos de vida más sostenibles con un impacto positivo en el mercado (Dearing, 2000), por lo que la sostenibilidad como la nueva frontera de la innovación (Nidumolu et al., 2009), El criterio de novedad, asociado a la competitividad de las empresas, es también importante al lograr de forma simultánea la aceptación de los productos con un desempeño superior al de su competencia, particularmente desde la perspectiva de enfoque de ciclo de vida de productos (Anderson et al., 2001; Schiederig et al., 2011). La fusión de ambos elementos se puede constituir en un elemento clave para el éxito empresarial a largo plazo (Maier et al., 2020). De esta manera, las organizaciones tendrían un único objetivo: encontrar soluciones novedosas que tengan un impacto positivo en el mercado, además de causar un menor impacto sobre el ambiente (Dearing, 2000; Yurdakul & Kazan, 2020).

Al ser las organizaciones sistemas sociotécnicos en los que factores externos pueden aumentar su propia complejidad (González & de Melo, 2004), el ambiente es uno de los que más puede influir en sus decisiones. La combinación de los principales aspectos de la innovación y la sostenibilidad en un único concepto definido como “innovación sostenible”, se constituye en un tema que ofrece nuevas direcciones de investigación en los campos de la sostenibilidad y la innovación (Maier et al., 2020). Por lo tanto, el cambio de los patrones de producción y consumo propone un modelo que considere que el crecimiento indefinido con recursos limitados es insostenible y causará consecuencias insospechadas y negativas sobre los ecosistemas y sobre las poblaciones (Schaper, 2017).

2.2.4. la creación de valor sostenible

La creación de valor sostenible es una estrategia de negocio útil para que las empresas crezcan alcancen un alto desempeño para afrontar los sus propios desafíos y así éstas obtengan una ventaja competitiva al diseñar productos, servicios y prácticas beneficiosas tanto para la empresa como para la comunidad. La generación sostenible de valor extiende las capacidades de los negocios deberían poseer tales como el entendimiento de las necesidades del consumidor, la inversión en Investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), la creación de mercados y de una red de grupos de interés (Accenture, 2012). Al darse cuenta de que la importancia de la sostenibilidad para la supervivencia y crecimiento de las empresas, éstas deben considerar que las prácticas sostenibles en los negocios mejorarán tanto la productividad y la confianza de los grupos de interés. A su vez, también han empezado a considerar a sus correspondientes grupos de interés, que incluye a consumidores así como a empleados, comunidades locales, proveedores, el estado entre otros (Bakshi & Fiksel, 2003).

La sostenibilidad contribuye a la construcción de valor para los accionistas en el largo plazo contribuyendo con una sociedad cada vez más sostenible. Para que una organización logre esta transformación hacia una sostenible es necesaria formular y ejecutar una estrategia sostenible para modificar la identidad de la compañía con el compromiso de la propia dirección de la empresa y el compromiso externo, para luego codificar la nueva identidad a través del compromiso de los empleados y los mecanismos de ejecución. Es importante resaltar que el inicio del segundo proceso retroalimenta al primero de forma positiva. En ese sentido, para mejorar el estado de la sostenibilidad de una empresa el trabajar con sus aspectos tanto organizacionales así como los operacionales y los de gestión (Eccles et al., 2012).

Para lograr que una empresa genere valor sostenible, la dirección deberá considerar los siguiente: En primer lugar, el reconocimiento de las oportunidades en problemas sociales ocultos y generar a partir de ellos nuevas fuentes de ventaja competitiva. Después, el señalamiento del rol óptimo a ser seguido para la solución de estos problemas. Luego, la capacidad de realizar cambios organizacionales dentro

para la implementación de las estrategias. Finalmente, el mantenimiento del impulso inicial mantener los programas de forma que se refuerce el valor generado para los diversos grupos de interés, internos como externos (Accenture, 2012).

Finalmente, es importante mencionar el modelo de generación sostenible de valor, desarrollado por Hart y Milstein (2003), que enlaza los desafíos sociales de la sostenibilidad con la creación de valor de forma directa. Este modelo muestra como los desafíos globales de la sostenibilidad desde el punto de vista de las empresas para la identificación de estrategias y prácticas que contribuyan de forma simultánea con un modelo de negocio más sostenible y la generación de valor para el accionista. Este enfoque de “ganar-ganar” sería entonces traducido como la generación de “valor sostenible”.

2.2.5. Factores clave y barreras para la ecoinnovación

La ecoinnovación en productos, procesos, organizaciones e inversiones en I+D en materia ambiental parecen estar impulsadas por factores comunes tales como la normativa, los factores de atracción del mercado, los sistemas de gestión ambiental y el ahorro de costos, así como estar positivamente asociadas al tamaño de la empresa (Hojnik & Ruzzier, 2016). En ese sentido, el éxito de implementar la ecoinnovación dependerá de los compromisos de los diversos actores del ecosistema de innovación: la concientización de las empresas mediante la difusión de casos de éxito, el diseño e implementación de políticas y la capacidad de los expertos para difundir sus beneficios financieros y ambientales (Szilagyi et al., 2018).

Implementar la ecoinnovación requiere identificar factores tales como los acuerdos mundiales, las condiciones del mercado, las tecnologías y la normativa tienen importantes implicaciones para el ambiente. No obstante, la inversión ecológica puede seguir considerándose una carga adicional para las empresas (Yurdakul & Kazan, 2020). Además, de acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2011), se identifican las siguientes barreras para su implementación exitosa: La primera está relacionada con las externalidades negativas asociadas a los daños ambientales. Si las empresas y los hogares no tuviesen que pagar por los daños ambientales que causan, existirán pocos incentivos

para invertir en innovación ecológica. En segundo lugar, existen fallos de mercado respecto a la innovación, en particular la dificultad de las empresas para apropiarse plenamente de los rendimientos de sus inversiones, lo que suele traducirse en una inversión insuficiente en innovación. En tercer lugar, el mercado de la innovación verde se ve afectado por barreras específicas, especialmente la prevalencia de diseños, tecnologías y sistemas dominantes en los mercados de la energía y el transporte. Esto puede crear barreras de entrada para las nuevas tecnologías y los competidores debido, por ejemplo, a los elevados costes fijos del desarrollo de nuevas infraestructuras.

2.2.6. Economía Circular, Minería Urbana y los RAEE

La economía circular implica un cambio significativo en los patrones de producción y consumo, de un esquema lineal basado en una dinámica de extraer, usar y disponer; a un enfoque en el cual los materiales extraídos de la naturaleza retornen a los procesos de producción y consumo (The Ellen MacArthur Foundation, 2013), considerándola tanto un concepto holístico como una herramienta operacional (de Jesus et al., 2019). A pesar de lo interesante del concepto, su aplicación es dificultosa. Se estima que la brecha de circularidad, es decir, la cantidad de recursos que se reciclan respecto a la cantidad de recursos extraídos, equivale al 11% (de Wit et al., 2018), por lo que su implementación requeriría, por ejemplo, que las empresas implementen este concepto en sus procesos de manufactura a través de la adquisición de competencias por parte de su personal técnico (Suarez Fernandez de Miranda et al., 2021).

La economía circular implica cambios radicales desde la perspectiva de los modelos de negocio y los marcos institucionales, mientras que desde el punto de vista tecnológico los cambios no son necesariamente radicales. En consecuencia, el modelo de negocio se constituye en un modelo clave para desarrollar una ruta hacia la economía circular a partir de la Ecoinnovación debido a que el modelo de negocio necesita añadir valor desde una perspectiva ambiental y social a la propuesta de valor cambiando las prácticas de productores y consumidores (Vence & Pereira, 2019).

La implementación de la economía circular a través de enfoques novedosos con un impacto en el mercado debe considerarse como la propuesta de solución a un problema complejo. De Jesús y colegas (2019) sugieren que la ecoinnovación sistémica, impulsada por políticas multidimensionales, es la clave para desbloquear una transición profunda. En particular, en los próximos 20 años el desarrollo de la economía circular es algo más que la resolución de un rompecabezas tecnológico y económico; dependerá de la capacidad de superar de forma creativa las compensaciones políticas reales y los desafíos sociales más amplios que necesitan incluir en su acción más consideraciones sociales y de comportamiento.

la minería urbana se define como aquellas actividades y tecnologías orientadas a la recuperación de materias primas y energía, con lo cual se establece un manejo sistemático de los stocks presentes en la tecnosfera desde el punto de vista de la protección ambiental, conservación de energía y del beneficio económico (Cossu et al., 2012). Además, es también uno de los pasos necesarios para el cambio del patrón del consumo lineal a uno circular, considerando que la economía ha estado creciendo en un modelo lineal de producción y consumo (Kasulaitis et al., 2015). Según Cossu y colegas (2012), la relación entre la economía circular y la minería urbana aparece ante la demanda creciente de materiales en el mundo, cambiando el foco de atención de la sola extracción de recursos naturales a la recuperación de éstos a partir de los residuos generados que desde un patrón de consumo lineal irían a una instalación de disposición final de residuos sólidos.

La minería urbana puede convertirse en una fuente de puestos de trabajo si es que es manejada de forma responsable. Es decir, que considere los peligros relacionados con el manejo de las sustancias tóxicas que forman parte de su composición (Lecler et al., 2015) así como el evitar el uso de prácticas que dañen a la salud y al ambiente para la recuperación de materiales valiosos (Kahhat & Williams, 2009b). Por lo tanto, la minería urbana no solo se enfocaría en la recuperación de materiales valiosos, sino también desde la perspectiva de la generación de fuentes de trabajo desde la perspectiva de “lo mejor de los dos mundos” (*Best-of-Two-Worlds (Bo2W)*), la cual intenta aprovechar el costo de la mano de obra de los países en desarrollo para dismantelar los RAEE (Lepawsky et al., 2017).

Los residuos de artefactos eléctricos y electrónicos (RAEE), ocupan un lugar relevante en sus actividades cotidianas y laborales. Esta categoría incluye todo tipo de equipamiento que opera con electricidad o campos electromagnéticos, por lo que se tiene desde equipos grandes tales como refrigeradoras y lavadoras hasta equipos portátiles relacionados con las tecnologías de la información y comunicación (TIC). Tal como se mencionó anteriormente, los RAEE son una fuente de materiales valiosos, pero también cuentan con materiales peligrosos que hacen necesaria la implementación de técnicas especiales para su recuperación. En el Perú, de acuerdo con la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, la gestión de RAEE está separada de la que se preocupa de la gestión de otros tipos de residuos sólidos (D.L. N° 1278, 2017; D.L. N°1501, 2020), para lo cual tiene su propio marco regulatorio en el que se indican las responsabilidades de todos los actores relacionados en el proceso de producción (importación), consumo y su respectivo fin de ciclo de vida (D.S. N°009-2019-MINAM, 2019)

2.2.7. El Reciclaje de Tubos de Rayos Catódicos (CRT)

Los receptores de televisión son un producto importante en la industria de electrónica de consumo, particularmente en la mayoría de los hogares en el mundo. El cambio más significativo ha sido el cambio de los voluminosos y pesados receptores de televisión que contenían un tubo de rayos catódicos (CRT) como elemento de visualización de las imágenes por equipos con pantallas más amplias y con un menor peso con pantallas de cristal líquido (LCD). Además, se han realizado investigaciones relacionadas con los impactos ambientales durante el ciclo de vida de los televisores, particularmente Cambio climático y agotamiento de recursos no renovables (Aoe et al., 2003; Bhakar et al., 2015), con su eficiencia energética durante su fase de uso (Harrison & Scholand, 2014; Teunissen et al., 2010) y la reducción de impactos ambientales en la fase de fabricación mediante el uso de materiales, tanto novedosos como reciclados (Köhler, 2013).

Existen diversos problemas relacionados con el reciclaje de televisores de CRT: Existe un problema técnico y económico, ya que al extraer los elementos valiosos tales como metales y plásticos, estaría quedando el vidrio del CRT, el cual no es tan rentable como los materiales mencionados anteriormente (Xu, et al., 2012),

por lo que la alternativa más accesible desde el punto de vista económico es disponerlas en un relleno sanitario (Singh, et al., 2016) considerando que el reciclaje de los CRT (procesos *glass-to-glass*) ya no es un negocio rentable debido a que los CRT han sido desplazados del mercado (Mars & Nafe, 2016). Existen otras opciones para utilizar el vidrio de, en los que se busca utilizarlos en otros productos alternativos tales como mayólicas, agregado de construcción, entre otros (Andreola, et al., 2008; Mostaghel & Samuelson, 2010; Xie, et al., 2012; Ling & Poon, 2014; Meng, et al., 2016; Yu, et al., 2016); pero siempre quedará responder al problema de la posible toxicidad del plomo.

2.2.8. El Apagón Analógico

Las importaciones de receptores de televisión no solo han tenido una tendencia creciente, pasando de importarse 265 mil unidades en el año 1998 a importarse más de 1 millón y medio de artefactos a partir del año 2016 (SUNAT, n.d.), observándose también un cambio significativo en el tipo de televisor importados, en los que los televisores de pantalla de rayos catódicos (CRT) han sido reemplazados en la actualidad por pantallas de cristal líquido retroiluminadas con diodos emisores de luz (LED). Este proceso de evolución tecnológica en la tecnología de proyección de imágenes ha venido en paralelo con el cambio del estándar de transmisión NTSC (National Television System Committee) al estándar nipo-brasileño ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial) (R.S. N°019-2009-MTC). Aunque quizás no haya sido el cambio tecnológico más importante que ha atravesado durante la historia de la televisión, es un elemento importante de la “tormenta perfecta en la tecnología del entretenimiento” (Ng, 2012).

La Televisión Digital Terrestre proporcionará beneficios a los usuarios. Por ejemplo, se utilizará de forma más eficiente el espectro electromagnético al transmitir una señal digital, lo cual redundará en una mejor resolución en las imágenes transmitidas y una mayor disponibilidad de canales de señal abierta (Rojas, 2016). Además de la posibilidad de ofrecer servicios gratuitos basados en la televisión digital terrestre (DigiTAG, 2008), de recibir video en equipos móviles y la implementación de la interactividad pasiva o activa (Mayorga, 2011). El Apagón Analógico, en ese sentido, es el proceso de transición entre la señal de transmisión

analógica a una digital. Como todo proceso, este cambio no puede ser abrupto, sino requiere de una serie de acciones entre el estado, los radiodifusores, el mercado y los consumidores para lograr los mejores resultados sin perjudicar a ningún de los actores involucrados. La implementación de la TDT está regido por el Plan Maestro para la Implementación de la Televisión Digital en el Perú (2010) y sus respectivas modificaciones (2014; 2017) en el que se especifica su implementación progresiva indicando en su última modificación que el apagón analógico se dará a finales del año 2027. No obstante, no hace precisiones acerca de los televisores que quedarán obsoletos al no poder recibir señal alguna y que requerirán ser reciclados o dispuestos de manera segura.

A pesar de las ventajas de reemplazar los televisores CRT por pantallas de cristal líquido, también es necesario considerar su etapa de fin de ciclo de vida, especialmente cuando el reemplazo por cambio tecnológico es promovido por las regulaciones nacionales. En el caso en los Estados Unidos la implementación de la TDT (Public Law 109–171, 2005) y su posterior retraso (Public Law 111–4, 2009), provocó que en el 2013 alrededor de 232 millones de receptores y monitores CRT estuvieran almacenados en los hogares y los negocios en los Estados Unidos esperando a ser reciclados o exportados (Shaw Environmental, 2013), siendo este hecho atribuido parcialmente como consecuencia del apagón analógico. Por otro lado, se ofrecieron subsidios a los consumidores para comprar decodificadores para prolongar la vida útil de los CRT TV con el fin de evitar perjudicar económicamente a la población con bajos recursos que no podía cambiar su televisor (PC Magazine, 2008; Public Law 109–171, 2005)

En el caso de México, el primer país latinoamericano en completar el apagón analógico, aparecieron muchas dificultades en la etapa de fin de vida útil de los CRT TV tales como: el adelantamiento de la fecha del apagón analógico, del año 2021 al 2015 (Forbes México, 2014), la ausencia de una legislación específica para los residuos de artefactos eléctricos y electrónicos (RAEE) para definir la responsabilidad de los grupos de interés involucrados, así como deficiencias en la cadena de suministros inversa para los artefactos electrónicos (González, 2005), la exclusión del uso de decodificadores para prolongar el tiempo de vida útil de los CRT TV, la falta de

un plan exhaustivo para su fin de vida de y que 8.3 millones de televisores fueron donados por la Secretaría de Desarrollo Social del Gobierno Federal (SEDESOL) (René, n.d.). En resumen, los problemas durante el apagón analógico fueron causados por inconsistencias en las políticas, en particular las políticas de información hacia la ciudadanía (Jaramillo, 2015).



CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TAXONOMÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La taxonomía de la investigación implica describir las características que poseen una investigación. La tabla 5 muestra describir la taxonomía de las investigaciones realizadas que sirven como insumo para esta tesis:

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN: EL ESTUDIO DE CASO

El caso de estudio es un método en el que se estudia a profundidad una unidad responder al problema de investigación, examinar hipótesis y generar teorías de forma que se comprenda al objeto de estudio así como la relación con el entorno que lo rodea (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018). Las ventajas de estudio de caso, respecto a los experimentos y las encuestas, son las siguientes: a) Son fuentes de innovación teórica, en vez de enfocarse en el control del alcance empírico de los nuevos conceptos teóricos. b) Tienen una afinidad hacia los alcances descriptivos e interpretativos sin dejar de lado el alcance correlacional. c). Tienen una ventaja comparativa en términos de la profundidad de análisis sobre el objeto de estudio, y d) Tienen ventajas respecto a la validez del constructo pues utilizan más indicadores para representar un concepto teórico y asegurar la validez interna de las relaciones causales y las interpretaciones teóricas de los caso (Given, 2008).

De Acuerdo con Flyvberg (2011), el diseño de una investigación basada en un estudio de caso implica recolectar datos relacionados con las preguntas de investigación a ser resueltas y definir los siguientes componentes de la investigación: a) Enfocarse en un sistema y sus correspondientes límites, pudiendo ser analizadas por métodos cualitativos como cuantitativos. b) La exhaustividad en el estudio del sistema seleccionado, en términos de detalle, riqueza, complejidad y varianza, y c)

Enfatizar los “factores desarrollo”, lo que implica que el sistema pueda cambiar en el tiempo en términos de una sucesión de situaciones concretas e interrelacionadas entre sí.

3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente tesis utiliza los resultados de dos artículos de investigación, un artículo en progreso. La metodología general utilizada se muestra en la figura 12 consistió en las siguientes etapas (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018): En primer lugar debe realizarse un análisis exploratorio: por ejemplo, realizar una descripción inicial del caso, sus antecedentes y contexto. En segundo lugar, realizar la formulación del problema: determinar el objetivo, las preguntas de investigación, y justificación de la selección. A continuación, se determinará cuál es la información necesaria para preparar el estudio de caso, los tipos de datos y los métodos para su obtención. Las etapas siguientes estarán relacionadas con la obtención de datos y, de ser necesario, la obtención de datos adicionales y su correspondiente análisis. La penúltima etapa estará relacionada con el desarrollo de alternativas o cursos de acción si se han incluido dentro de los objetivos de investigación. Finalmente se procederá a la redacción del informe final.

Es importante mencionar que para más información acerca de las metodologías a seguir se consulten los anexos correspondientes a las publicaciones, salvo por lo relacionado con la recuperación de plomo del vidrio de CRT al estar pendiente de publicación. La tabla 5 sintetiza la taxonomía de la investigación de los tres casos de estudio, mientras que la tabla 6 indica los elementos más importantes de los tres casos.

Tabla 5: Taxonomía de la Investigación

Categoría	Producto 1: Inventario de Electrodomésticos en los hogares	Producto 2: Flujos e Inventarios de CRT-TV en los consumidores	Producto 3: Reciclaje del cono del CRT-TV mediante pellets autorreductores
Finalidad	Investigación aplicada: busca estudiar un problema de naturaleza práctica, que es la estimación del inventario de electrodomésticos en hogares	Investigación aplicada: busca estudiar un problema de naturaleza práctica, que es la estimación de flujo e inventario de CRT-TV en el país	Investigación aplicada: busca alternativas para separar el plomo del vidrio de los CRT en un proceso que sea económico, seguro con un menor impacto ambiental
Alcance temporal	Longitudinal: Se estudia el periodo 2001-2019	Longitudinal: Se estudia el periodo 2005-2016	Transversal: los estudios no dependen del periodo de análisis
Alcance de la investigación	Exploratoria: se examina la evolución del inventario de electrodomésticos en el Perú ha sido poco estudiada salvo en la Encuesta Nacional de Hogares (ENAH) y su impacto en el consumo de electricidad Descriptiva: identifica las variables que provocan los cambios en el inventario de electrodomésticos en el Perú Correlacional: identifica la relación entre las variables independientes identificadas (porcentaje de penetración, masa unitaria de los electrodomésticos, cambios tecnológicos) sobre el inventario de electrodomésticos	Exploratoria: se examina la evolución del inventario de CRT-TV en los procesos de producción (importación) y consumo en el Perú Descriptiva: identifica las variables que provocan los cambios en el inventario de CRT-TV en el Perú Correlacional: identifica la relación entre las variables independientes identificadas (peso de los televisores, cambio en la tecnología de las pantallas) sobre el inventario de CRT-TV	Exploratoria: se examinan la aplicación de la autorreducción conformando los reactantes en pellets, técnica utilizada para recuperar hierro de los altos hornos en un vidrio que contiene plomo Descriptiva: Identifica las variables que modifican los rendimientos del proceso de recuperación de plomo Correlacional: identifica la relación entre las variables independientes que afectan el rendimiento (tiempo, temperatura, cantidad de fundente) sobre el rendimiento de la separación del plomo del vidrio de CRT
Carácter de la medida	Cuantitativo: se usa datos numéricos procesados mediante el Análisis de Flujo de Materiales (AFM) y el Análisis insumo-producto extendido ambientalmente (EEIOA). Cuando fue posible, utiliza análisis de regresión basado en las matemáticas del crecimiento	Cuantitativo: Utiliza el Análisis de Flujo de Materiales (AFM). Cuando fue posible, utiliza análisis de regresión basado en las matemáticas del crecimiento	Cuantitativo: Los datos numéricos son analizados para determinar el comportamiento respecto al tiempo de la autorreducción del plomo utilizando la autorreducción

Categoría	Producto 1: Inventario de Electrodomésticos en los hogares	Producto 2: Flujos e Inventarios de CRT-TV en los consumidores	Producto 3: Reciclaje del cono del CRT-TV mediante pellets autorreductores
Marco en el que se da lugar	De campo: se utiliza fuentes secundarias recopiladas a escala nacional	De campo: se utiliza fuentes secundarias recopiladas a escala nacional	De laboratorio: las pruebas de autorreducción se realizaron en el laboratorio de pirometalurgia de Ingeniería de Minas
Concepción del fenómeno	Nomotética: Busca explicaciones generales respecto al consumo de electrodomésticos en el Perú	Nomotética: Busca explicaciones generales respecto a la evolución de los flujos e inventarios CRT-TV en el Perú	Nomotética: busca establecer las condiciones que maximicen el rendimiento de la reacción de autorreducción
Dimensión temporal	Histórica: utiliza los datos históricos obtenidos de fuentes oficiales	Histórica: utiliza los datos históricos obtenidos de fuentes oficiales	Experimental: se introducen cambios en el proceso de autorreducción para observar su comportamiento
Orientación	Orientada a la comprobación: intenta predecirse las tendencias en el consumo de electrodomésticos y la energía consumida durante su fase de uso, considerando que no haya cambios significativos en el proceso de producción y consumo	Orientada al descubrimiento: intenta determinarse lo que ocurriría con los CRT-TV que quedarán inoperativos al final de apagón analógico, como insumo para determinar la cantidad de plomo a ser recuperada	Orientada a la comprobación: desea demostrarse que la autorreducción del plomo en el vidrio de CRT es posible en una atmósfera reductora, considerando que desde el punto de vista teórico es posible

(adaptado de: Barrantes, 2008)

Tabla 6: Elementos de los Respectivos Casos de Estudio

Categoría	Producto 1: Inventario de Electrodomésticos en los hogares	Producto 2: Flujos e Inventarios de CRT-TV en los consumidores	Producto 3: Reciclaje del cono del CRT-TV mediante pellets autorreductores
Descripción del caso	El consumo de electrodomésticos en los hogares y su consumo de electricidad durante su fase de uso en el Perú	La evolución del inventario de CRT-TV debido al desarrollo tecnológico en el Perú	La autorreducción del plomo del vidrio de CRT usando carbón como agente reductor y óxido de calcio como agente fundente
Formulación del problema	¿De qué forma se puede estimar el inventario de electrodomésticos en los	¿Cuál es la tendencia en el inventario de CRT-TV en los consumidores en el Perú	¿Cuál será el tratamiento más adecuado para remover el plomo del vidrio de CRT?

Categoría	Producto 1: Inventario de Electrodomésticos en los hogares	Producto 2: Flujos e Inventarios de CRT-TV en los consumidores	Producto 3: Reciclaje del cono del CRT-TV mediante pellets autorreductores
	hogares en el Perú, así como su consumo eléctrico?	hasta el año en que termine el Apagón Analógico?	
Datos necesarios	Datos principales: INEI: datos de los hogares SUNAT: importaciones (cantidades y masas unitarias) INEI: Consumo de energía eléctrica de los hogares Otras fuentes de información Instituto Quanto y MINEM: porcentaje de consumo eléctrico por iluminación	Datos principales: INEI: datos de los hogares SUNAT: importaciones (cantidades y masas unitarias) Otros datos: MINCETUR: Número de camas de hotel INEI: Composición de la Población Económicamente Activa (PEA), por sectores económicos INEI: Número de licencias para restaurantes	Datos principales: Diagrama de Ellingham: determinación de la espontaneidad del sistema ideal consistente en óxido de silicio y óxido de plomo Reacción de Boudoir: Relación CO/CO ₂ en función de la temperatura
Alternativas o cursos de acción	Uso de regresiones no lineales con modelos de matemáticas de crecimiento para identificar tendencias si es que ningún factor cambiase de forma significativa Se establecen dos escenarios para lidiar con la incertidumbre, inspirado en el modelo propuesto por Williams et al. (2012)	Uso de regresiones no lineales con modelos de matemáticas de crecimiento para identificar tendencias si es que ningún factor cambiase de forma significativa Se establecen dos escenarios para lidiar con la incertidumbre, inspirado en el modelo propuesto por Williams et al. (2012)	Se modifican, de forma individual, la cantidad de agente fundente (CaO), y el tiempo de reacción

(adaptado de: Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018)

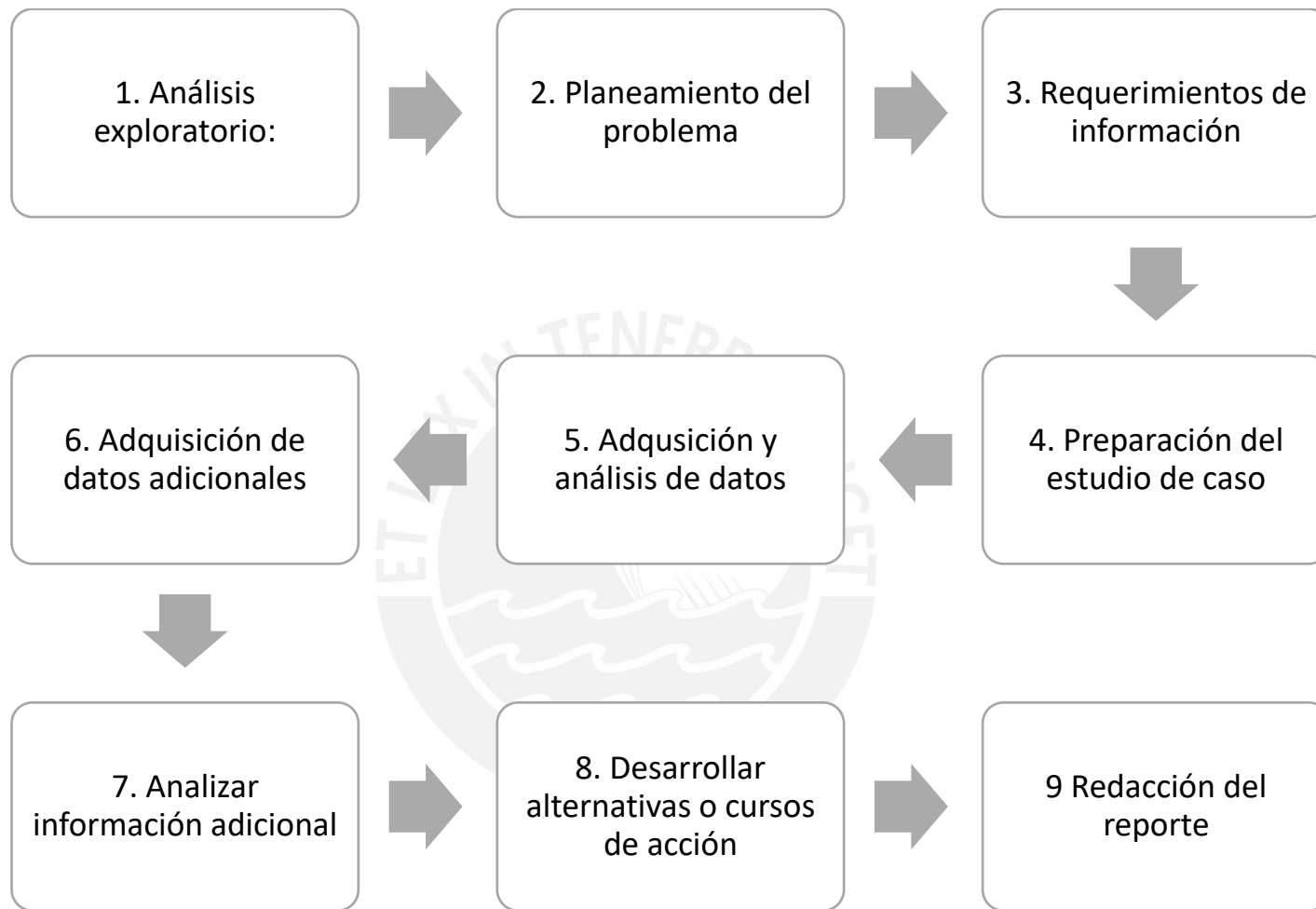


Figura 12: Metodología general de la investigación

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se muestran los resultados relacionados con los objetivos específicos realizados para esta investigación: en primer lugar, se explicará el comportamiento de los hogares peruanos respecto a la tenencia de electrodomésticos. En segundo lugar, se discutirá las estimaciones del consumo de energía eléctrica en los hogares. En tercer lugar, considerándose como objeto de estudio los televisores, se interpretarán los resultados del cambio tecnológico. Posteriormente, se interpretarán los flujos e inventarios de los CRT-TV. Finalmente, se realizará una revisión de los avances realizados en la búsqueda e implementación de un método adecuado para la remoción del plomo del vidrio de CRT.

4.1. LA TENENCIA DE ELECTRODOMÉSTICOS EN LOS HOGARES PERUANOS

De acuerdo con la Encuesta Nacional de Hogares (ENAH), la tenencia de electrodomésticos es un indicativo de la riqueza en los hogares, para lo cual ha establecido el módulo 18 Equipamiento del Hogar (INEI, n.d.). No obstante, es evidente la ausencia de algunos electrodomésticos tales como ollas arroceras y consolas de videojuegos, los artefactos incluidos son una muestra representativa de lo que se puede encontrar en un hogar peruano. Por ejemplo, en el año 2007 se agregó a esta lista los hornos microondas, tal como se muestra en la figura 17. La tabla 1 ubicada en el capítulo 1 describe los electrodomésticos incluidos en esta investigación.

4.1.1. Las importaciones de electrodomésticos en el Perú (2001-2019)

Una vez conocidos los electrodomésticos incluidos en la ENAH, se realiza la búsqueda de las importaciones de éstos desde el año 2001 hasta el año 2019 en la base de datos de importaciones de la autoridad aduanera peruana (SUNAT, n.d.). Se

observa que las importaciones de electrodomésticos han aumentado de aproximadamente 2.36 millones de unidades, equivalentes a 23.3 mil toneladas en el año 2001 a 3.94 millones y 69.9 mil toneladas respectivamente en el año 2019, tal como se muestra en la figura 13.

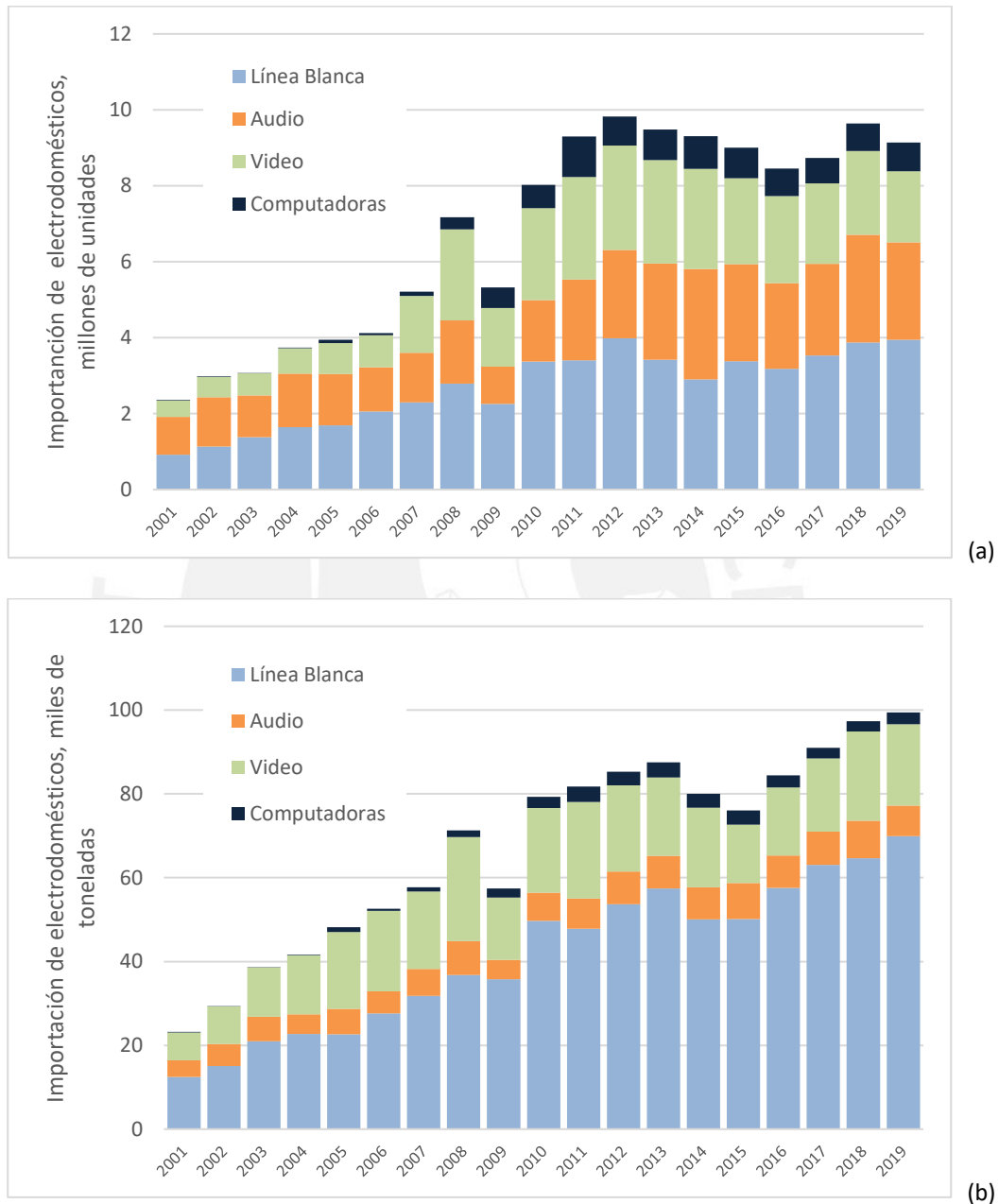


Figura 13: Importaciones de electrodomésticos en el Perú (2001-2019)
 (a), en millones de unidades, (b), en miles de toneladas
 Adaptado de (Gusukuma, Kahhat & Cáceres, 2022)

Cuando se analizan las importaciones en masa respecto a la cantidad total importada, se observa que existe una relación lineal ($R^2 = 0.9265$). No obstante, se puede identificar dos grupos: mientras que en el periodo anterior al periodo 2008-

2009 tanto las importaciones en masa y en unidades tenían una tendencia positiva, después de este periodo la cantidad de electrodomésticos ha estado fluctuando entre los 8 a 10 millones, la cantidad de importaciones en masa han continuado creciendo, como se ve en la figura 14.

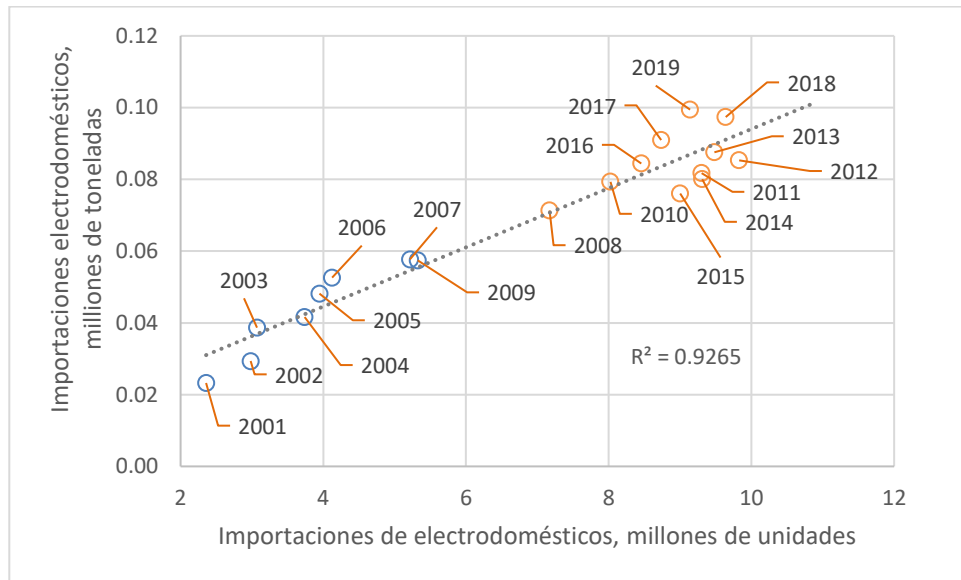


Figura 14: Importaciones de electrodomésticos: masa vs unidades
Adaptado de (Gusukuma; Kahhat & Cáceres, 2022)

4.1.2. El inventario de electrodomésticos en el Perú (2001-2019)

De la misma forma que las importaciones aumentaron, el inventario de electrodomésticos en masa también se ha ido incrementando. Además, para lidiar con la incertidumbre, se proponen dos métodos de cálculo que actuarían como límites inspirado en el trabajo de Williams et al. (2012) con lo que se estarían planteando dos métodos de cálculo: el Método 1 consiste en el cálculo del inventario en toneladas considerando la cantidad que se poseen en los hogares. El método 2 consiste en una simulación de Montecarlo que toma en consideración las distribuciones la masa de los electrodomésticos por año de importación, el número de éstos que poseen los hogares y el año de adquisición del más nuevo. La descripción detallada de ambos métodos se encuentra en Gusukuma et al. (2021). Los resultados indican que la que en un hogar en el año 2019 existiría entre 86 a 121 kg, lo cual indica un aumento de entre el 70 al 95% respecto al año 2001, tal como se observa en la figura 15. La tabla 8 resume los resultados de ambos métodos para la estimación de los electrodomésticos en masa.

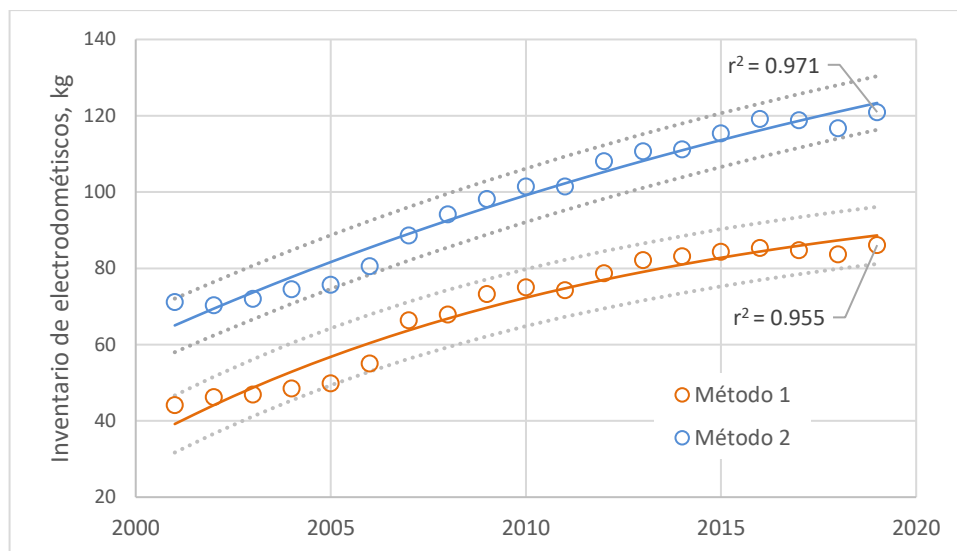


Figura 15: Posesión de electrodomésticos en los hogares (2001 al 2019)
 Las líneas grises punteadas muestran el intervalo de confianza de regresión con $\alpha = 5\%$
 Adaptado de (Gusukuma et al., 2022)

Tabla 7: Resultados de los inventarios en los hogares (2001-2019)

Método of estimación	Año	Inventario kg/hogar	Inventario total, t
Método 1:	2001	44	275 200
	2019	86	805 949
Método 2:	2001	71	444 073
	2019	121	1 133 951

Adaptado de: (Gusukuma et al., 2022)

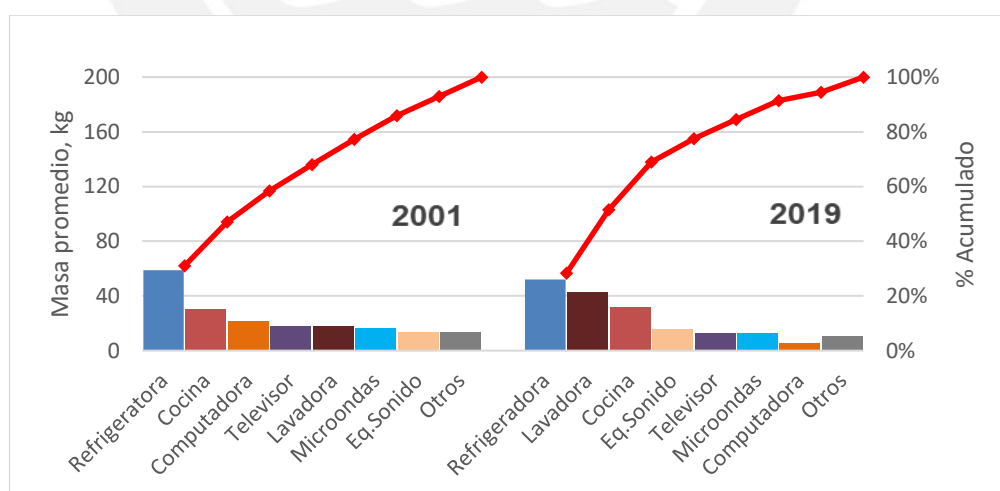


Figura 16: Evolución de la masa promedio de electrodomésticos en los hogares
 Adaptado de (Gusukuma et al., 2022)

La figura 16 muestra la evolución en masa del inventario de electrodomésticos utilizando el método 1, observándose que el refrigerador es el

electrodoméstico más pesado en los hogares (aproximadamente el 25 %) y que el electrodoméstico que mayor aumento de masa fueron las lavadoras.

4.1.3. Factores de crecimiento del inventario de electrodomésticos en el Perú

Los resultados de la figura 15 y la tabla 8 muestran un incremento del stock de electrodomésticos en masa, por lo que es de interés realizar un análisis longitudinal de la posesión de electrodomésticos la figura 17 muestra el aumento de la posesión de electrodomésticos en los hogares incluidos en la ENAHO, en donde se observa que en la mayoría de los casos la tendencia es creciente salvo para algunos electrodomésticos desplazados por avance de la tecnología, tales como las radios y los DVV. La figura 18 muestra los cuatro tipos de comportamientos respecto a la masa unitaria de los anteriormente ya mencionados: el aumento de la masa promedio en los electrodomésticos tales como lavadoras, su mantenimiento como en el caso de las cocinas a gas, la disminución como en el caso de las computadoras y finalmente el caso de los televisores a color que es motivo de estudio en la otra investigación utilizada como insumo para esta tesis (Gusukuma & Kahhat, 2018).

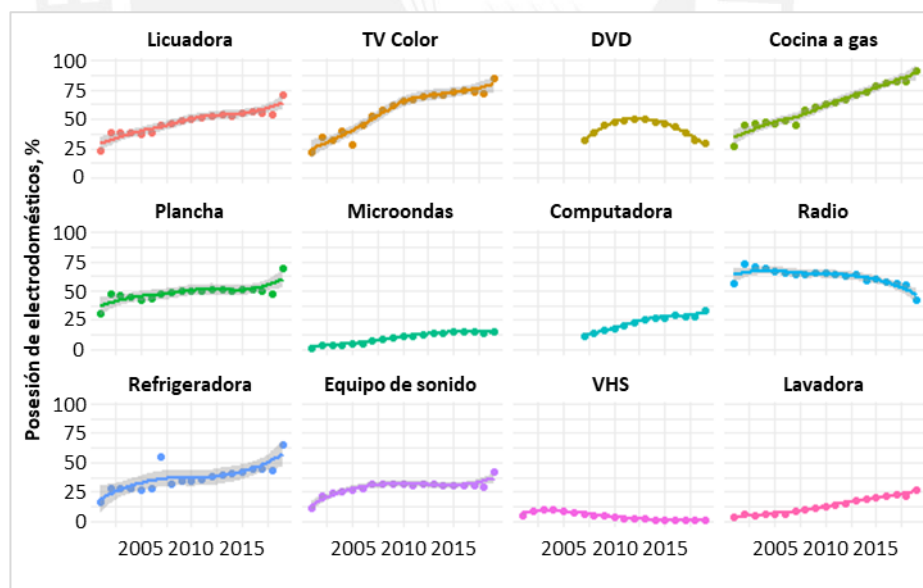


Figura 17: Porcentaje de posesión de electrodomésticos en los hogares (2001 al 2019)
Adaptado de (Gusukuma, Kahhat & Cáceres, 2022)

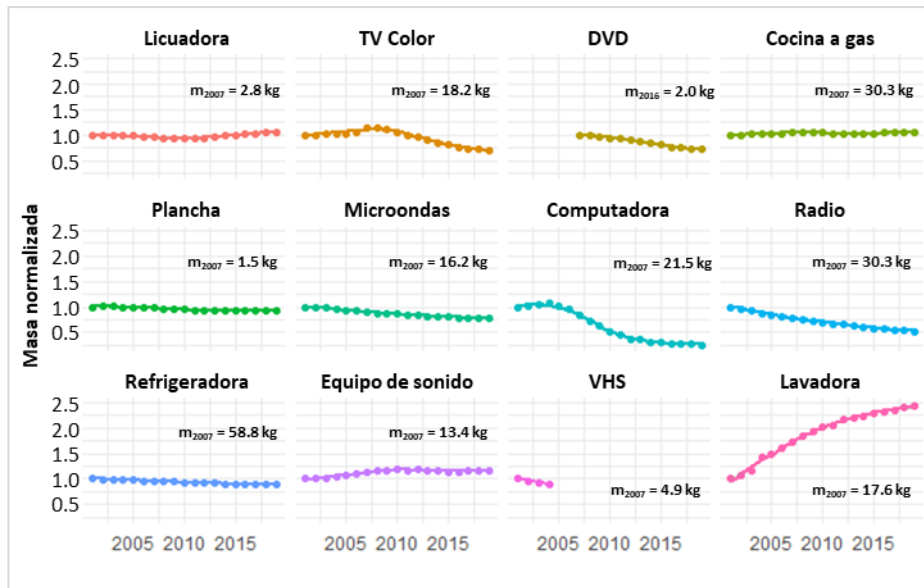
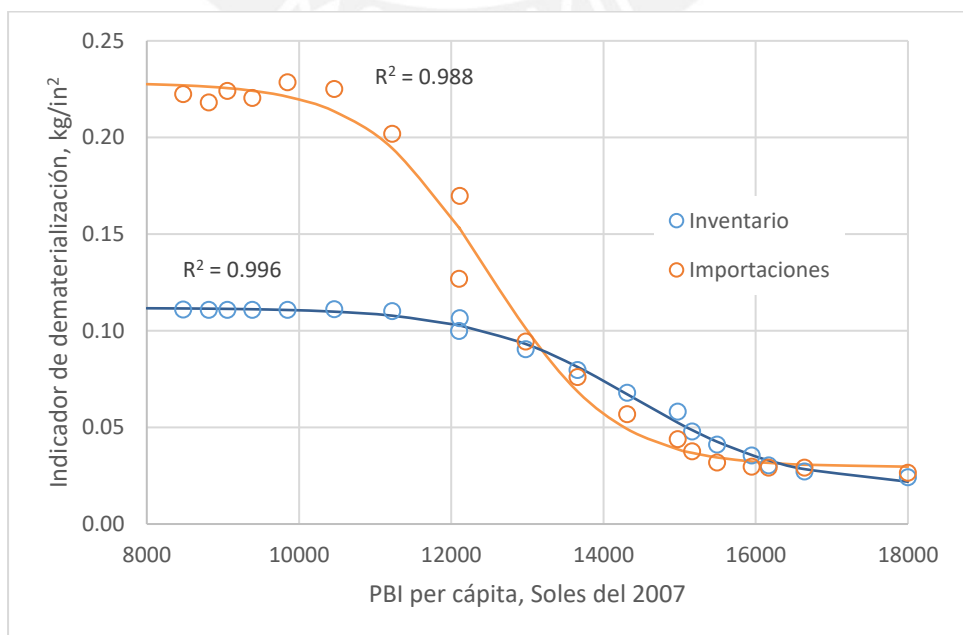


Figura 18: Masa promedio de los electrodomésticos (2001 - 2019)
 Las líneas grises punteadas muestran el intervalo de confianza de regresión con $\alpha = 5\%$
 Adaptado de (Gusukuma, Kahhat & Cáceres, 2022)

La figura 19 muestra un fenómeno interesante en el caso de los televisores y la computadoras personales respecto al PBI per cápita. Si se define un indicador de dematerialización basado en la masa promedio respecto a un factor de funcionalidad, se observa que el comportamiento en ambos casos es a decrecer a medida que el PBI per cápita ha ido en aumento, lo cual continuaría hasta que aparezca un cambio disruptivo en su tecnología. Además, se evidencia que las brechas entre los artefactos importados y los existentes, relacionadas con la renovación de los equipos en los hogares se va cerrando en el tiempo.



(a)

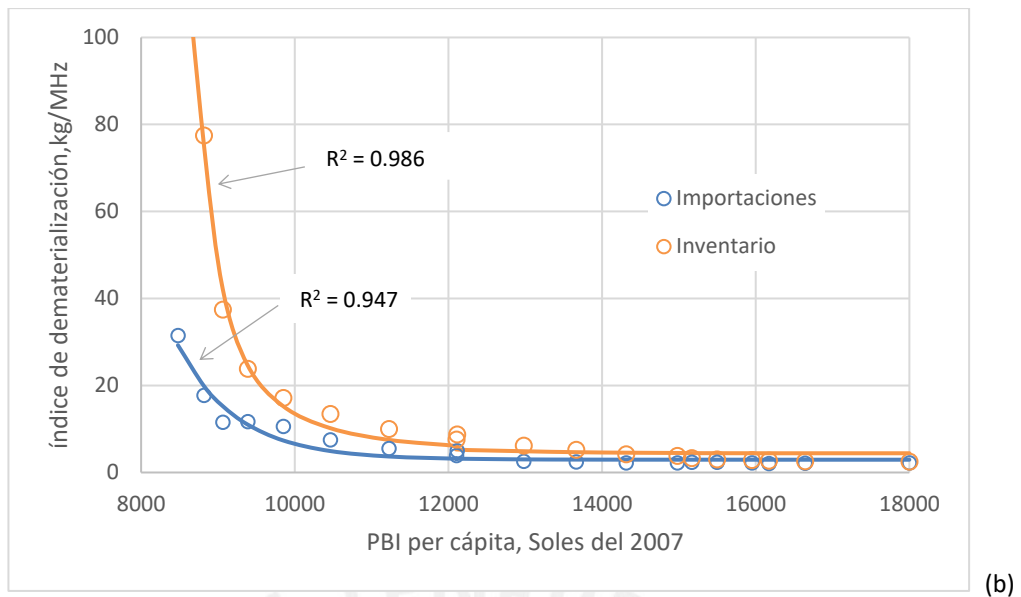


Figura 19: Curvas ambientales de Kuznets
 (a) Televisores a color, (b), Computadoras. Adaptado de (Gusukuma et al., 2022)

4.2. LAS EMISIONES DE GEI DE LOS ELECTRODOMÉSTICOS PRESENTES EN LOS HOGARES

El cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero se realizó usando el análisis insumo-producto extendido ambientalmente (EEIOA), el cual estima los impactos ambientales utilizando las interrelaciones dentro de una economía determinada (Matthews, et al., 2015). Los datos económicos provinieron del consumo final de los hogares de los servicios de electricidad, gas y agua potable de los años 2007 al 2019 (INEI, 2020). El consumo final de electricidad de los electrodomésticos proviene de los cuadros de oferta y utilización (COU) de los años 2007 al 2014 (INEI, 2016). Para separar el consumo de los electrodomésticos del usado para iluminación, se ha reportado que el consumo eléctrico para iluminación está entre 18.76 % (MINEM, 2016) al 32.2 % (Instituto Quanto, 2015). Respecto al EEIOA, los cálculos fueron realizados en hoja de cálculo; pero también pueden ser replicados en calculadora en línea disponible en internet (PUCP & CMU, 2021).

Las emisiones de gases de efecto invernadero se han incrementado desde 1.9 millones en el año 2007 hasta 4.8 millones de toneladas de CO₂e en el año 2019 tal como se muestra en la figura 20. De no haber cambios significativos en los hábitos de consumo de la población la evidencia en el corto plazo que la generación de GEI no tiendan a estabilizarse sino más bien continúen su tendencia creciente.

4.2.1. Generación de gases de efecto invernadero

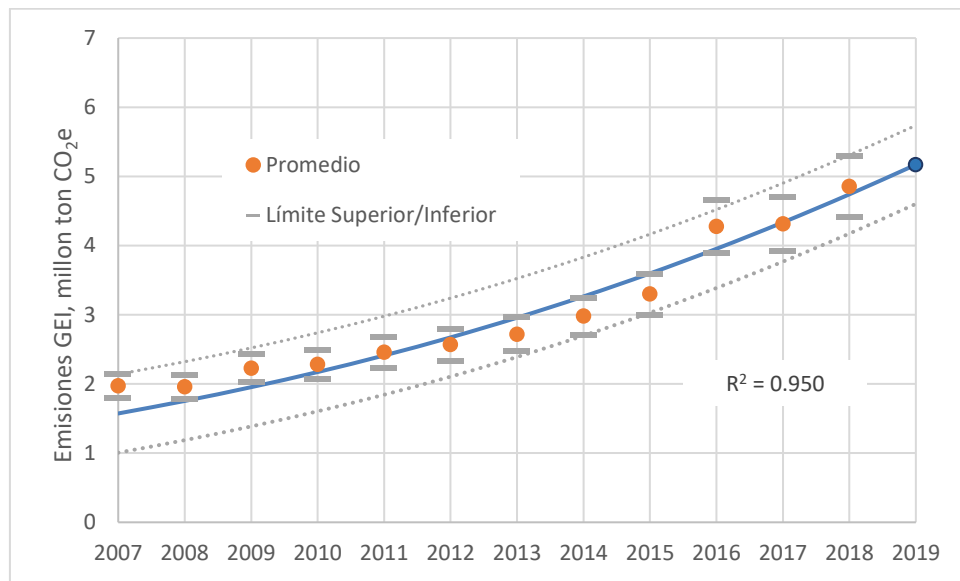


Figura 20: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero
Las líneas punteadas indican el intervalo de confianza de la regresión ($\alpha = 5\%$)

Los resultados obtenidos respecto a los resultados del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) de los años 2010, 2012 y 2014 (MINAM, 2021) muestran la tendencia creciente del consumo de energía por el uso de AEE. Para confirmar la exactitud de los cálculos realizados usando el método EEIOA, la tabla 9 resume la comparación entre el método EEIOA y los resultados de INGEI para el consumo de energía eléctrica en los hogares, observándose que el consumo total de electricidad en los hogares equivale aproximadamente al 1.3 % de las emisiones de GEI totales. Además, se observa en términos generales que las emisiones calculadas por el método insumo-producto son mayores que aquellas obtenidas por el INGEI, lo cual se debe a que en primer lugar, el enfoque insumo-producto es una aproximación basada en las interacciones de los sectores productivos dentro de toda la economía peruana, mientras que el INGEI se realiza de acuerdo con las directivas del Grupo Intergubernamental Contra el Cambio Climático (IPCC) del año 2006, en donde se utilizaron mayoritariamente métodos que utilizan los niveles de actividad y los factores de emisión por defecto (MINAM, 2021).

Tabla 8: Comparación de los resultados de INGEI versus los obtenidos mediante el EEIOA para Perú

Año	EEIOA, Gg CO ₂ e	INGEI, Gg CO ₂ e		Residencial vs. Total, %	EEIOA vs. INGEI, %
		Total	Residencial		
2010	3 063	170 940	2 260	1.3%	35.5%
2012	3 447	178 171	2 763	1.5%	24.7%
2014	4 001	197 568	2 742	1.3%	45.9%
2016	5 738	205 294	3 022	1.4%	89.8%

Adaptado de (Gusukuma et al., 2022)

4.2.2. Análisis de Kuznets de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

La figura 21 muestran tanto el inventario de electrodomésticos en masa y su correspondiente consumo eléctrico respecto al producto bruto interno por familia, mostrándose comportamientos similares y una exacerbación de la tendencia positiva a partir del año 2014 aproximadamente. A diferencia del caso mostrado en la figura 19, en el cual la tendencia es decreciente, esta figura muestra que el crecimiento de la economía está ligado aún a los impactos ambientales relacionados con la adquisición de electrodomésticos, o específicamente, su etapa de fin de ciclo de vida, y el consumo de energía durante su fase de uso, las cuales son tendencias que continuarán por lo menos en un futuro próximo de no ocurrir algún cambio disruptivo en la tecnología del conjunto de aparatos existentes en los hogares.

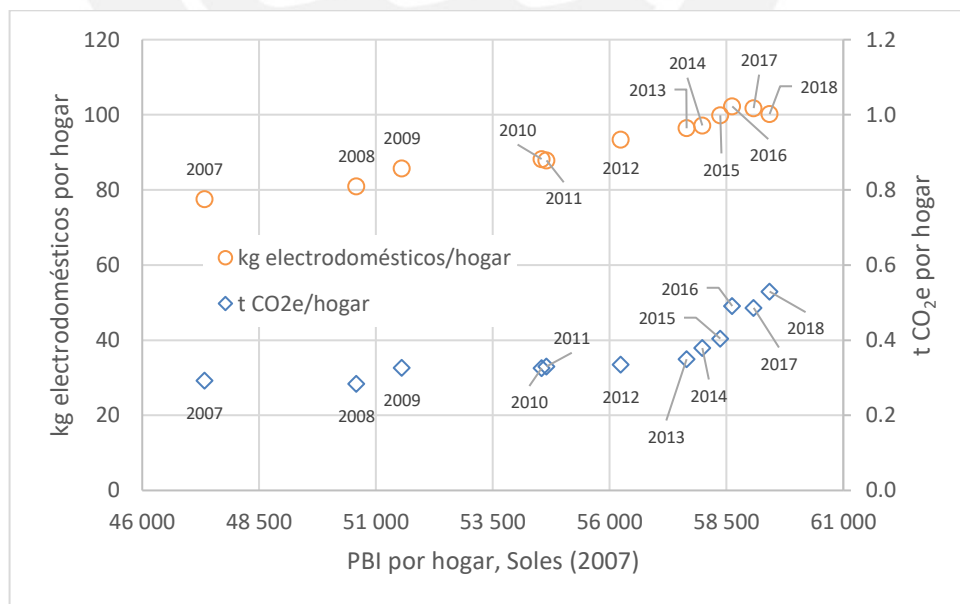


Figura 21: emisiones de GEI e Inventario de electrodomésticos vs. PBI por hogar
Adaptado de (Gusukuma et al., 2022)

De forma complementaria, la figura 22 muestra la serie temporal de las variables que contribuyen con el crecimiento del inventario de electrodomésticos en los hogares. Se observa que, salvo en la curva de crecimiento del PBI, de carácter decreciente, y la cotización del dólar, que tiene forma de “U”, el resto de las variables tiene una tendencia creciente.

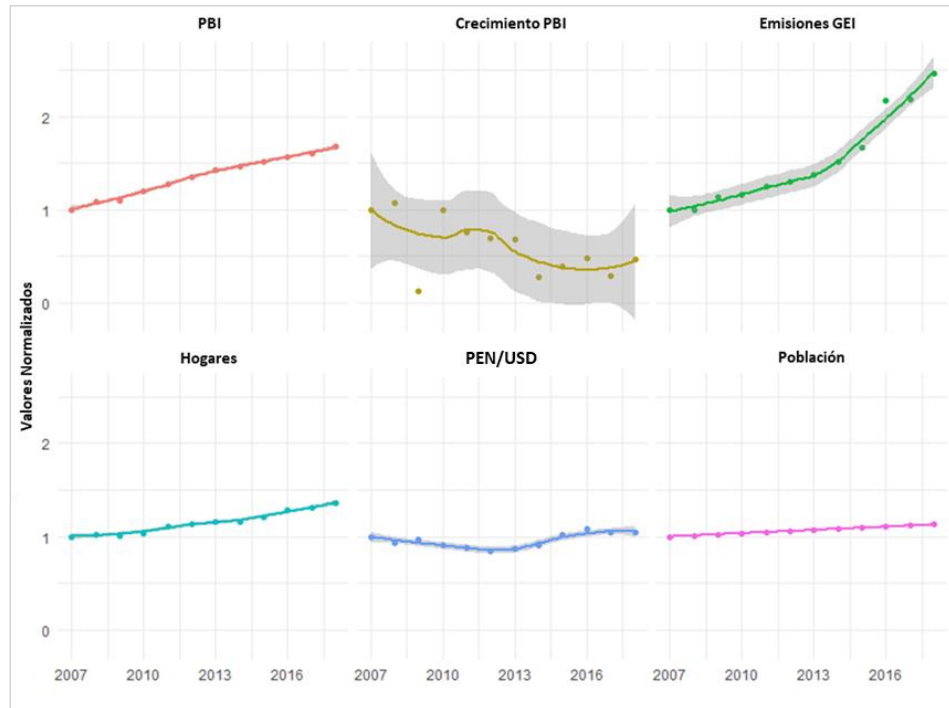


Figura 22: Valores normalizados de las variables demográficas y económicas respecto al crecimiento de inventario de electrodomésticos en los hogares y las emisiones de GEI

Nota: Valores iniciales al año 2007: Emisiones GEI: 1.97 millones de toneladas de CO₂e. Población: 28.5 millones. Número de hogares: 6.8 millones, Producto Bruto Interno (en soles del 2007): 319 693 millones. Tipo de cambio: 3.127 PEN/USD. Crecimiento del PBI: 8.52 %.

Adaptado de (Gusukuma et al., 2022)

4.3. EL IMPACTO DE LOS CAMBIOS TECNOLÓGICOS SOBRE EL INVENTARIO DE TELEVISORES EN EL PERÚ

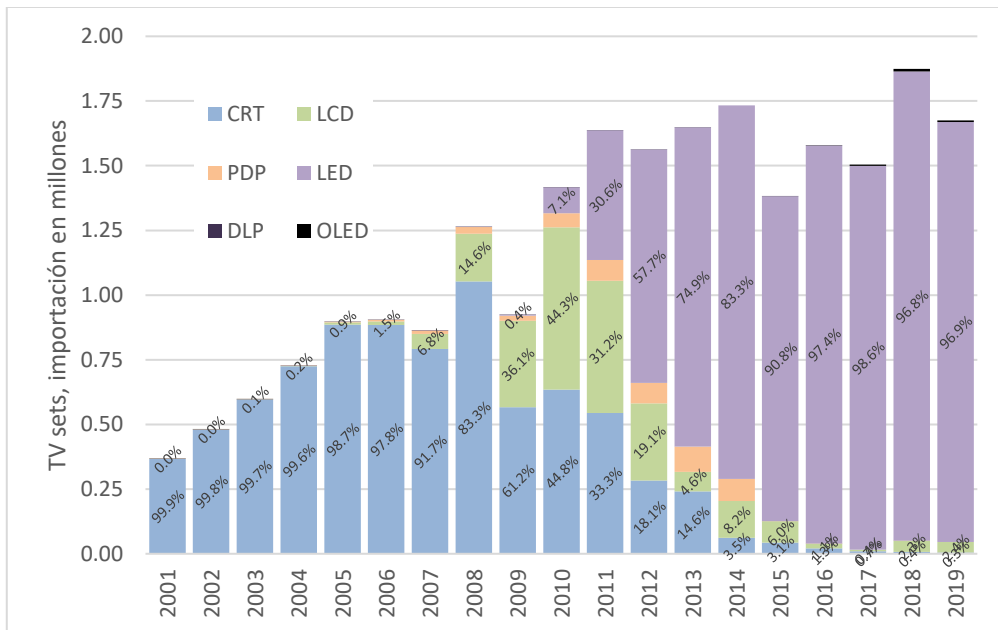


Figura 23: Importaciones de televisores, (2001-2019), en unidades
Adaptado de (Gusukuma et al., 2022)

La figura 23 muestra la evolución en las importaciones, expresadas en millones de unidades, y los inventarios en los hogares, tanto en unidades como en toneladas métricas. Los resultados indican, además del aumento de las cantidades importadas y de la cantidad de televisores en los hogares, que ha existido un cambio significativo en las tecnologías de proyección de imágenes en las pantallas. Es decir, la transición de los televisores con pantalla de tubos de rayos catódicos (CRT), cuyas importaciones llegaron a su valor máximo entre el año 2008 para dar paso los televisores de pantalla de cristal líquido, con retroiluminación con diodos emisores de luz (LED). Esto ha traído como resultado que en los hogares se cuenten con aparatos más esbeltos con pantallas más grandes y de mejor resolución considerando además el proceso de apagón analógico que se está realizando para proveer a los consumidores de una mejor calidad de imagen un uso más optimizado del espectro radioeléctrico.

La figura 24 muestra los inventarios de televisores por tipo de tecnología, evidenciando el cambio en las tecnologías de proyección de imágenes, de las pantallas de tubos de rayos catódicos a las pantallas de cristal líquido tanto en unidades como en toneladas métricas.

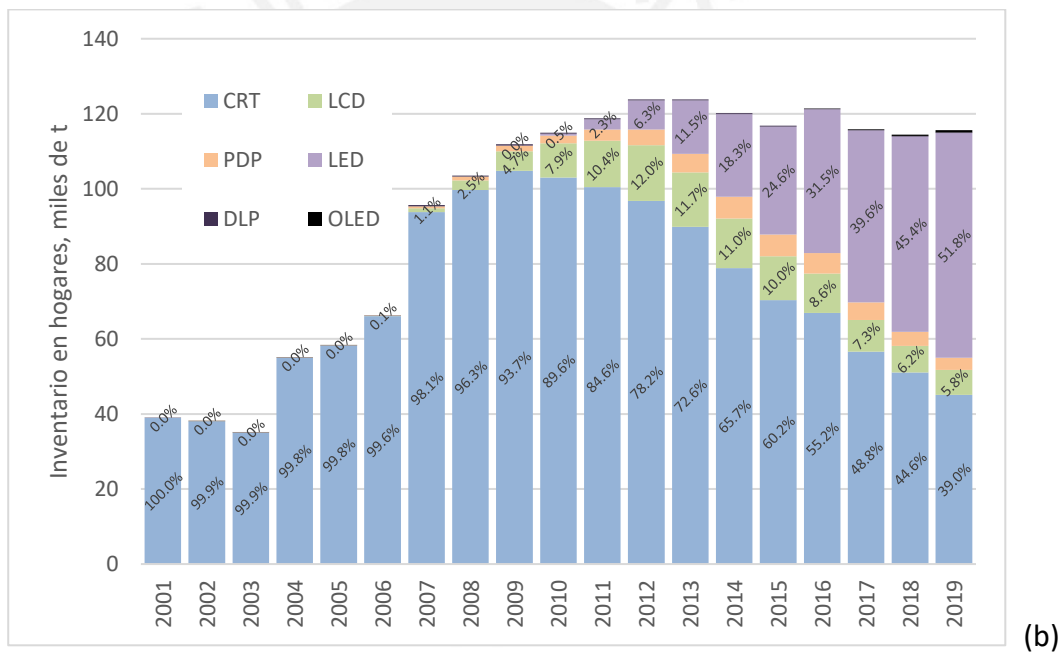
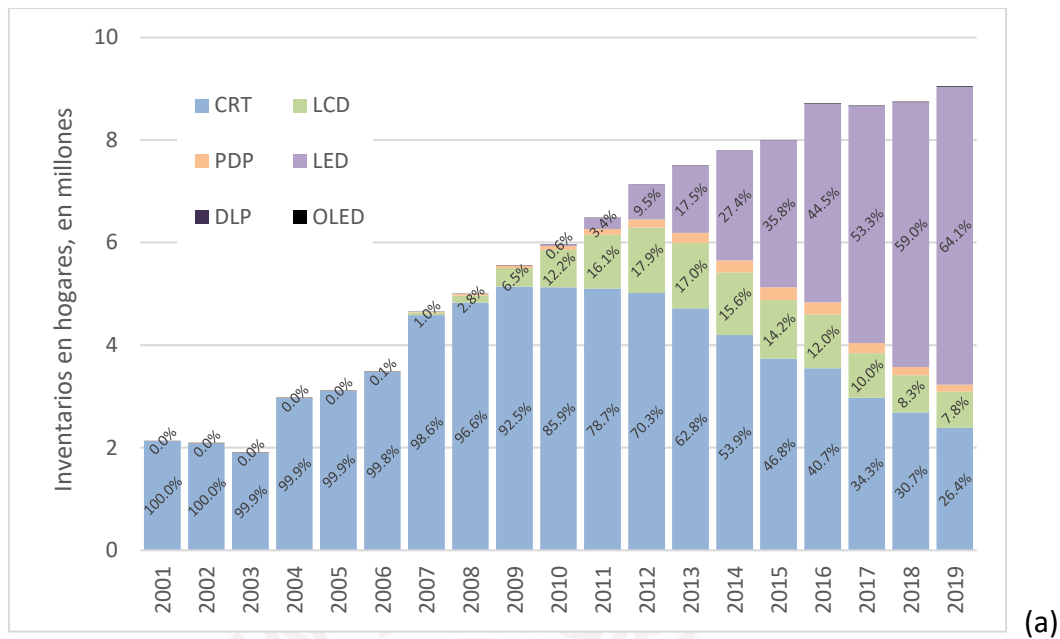


Figura 24: Inventarios de televisores (2001-2019)
 (a), en millones de unidades, (b), en miles de toneladas métricas
 CRT: Cathode Ray Tube; DLP: Digital Light Processing, LCD: Liquid-Crystal-Display, PDP: Plasma Display Panel, LED: Light-emitting diode backlighted, OLED: Organic light-emitting diode
 Adaptado de (Gusukuma et al., 2022)

4.4. FLUJOS E INVENTARIOS DE TELEVISORES DE RAYOS CATÓDICOS EN EL PERÚ

Para desarrollar el AFM de los televisores de tubos de rayos catódicos, una vez establecidos los objetivos, parámetros, alcance y periodo de interés, se procedió de acuerdo con la metodología propuesta en la figura 26: La identificación de actores, procesos flujos e inventarios, la realización de los cálculos correspondientes y la

interpretación de los resultados y la generación de conclusiones. A continuación, se discutirán los resultados más relevantes de este componente de la investigación:

4.4.1. Identificación de Actores y Procesos

De acuerdo con la figura 25, existen cuatro tipos de actores representados como los nodos de un sistema de consumo. En primer lugar, se cuenta con los importadores, quienes son los encargados de ingresar los televisores al país y son los que proveen de artefactos a los otros actores del sistema. En segundo lugar, están los usuarios, tanto residenciales como comerciales, entre los que se encuentran hoteles y restaurantes, entre otros tipos de negocios. Finalmente, se cuenta con los intermediarios, quienes se encargan de reparar o disponer los televisores cuando llegan al final de su ciclo de vida útil.

Una vez identificados los actores, se procede a identificar los procesos del proceso de consumo estudiado. Tal como se observa en la figura 25, las flechas representan procesos de transferencia. Por ejemplo, los importadores proveen de artefactos a los usuarios residenciales y comerciales, los usuarios compran y se desprenden de sus artefactos y los intermediarios reciben televisores obsoletos o descompuestos para repararlos o disponerlos. Además, cada uno de estos nodos puede tener una acumulación de inventario, el cual es el segundo proceso identificado. Por ejemplo, existen hogares que tienen más de un televisor, ya sea que estén operativos o que estén almacenados por razones que escapan al alcance de esta investigación.

4.4.2. Definición de las Ecuaciones de Balance

Una vez identificados los actores y procesos, se debe definir la ecuación de balance. En términos generales, ésta es definida de la siguiente manera:

$$t_{ac} = \Sigma t_{in} - \Sigma t_{out} \dots (2)$$

En donde t_{ac} es la variación del inventario de cualquiera de los actores, Σt_{in} es la suma de los flujos de entrada a cada actor, Σt_{out} es la suma de los flujos de salida. En otras palabras, el inventario de los diversos actores equivale a la diferencia entre sus entradas, por ejemplo, por adquisición, respecto a sus salidas por

renovación de equipo por mencionar un caso. La descripción detallada de las ecuaciones de conservación se encuentra en el artículo correspondiente a esta etapa de la investigación (Gusukuma & Kahhat, 2018), tanto en el artículo principal como en la información suplementaria. Finalmente, es importante mencionar que esta investigación excluye el flujo de salida de los CRT-TV del sistema pues el interés principal es determinar el inventario de estos artefactos al final del apagón analógico, el cual estaba programado a la fecha de la publicación del artículo para el año 2025.

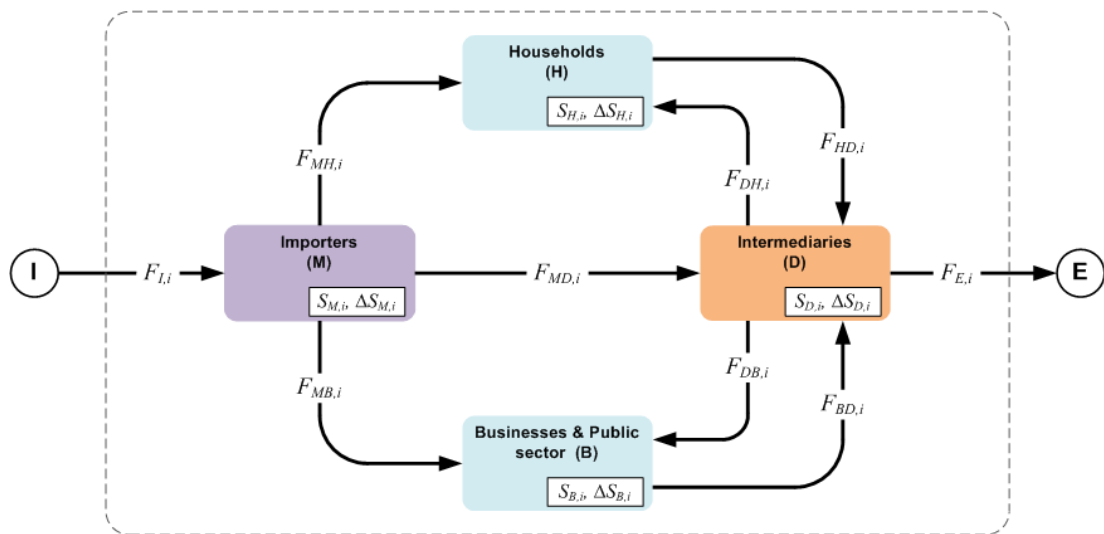


Figura 25: Actores y procesos del sistema (Gusukuma & Kahhat, 2018)

De acuerdo con lo mencionado en el marco teórico, las principales limitaciones para realizar un AFM radican, entre otros factores, en la existencia y calidad de los datos (Miller et al., 2016; Meylan et. al., 2017). Para paliar esta situación, se usan *proxies* o factores de aproximación para escalamiento y repartición de flujos e inventarios cuando es necesario (Lepawsky & McNabb, 2010).

Otra limitación está relacionada con la incertidumbre, que puede ser definida como escenarios, descritos como narraciones de futuros posibles (Godet, 2000). En ese sentido el concepto de análisis de límites (*boundary analysis*) es utilizado para definir los escenarios, considerando limitaciones de tipo físicas o económicas de forma que cualquier desviación fuera de estos no ocurra de la misma forma en que ocurre en las matemáticas (Williams et al., 2012). Al primer escenario se le denominó “Mixed-EOL”, en el cual tanto los CRT-TV y los televisores de pantalla plana llegan el su fin de ciclo de vida (EOL) independientemente de su tecnología. El otro escenario,

por otro lado, se le denomina “CRT-EOL” porque asume que entre los años 2005 al 2017, por cada CRT-TV que llegue a su final de ciclo de vida será reemplazado por uno de pantalla plana hasta que el inventario en los usuarios de CRT-TV desaparezca (Gusukuma & Kahhat, 2018).

4.4.3. Análisis de los Inventarios y Flujos de CRT en los Hogares

En primer lugar, la figura 26 muestra las importaciones de CRT-TV desde el año 2005 hasta el año 2017, en donde se observa un cambio significativo en los hábitos de consumo en el Perú: la importación de este tipo de electrodomésticos tuvo un crecimiento hasta el año 2008 de aproximadamente 1 millón de unidades, para luego ir decreciendo como consecuencia de la introducción al mercado de las pantallas planas tales como televisores de plasma (PDP) y pantallas de cristal líquido, tanto las retroiluminadas con lámparas fluorescentes (LCD) y con diodos emisiones de luz (LED). Es importante mencionar que, a pesar de ser una tecnología obsoleta, a la finalización de este componente de la investigación aún se importaban CRT-TV nuevos en cantidades muy pequeñas y se detectó que se pueden conseguir unidades de segunda mano en el clúster de reparación de equipos de cómputo ubicado en el Jr. Leticia, en el centro de Lima.

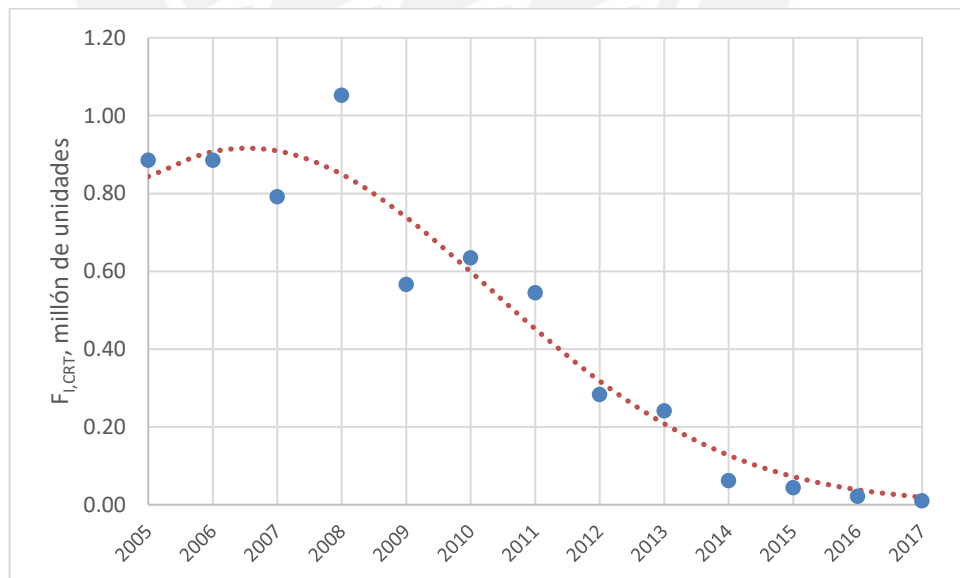


Figura 26: Importaciones de CRT-TV, (2005-2017)
(Gusukuma & Kahhat, 2018)

La evolución de los inventarios de los usuarios tipo Households (residenciales) y B&P (comerciales y el estado) es el principal interés de esta etapa de la investigación debido a que todo este inventario deberán ser gestionados de forma segura una vez concluido el ASO. La figura 27, que describe el escenario Mixed-EOL muestra una tendencia exponencial ($R_{Households}^2 = 0,990$, $R_{B\&P}^2 = 0,975$). De acuerdo con el escenario Mixed-EOL, y considerando que no habrá factores externos que afecten las decisiones de los usuarios, se estima que el inventario para ambos tipos de usuarios estaría entre los 5.10 y 0.65 millones de CRT-TV respectivamente. A pesar de ser las tendencias similares, existen otros factores a ser considerados. Por ejemplo, mientras que en los hogares tratan de obtener la mejor relación costo-beneficio, los negocios deben manejar sus activos basados tales como su operatividad, la depreciación de los activos, entre otros. Además, a través de visitas de campo, se observó que los CRT-TV eran aún apreciados debido a sus menores costos de reparación y su mejor tolerancia a las fluctuaciones de voltaje

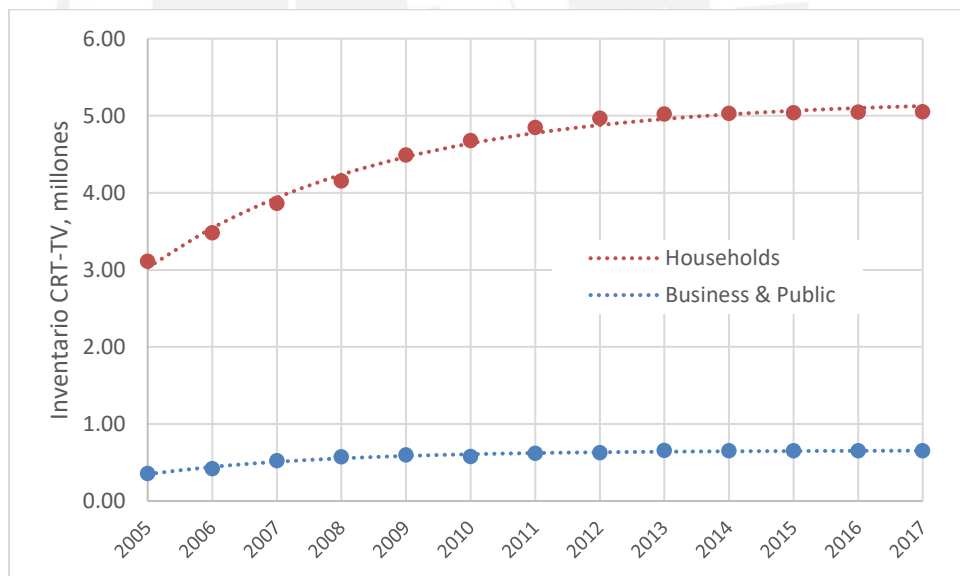


Figura 27: Inventario de CRT-TV en los hogares, escenario Mixed-EOL (2005-2017) (Gusukuma & Kahhat, 2018)

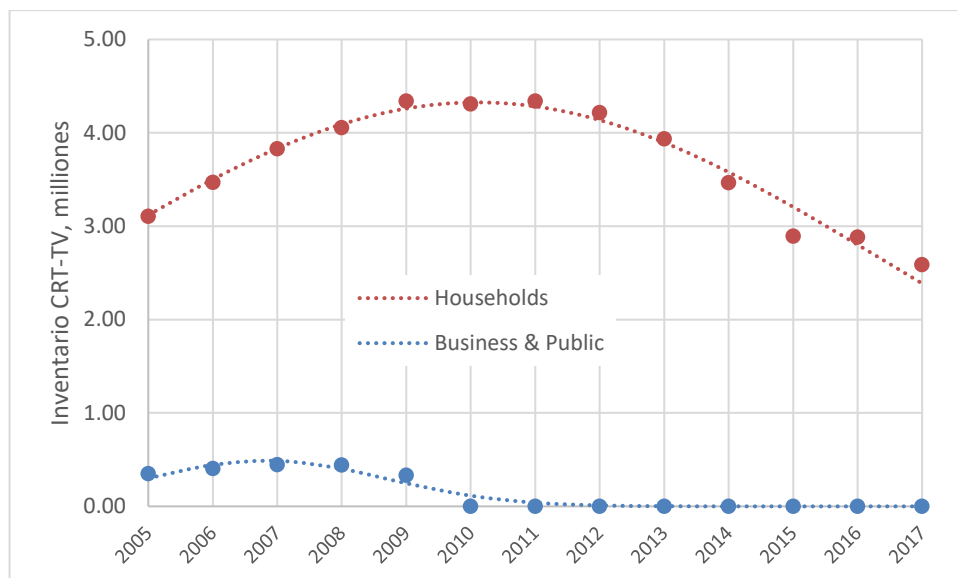


Figura 28: Inventario de CRT-TV en los hogares, escenario CRT-EOL (2005-2017) (Gusukuma & Kahhat, 2018)

El escenario CRT-EOL, mostrado en la figura 28 muestra una perspectiva diferente respecto a los inventarios y sus correspondientes variaciones debido a que el inventario de CRT-TV iría disminuyendo a medida que eventualmente desaparezca por reemplazo de tecnologías. En ambos casos, los patrones de consumo tienen un comportamiento de campana ($R^2_{Households} = 0,961$, $R^2_{B\&P} = 0,940$). Es importante notar que el inventario de CRT-TV en los hogares alcanza su máximo entre los años 2010-2011, mientras que en los negocios y el sector público el pico se estima que fue en el año 2006, por lo que el inventario de CRT-TV en los hogares se estima en 2,59 millones de unidades mientras que en el sector de negocios y el sector público éste sería nula a partir del año 2012.

Tabla 9: Inventarios proyectados de CRT-TV y plomo al año 2025

	Descripción	Households	B&P Users	Total
Escenario Mixed-EOL	CRT-TV, millones	5.04	0.65	5.69
	Vidrio CRT, x 1000 t	60.7	7.81	68.5
	Plomo, x 1000 t	7.10	0.86	7.96
Escenario CRT-EOL	CRT-TV, millones	2.59	0.00	2.59
	Vidrio CRT, x 1000 t	38.5	0.00	38.5
	Plomo, x 1000 t	4.50	0.00	4.50

La determinación del inventario de televisores en el año en el que termine el ASO también es importante pues contribuye a estimar la cantidad de plomo que sería enterrada en instalaciones de disposición final formales o informales en vez de ser recuperados y retornados a los procesos productivos como materia prima. Las figuras 29 y 30 muestran la evolución de los inventarios de plomo e indica que para el año 2025 existirían entre 4,50 y 7,96 mil toneladas de plomo como componente de los CRT que quedarían inoperativos al final de ASO, establecido por el estado a la fecha de realización de estudio para el año 2025. Finalmente, la tabla 10 resume los resultados obtenidos y su equivalente en toneladas métricas de plomo que, de no hacerse nada al respecto, irían a parar a los rellenos sanitarios de ámbito municipal.

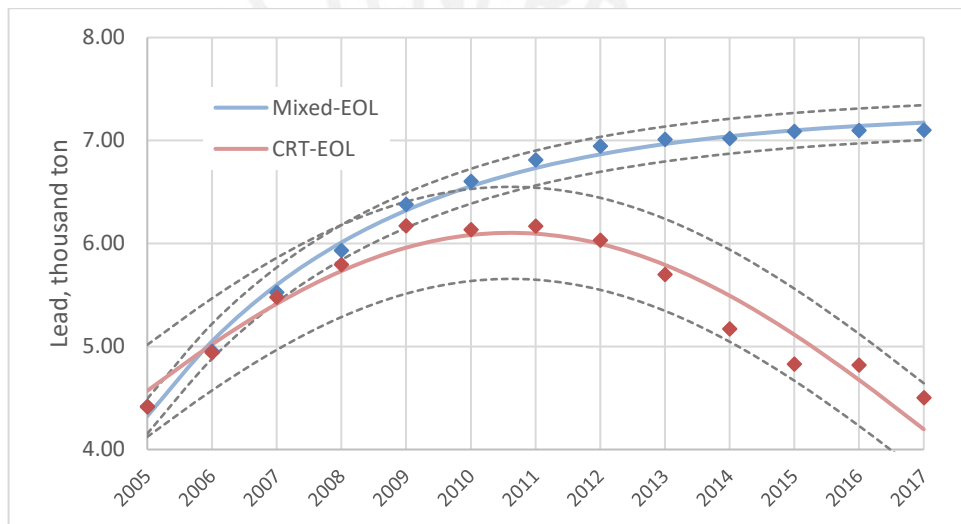


Figura 29: Inventario de plomo, Households, (2005-2017), $\alpha = 5\%$
(Gusukuma & Kahhat, 2018)

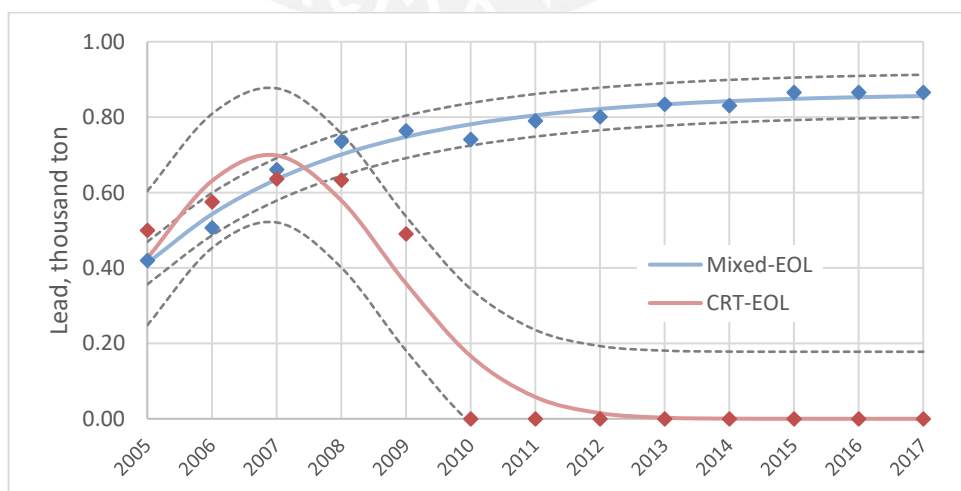


Figura 30: Inventario de plomo, B&P, (2005-2017), $\alpha = 5\%$
(Gusukuma & Kahhat, 2018)

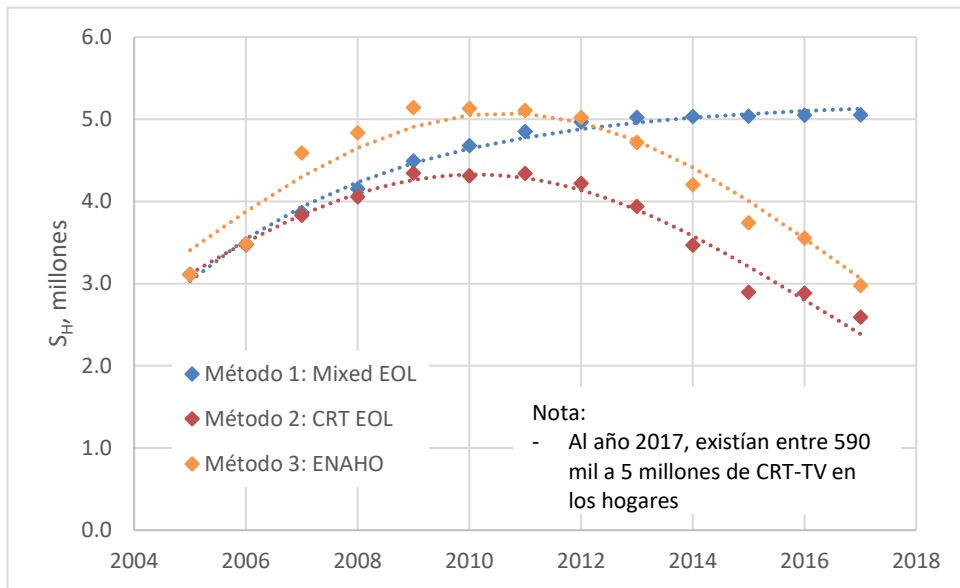


Figura 31: Inventario de CRT-TV en los hogares
(Gusukuma et al., 2022; Gusukuma & Kahhat, 2018)

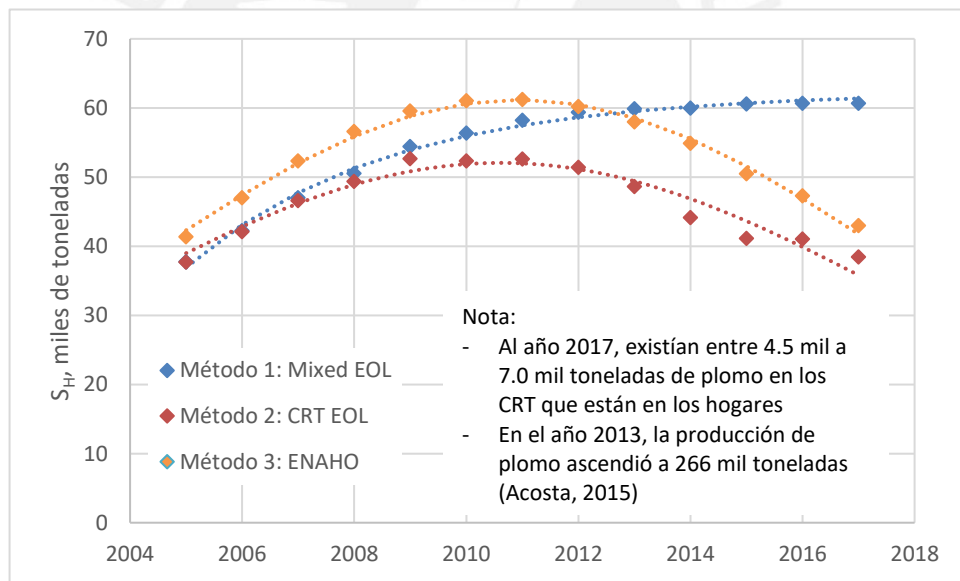


Figura 32: Inventario de plomo en los CRT-TV en los hogares
(Gusukuma et al., 2022; Gusukuma & Kahhat, 2018)

Las figuras 31 y 32 muestran la comparación entre los métodos usados para la estimado del inventario de CRT-TV tanto en millones de unidades como en función al plomo. Los resultados del método Mixed EOL y CRT EOL (Gusukuma & Kahhat, 2018), son coherentes con los resultados obtenidos con el método ENAHO (Gusukuma et al., 2022).

4.5. APLICACIÓN DE LA AUTORREDUCCIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE PLOMO A PARTIR DEL VIDRIO DE LOS CRT

En este quinto componente de la investigación, una vez conocida la cantidad de plomo que quedaría en los usuarios como consecuencia del ASO, es necesario encontrar un proceso que permita extraer el plomo que está unido químicamente al vidrio de los tubos de rayos catódicos (CRT) de manera que se recupere el material e incluso el residuo pueda ser utilizado con otros fines sin el peligro de intoxicaciones accidentales por la presencia de plomo en éstos. A continuación, se muestra los avances en los resultados del uso la autorreducción para la extracción del plomo utilizando carbón vegetal como fuente del agente reductor (CO), óxido de calcio como agente fundente y carboximetilcelulosa (CMC), como material aglutinante para conformar los pellets autorreductores. Es importante que se mostrarán resultados preliminares en esta tesis debido a que el material está pendiente de ser publicado.

El procedimiento para hacer los pellets, independientemente de su composición, es el siguiente: Se pesan 50 de los materiales áridos, a los se le agrega entre 10 a 14 mL de una solución de CMC 1:100 para luego conformar los pellets a mano de forma que pesen entre 5.00 ± 0.05 g. Para evitar que éstos revienten (*popping*) o se rajen (*cracking*) por la ebullición en su interior, los pellets son secados a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ por una hora.

4.5.1. Determinación de la Cantidad de Agente Fundente

El primer procedimiento experimental consistió en determinar la cantidad de CaO a ser agregado para evitar el hinchamiento de los pellets (*swelling*), fenómeno indeseado en el que la superficie exterior se funde y evita el escape del CO generado, provocando la hinchazón de los pellets y la consecuente pérdida de contacto íntimo entre reactantes. En ese sentido se hicieron pruebas con porcentajes en peso diferentes (10%, 15%, 20%, y 25%). Estas pruebas se realizaron a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 5, 10 y 20 minutos de tiempo de reacción. Los resultados indican que los pellets con una composición de 20%, tal como se muestra en la figura 33, los pellets dejan de sufrir el problema de hinchazón.

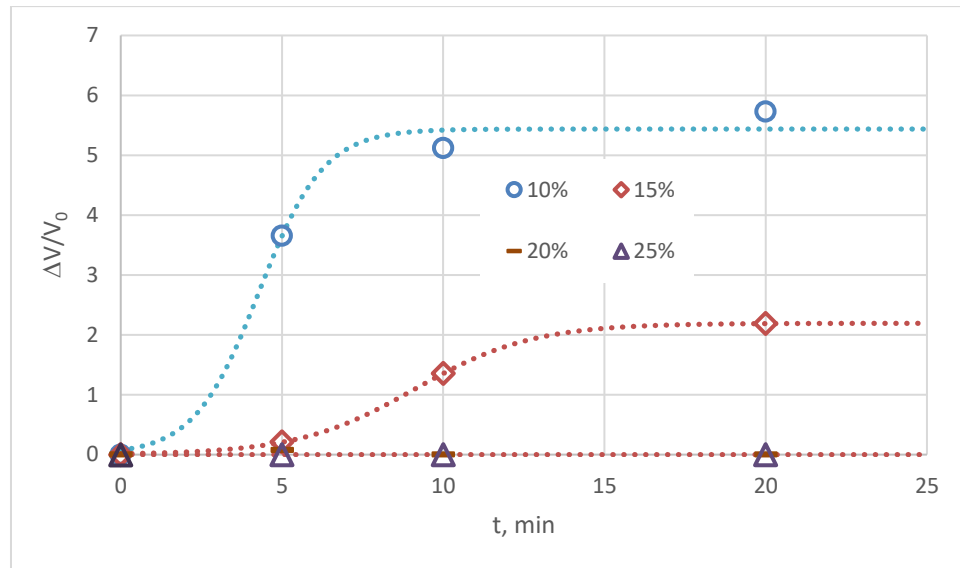


Figura 33: Variación del volumen de pellets vs. tiempo, para diferentes % of CaO.

4.5.2. Determinación del Tiempo de Reacción

Una forma para estimar el grado de avance de la reacción es utilizando el concepto de fracción de reducción x , tal como se muestra en la ecuación 3, para la cual se utiliza las masas de los pellets antes de tratamiento (w_0), después de tratamiento (w) y la máxima pérdida de peso (Δw_{max}):

$$x = \frac{w - w_0}{\Delta w_{max}} \quad (3)$$

La figura 34 muestra el efecto de la temperatura en la fracción de reducción, interpretada como la pérdida de peso por el escape del CO del pellet. Las temperaturas seleccionadas fueron 800 °C y 1000 °C debido a que se encuentran en la zona óptima identificada en el diagrama de Ellingham. Los resultados indican que la reducción a 800 °C sería más lenta que a 1000 °C. Además, se observa que mientras que a 800 °C existe una tendencia creciente de tipo logarítmico, a 1000 °C aparentemente se llega a punto máximo antes de los 20 minutos para luego reducirse el valor calculado de la fracción de reducción, posiblemente debido a la oxidación del plomo metálico por efecto de las altas temperaturas dentro del horno, comportamiento confirmado por las investigaciones realizadas por Lu et al. (2018), quienes manifiestan que el plomo metálico a altas temperaturas puede retornar a la matriz vítrea como PbO.

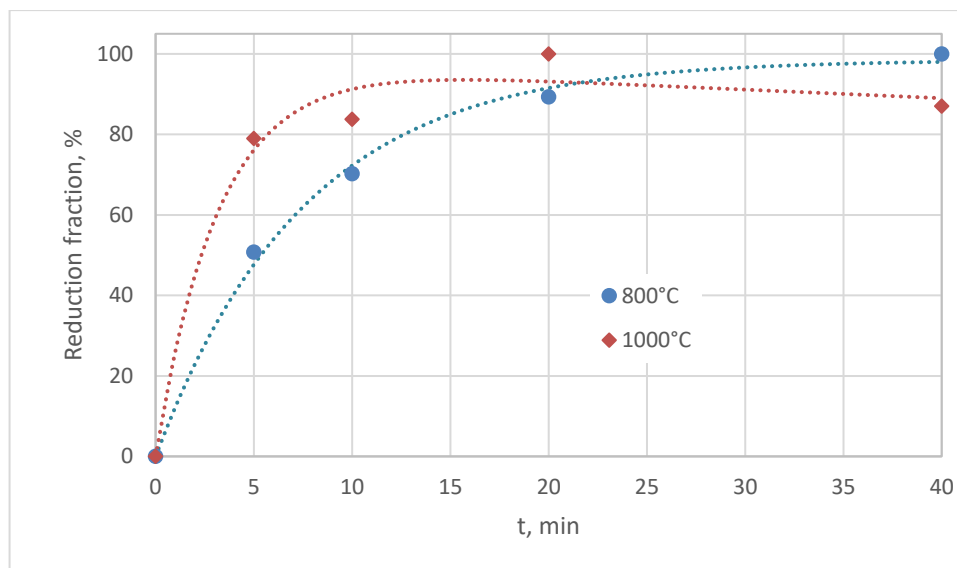


Figura 34: Fracción de reducción de los pellets autorreductores vs. tiempo.

4.5.3. Primer Ensayo Piloto

Una vez determinadas las condiciones de operación, se realizó una prueba piloto para ver si el uso de pellets autorreductores es una técnica útil para la remoción de plomo del vidrio de los CRT, específicamente del cono o embudo. Para determinar la efectividad del método, se realizó una corrida y el producto resultante fue analizado por la técnica de microscopía electrónica de barrido/espectroscopía de rayos X del distribuidor de energía SEM-EDS. El análisis morfológico se realizó en microscopio electrónico de barrido Quanta 650, mientras que el análisis EDS fue realizado en un sistema Ametek EDAX TEAM acoplado al microscopio electrónico.

El análisis SEM/EDA fue usado para determinar si la reducción del óxido de plomo ocurre debido a la presencia de plomo metálico en una fase dispersa, mientras que la fase continua es el vidrio de CRT. La figura 35 muestra la imagen de una muestra con un contenido de 20% en peso de CaO tratada a 1000 °C por 20 minutos, en donde se muestran tanto la fase continua como la fase dispersa, ricas en plomo y silicio respectivamente. Las figuras 36a y 36b muestran los espectros del punto 1, consistente en una muestra de plomo metálico vista como un punto de color gris claro, el cual contiene un 66,4% de plomo, mientras que el punto 2 es una muestra de la fase continua rica en silicio, de color gris oscuro, la cual tiene un contenido de 3,6% de plomo y 28,8% de silicio.

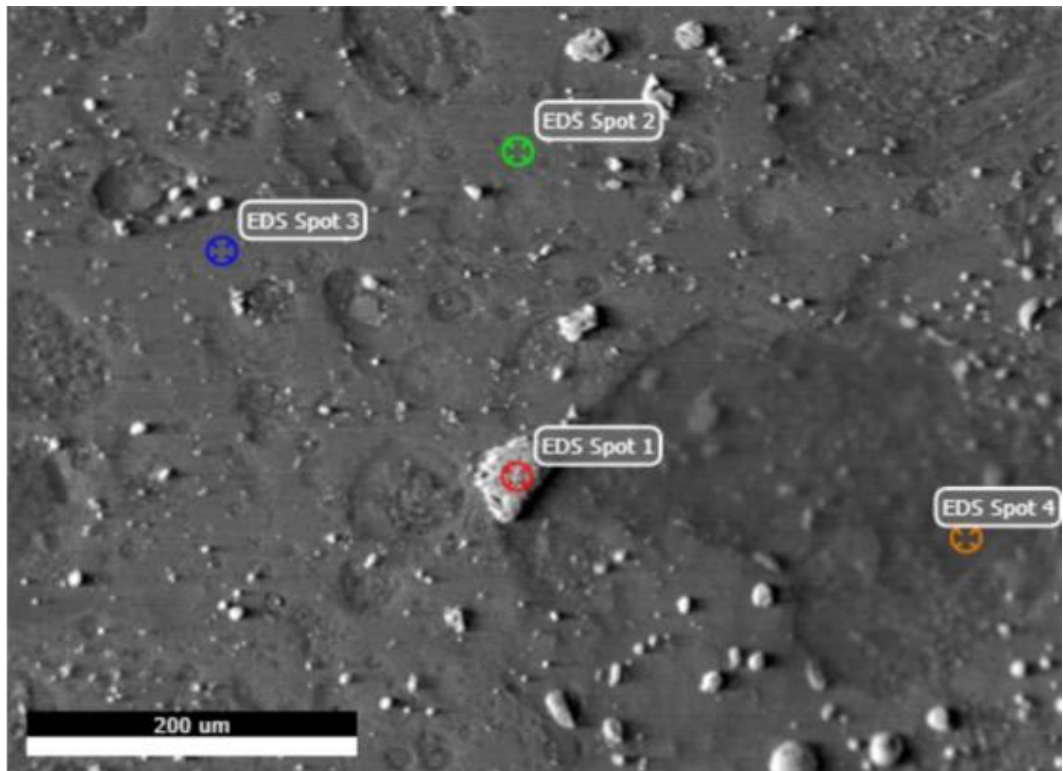
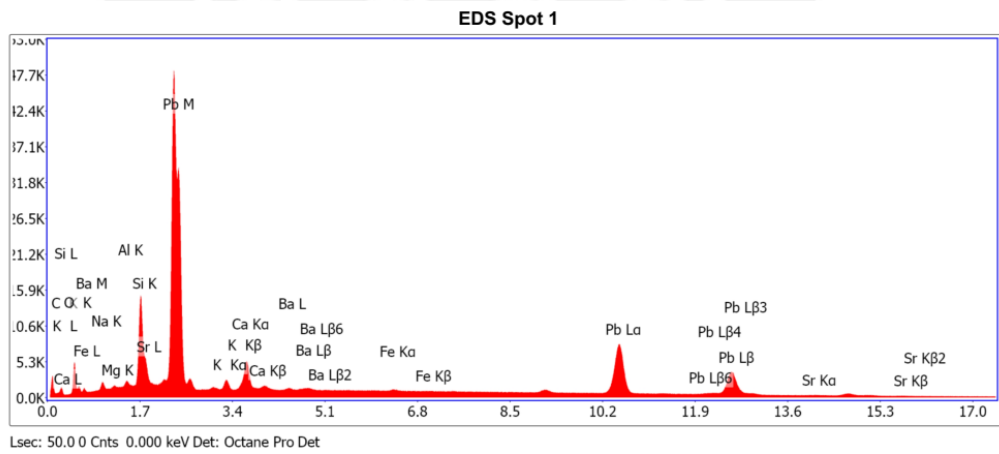
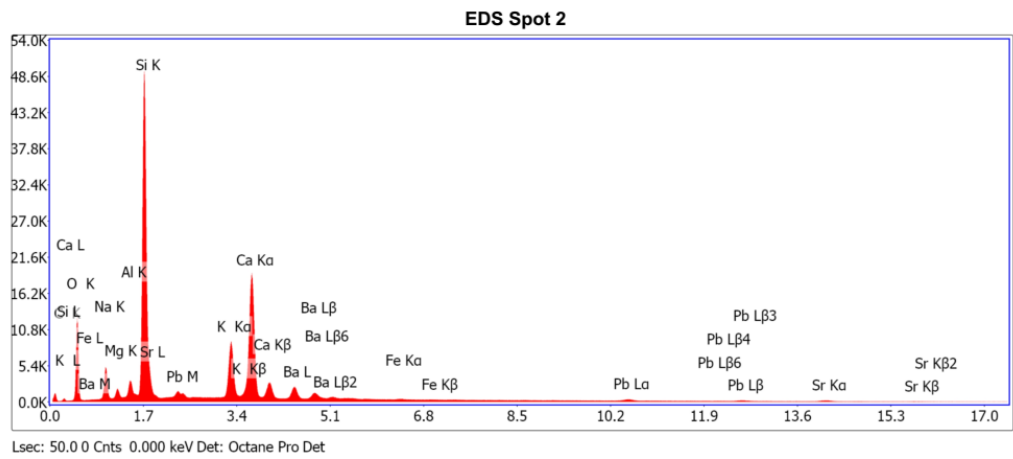


Figura 35: Imagen SEM, muestra a 1000 °C por 20 minutos.



a)



b)

Figura 36: Análisis EDS de la muestra tratada 1000 °C por 20 minutos
a) plomo metálico (gris claro, fase dispersa), b) la fase rica en silicio (gris oscuro, fase continua).



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

La conclusión principal de esta tesis consiste en que la recuperación de materiales valiosos a través de la minería urbana se puede constituir en toda una industria que pueda no solamente aportar con el crecimiento del país y generar puestos de trabajo directos e indirectos, sino también que contribuya con la reducción de los impactos ambientales generados por el fin de vida de lo AEE. Para llegar a esta conclusión general se partió de las siguientes conclusiones específicas:

Conclusión 1: Tendencia en la tenencia de electrodomésticos en los hogares peruanos

El consumo de electrodomésticos en Perú ha aumentado de forma significativa en el Perú: mientras que, en el año 2001, esta cantidad estaba entre los 44 y 71 kilogramos, en el 2019 la masa promedio de electrodomésticos en un hogar fluctuaría entre los 86 a 121 kilogramos respectivamente. A su vez, el incremento de la masa total de electrodomésticos en el Perú aumentó, de entre 275 a 474 toneladas métricas en 2001 a entre 805 a 1134 toneladas métricas en 2019

A realizar un análisis más profundo del inventario de electrodomésticos aproximadamente 67% pertenecen a la categoría de línea blanca (refrigeradoras, hornos microondas y lavadoras), y es la única categoría en la que la masa unitaria promedio se ha mantenido estable o ha aumentado debido a su grado de madurez tecnológica, así como la demanda de los consumidores por equipos más grandes. Por ejemplo, refrigeradoras de mayor capacidad. Respecto a las otras categorías, si se evidencia un decrecimiento de la masa unitaria promedio; pero si se observa un aumento en sus porcentajes de tenencia. Estos resultados pueden ser de utilidad, por ejemplo, para estimar la cantidad de materiales valiosos que se pueden recuperar

de los electrodomésticos tales como metales preciosos. En consecuencia, la cantidad de electrodomésticos en los hogares dependerá de los ratios de adopción y las variaciones de que puedan tener estos equipos debido a cambios tecnológicos y de diseño.

Conclusión 2: Emisiones de gases de efecto invernadero como consecuencia del uso de electrodomésticos en los hogares peruanos

Las emisiones asociadas al uso de electrodomésticos en el sector residencial se incrementaron desde 1,9 millones de toneladas métricas de CO₂e en el 2007 hasta 5,2 millones en el año 2019, siendo importante mencionar que estas emisiones estarán asociadas a factores tales como el porcentaje de posesión de dichos aparatos, el número de horas diarias que los que están encendidos a pesar de ser mucho más eficientes en términos de consumo energético que antes.

La Curva Ambiental de Kuznets, que analiza de forma empírica los valores ambientales versus los económicos, indican que el Perú está pasando una época en las emisiones de GEI están causalmente relacionadas con el crecimiento económico del país, por ejemplo, cuando es analizada la tendencia creciente del porcentaje de penetración de electrodomésticos en los hogares. En ese sentido, es importante mencionar que las emisiones de GEI de los electrodomésticos está relacionadas únicamente con su fase de uso al consumir energía eléctrica, además de que el consumo podría estar subestimado por los electrodomésticos que no se incluyen en la ENAHO.

Además de considerar el consumo de energía, aparecen implicaciones relacionadas con la gestión de los aparatos electrodomésticos al final de su fin de ciclo de vida. Por ejemplo, respecto a la fase de uso/reuso, la comprensión del consumo energético por hogar y su evolución es un dato importante para el diseño y políticas relacionadas con la reducción del consumo de energía y la incorporación de estrategias relacionadas tales como el etiquetado de la eficiencia energética de los electrodomésticos. Respecto a la fase de fin de ciclo de vida, determinar la cantidad de RAEE que se generaría ante una catástrofe o cuántos equipos estarían almacenados en las casas es importante para el diseño de estrategias relacionadas con la minería urbana.

Conclusión 3: El impacto de los cambios tecnológicos sobre el inventario de televisores en el Perú

El mercado de los televisores en el Perú ha sufrido dos cambios tecnológicos significativo que beneficia a los consumidores. La aparición de pantallas más grandes y ligeras en conjunto con la adopción por parte del estado peruano del estándar nipo-brasileño ISDB-T que aprovecha mejor el espectro electromagnético en formato digital trae como resultados una mayor variedad de canales con una mejor calidad de imágenes en pantallas más grandes y ligeras. No obstante, en base a la experiencia de los Estados Unidos y México, es necesario además considerar los posibles impactos sociales y ambientales durante la implementación de procesos de transición tecnológica de magnitud nacional, siendo el más importante el encontrar maneras para recuperar el plomo del vidrio de CRT en vez de ser enterrado en un relleno sanitario industrial, ocupando espacio de forma innecesaria cuando se podría extraer el recurso valioso y reutilizar el residuo ya descontaminado para otras aplicaciones industriales.

Conclusión 4: Flujos e inventarios de CRT-TV en el Perú

Los resultados de análisis de flujo de materiales realizados entre 2005 y 2017, en donde se evidencia el cambio tecnológico, muestran la evolución de los flujos e inventarios entre los cuatro principales actores descritos en el sistema. Entre los resultado más importantes se tiene que el inventario de CRT-TV en los usuarios estaría entre los 2,59 a 5,69 millones de unidades, lo que equivale a 38 a 68 mil toneladas métricas de vidrio de CRT y entre 4.5 y 7.9 mil toneladas métricas de plomo encerrados en los televisores, ya inoperativos que requerirían ser dispuestos de forma segura y para lo cual se requiere todo un plan de fin de ciclo de vida, no solo el método de tratamiento, sino toda la logística inversa necesaria, no solo en las principales ciudades del país, sino a nivel nacional.

Además de realizar una estimación cuantitativa de los flujos e inventarios, se ha intentado replicar un sistema, que, si bien es cierto, está conformado por cuatro tipos de actores diferentes tales como los importadores, intermediarios, usuarios residenciales y usuarios comerciales y del sector público. También debe tenerse en consideración que éstos también están conformados por cantidades considerables

de personas, empresas y organizaciones diversas que, como consecuencia de influencias externas, interactúan entre ellos y toman decisiones que pueden cambiar el comportamiento del sistema de consumo de electrodomésticos. Por lo tanto, la recuperación de materiales valiosos a través de la minería urbana requerirá de la participación de todos los elementos del sistema, tal como lo manifiesta la legislación ambiental relacionada con el manejo de RAEE en el Perú (D.S. N°001-2012-MINAM, 2012).

Conclusión 5: La aplicación de la técnica de pellets autorreductores para la extracción del plomo del vidrio de CRT

Los resultados preliminares indican que la aplicación de esta técnica, utilizada inicialmente en industria siderúrgica, puede ser utilizada para extraer el plomo del vidrio de CRT en una reacción química en fases sólido-gas a diferencia de otras técnicas en las que la reacción se da en fase líquida ocasionando mayor gasto en el uso del agente reductor porque la reacción solo se da en la interfase del vidrio fundido mientras que en caso de la autorreducción cada pellet actúa como un microrreactor. Además, la implementación de esta técnica, verificada desde el punto de vista termodinámico, puede ser realizada con otros reactantes fáciles de conseguir tales como óxido de calcio, carbón vegetal y carboximetilcelulosa o cualquier tipo de aglutinante similar.

RECOMENDACIONES

Para poder generar una industria de recuperación de materiales valiosos a partir de los RAEE será necesario de la participación de todos los actores para que ésta, además de ser rentable y genere puestos de trabajo seguros y bien remunerados, tenga el menor impacto ambiental posible:

En ese sentido, el estado, en su rol de promotor de la ciencia, la tecnología y la innovación, financie proyectos que contribuyan a desarrollar técnicas para esta recuperación de materiales valiosos en vez de solamente ser embarcados para que se realicen en otros países. Se debe tener en consideración que el transporte de estos materiales hasta las plantas de procesamiento también requiere de combustible, que a su vez es fuente de emisiones de GEI.

Respecto al rol de la academia, además de desarrollar procesos para la recuperación de estos materiales valiosos, también debe procurar desarrollar todos los elementos necesarios y compilarlos en un paquete tecnológico para lograr que el proceso de transferencia tecnología sea exitoso. De esta manera, los operadores de RAEE, actores encargados de realizar el desmantelamiento de los equipos y la exportación de los circuitos impresos a empresas extranjeras para la recuperación del oro, plata y cobre que puedan contener, eventualmente podrían realizar estos procesos en el Perú.

Además, es importante el cambio de actitud de los intermediarios, que generalmente trabajan en el sector informal, para que realicen sus operaciones de forma que no solo se queden con los materiales valiosos y que el resto los dispongan con los residuos sólidos de ámbito municipal; sino que también se preocupen por realizar una gestión correcta de estos residuos especiales, pudiendo estar en sus planes una posible formalización en el mediano y largo plazo en términos que se les haga atractivo y no solo consideren que es una carga que les quite competitividad e incluso coexistiendo estos sistema de gestión de residuos, tanto el formal, como el informal, de forma armoniosa (Kahhat et al., 2022).

Finalmente, siempre será importante el rol de los usuarios al considerar que debido a los esfuerzos realizados en las escuelas en donde se promueve el cuidado del ambiente, se forme una ciudadanía que sea consciente que el no solo basta con botar la basura en su lugar y que crean que solo el cambio climático es el único problema ambiental que nos agobia; aunque sí está entre los más importante. En cambio, formar una ciudadanía que también encuentre otras formas, por ejemplo, a través de la gestión correcta de los RAEE, para contribuir con el cuidado del ambiente que los rodea y tengan como resultado una mejor ciudad donde habitar y de esa manera mejorar su calidad de vida.

BIBLIOGRAFÍA

- Accenture. (2012). *Business at its Best: Driving Sustainable Value Creation. Five Imperatives for Corporate CEOs.*
- Acosta, J. (2015). *Tendencias de la dotación de plomo y zinc en el Perú.* <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3330>
- Agrawal, A., Sahu, K. K., & Pandey, B. D. (2004). Recent trends and current practices for secondary processing of zinc and lead . Part I : lead recovery from secondary sources. *Waste Management and Research*, 240–247. <https://doi.org/10.1177/0734242X04044916>
- Alderman, O. L. G., Hannon, A. C., Holland, D., Feller, S., Lehr, G., Vitale, A. J., Hoppe, U., Zimmerman, M. V., & Watenphul, A. (2013). Lone-pair distribution and plumbite network formation in high lead silicate glass, 80PbO·20SiO₂. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(22), 8506–8519. <https://doi.org/10.1039/c3cp51348c>
- Allenby, B., Allen, D., & Davidson, C. (2007). Sustainable engineering. *Environmental Quality Management*, 17(1), 17–26. <https://doi.org/10.1002/tqem.20148>
- Althaf, S., Babbitt, C. W., & Chen, R. (2020). The evolution of consumer electronic waste in the United States. *Journal of Industrial Ecology*, 1–14. <https://doi.org/10.1111/jiec.13074>
- Anderson, D., Clark, C., Foxon, T. J., Gross, R., & Jacobs, M. (2001). *Innovation and the Environment: Challenges and Policy Options for the UK.* [http://www.iccept.ic.ac.uk/pdfs/Innovation report.pdf](http://www.iccept.ic.ac.uk/pdfs/Innovation%20report.pdf)
- Andreola, F., Barbieri, L., Corradi, A., & Lancellotti, I. (2007). CRT glass state of the art. A case study: Recycling in ceramic glazes. *Journal of the European Ceramic*

Society, 27(2–3), 1623–1629.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.009>

- Anning-Dorson, T. (2018). Innovation and competitive advantage creation: The role of organisational leadership in service firms from emerging markets. *International Marketing Review*, 35(4), 580–600. <https://doi.org/10.1108/IMR-11-2015-0262>
- Aoe, T., Michiyasu, T., Matsuoka, Y., & Shikata, A. (2003). EcoDesign200313B-4 Case Study for Calculation of Factor X (Eco-Efficiency). *Proceedings of EcoDesign2003: Third International Symposium on Environmental Conscious Design and Inverse Manufacturing Tokyo, Japan, December 8-11, 2003, 2001*.
- Augiseau, V., & Barles, S. (2016). Studying construction materials flows and stock: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 153–164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.002>
- Bakshi, B. R., & Fiksel, J. (2003). The quest for sustainability: Challenges for process systems engineering. *AIChE Journal*, 49(6), 1350–1358. <https://doi.org/10.1002/aic.690490602>
- Baldé, C. P., V., F., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *The Global E-waste Monitor 2017*.
- Barrantes, R. (2008). *Investigación. Un camino al conocimiento. San José, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia*. (E. U. E. a Distancia (ed.)).
- Bhakar, V., Agur, A., Digalwar, A. K., & Sangwan, K. S. (2015). Life cycle assessment of CRT, LCD and LED monitors. *Procedia CIRP*, 29, 432–437. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.003>
- Bleischwitz, R., Giljum, S., Kuhndt, M., & Schmidt-Bleek, F. (2009). *Eco-innovation - putting the EU on the path to a resource and energy efficient economy*.
- Braga, R. S., Takano, C., & Moura, M. B. (2007). *Prereduction of self-reducing pellets of manganese ore*. 34(4). <https://doi.org/10.1179/174328107X155349>
- Chen, M., Zhang, F. S., & Zhu, J. (2009). Lead recovery and the feasibility of foam glass production from funnel glass of dismantled cathode ray tube through

pyrovacuum process. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2–3), 1109–1113.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.084>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2013). *Los cuadros de oferta y utilización, las matrices de insumo-producto y las matrices de empleo*.

Comisión Mundial del Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas (WCED). (1987). Chapter 2: Towards Sustainable Development. In *Our Common Future* (pp. 1–3).

Cossu, R., Salieri, V., & Bisinella, V. (2012). Introducción: The Urban Mining Concept. In R. Cossu, V. Salieri, & V. Bisinella (Eds.), *URBAN MINING: A global cycle approach to resource efficiency from solid waste*. CISA.

Crosbie, T. (2008). Household energy consumption and consumer electronics: The case of television. *Energy Policy*, 36(6), 2191–2199.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.010>

D.L. N° 1278. (2016). *Sólidos, Decreto Legislativo que Aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos*.

D.L. N° 1278. (2017). Decreto Legislativo que prueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. *Diario Oficial El Peruano*, 17.

D.L. N°1501. (2020). *Decreto Legislativo que Modifica el Decreto Legislativo N°1278, que Aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos*.

D.S. 007-2021-MTC. (2021). Transportes y Comunicaciones. In *Decreto Supremo que modifica el numeral 15.1 del artículo 15 del Plan Maestro para la Implementación de la Televisión Digital Terrestre en el Perú, aprobado por Decreto Supremo N° 017-2010-MTC*. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-7341-4_8

D.S. 057-2004-PCM. (2004). *Reglamento de la Ley N°27314, Ley General de Residuos Sólidos*.

D.S. N° 017-2010-MTC. (2010). *Decreto Supremos que aprueba el Plan Maestro para la Implementación de la Televisión Digital Terrestre en el Perú y modifica el Reglamento de la Ley de Radio y Televisión, aprobado por Decreto Supremo*

N°005-2005-MTC.

D.S. N° 020-2014-MTC. (2014). *Decreto Supremo que Modifica el artículo 57 del Reglamento de la Ley N° 27943, Ley del Sistema Portuario Nacional aprobado por Decreto Supremo N° 003-2004-MTC y modifica el Decreto Supremo N° 019-2010-MTC.*

D.S. N° 020-2017-MTC. (2017). *Decreto Supremo que modifica el Plan Maestro para la Implementación de la Televisión Digital Terrestre en el Perú, aprobado por Decreto Supremo N° 017-2010-MTC.*

D.S. N°001-2012-MINAM. (2012). *Reglamento nacional para la gestión y manejo de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.*
http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_001-2012-minam.pdf

D.S. N°009-2019-MINAM. (2019). Aprueban el Régimen Especial de Gestión y Manejo de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. *Decreto Supremo N° 009-2019-MINAM*, 1–10. www.psi.gob.pe

de Jesus, A., Antunes, P., Santos, R., & Mendonça, S. (2019). Eco-innovation pathways to a circular economy: Envisioning priorities through a Delphi approach. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1494–1513.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.049>

de Wit, M., Hoogzaad, J., Ramkumar, S., Friedl, H., & Douma, A. (2018). *The Circularity Gap report*. https://www.viawater.nl/files/circular_gap.pdf

Dearing, A. (2000). Sustainable innovation: Drivers and barriers. In Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (Ed.), *Ecoinnovation and the Environment* (pp. 103–121). OECD Publishing.
<https://www.oecd.org/innovation/inno/2105727.pdf>

DigiTAG. (2008). *Analogue switch-off Learning from experiences in Europe*.
<http://www.digitag.org/ASO/ASOHandbook.pdf>

DoITPoMS - University of Cambridge. (2008). *Ellingham Diagrams*.
https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/ellingham_diagrams/index.php

- Dourojeanni, A. (1999). La dinámica del desarrollo sustentable y sostenible. XV Congreso Venezolano de La Ciencia Del Suelo, 1–26. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/19862>
- E-Scrap News. (2017). *Nulife closing down and giving up on US business*. <https://resource-recycling.com/e-scrap/2017/09/14/nulife-closing-giving-us-business/>
- Eccles, R. G., Perkins, K. M., & Serafeim, G. (2012). How to become a sustainable company. *MIT Sloan Management Review*, 53(4), 43–50.
- Eisele, T. C., & Kawatra, S. K. (2010). A review of binders in iron ore pelletization. *Mineral Processing and Extrative Metallurgy Review: An International Journal*, 24(1), 1–90.
- Erzat, A., & Zhang, F. (2014). Evaluation of lead recovery efficiency from waste CRT funnel glass by chlorinating volatilization process. *Environmental Technology*, 35, 2774–2780. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.921731>
- Espinoza, O., Villar, L., Postigo, T., & Villaverde, H. (n.d.). *Diagnóstico del Manejo de los Residuos Electrónicos en el Perú Informe Final, 31 de Enero 2008 Equipo de investigación*.
- Estrada-Ayub, J. A., & Kahhat, R. (2014). Decision factors for e-waste in Northern Mexico: To waste or trade. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.02.012>
- Feres, J. C., & Medina, F. (2001). Hacia un sistema integrado de encuestas de hogares en los países de América Latina. In *United Nations, CEPAL* (pp. 1–50).
- Fischer-Kowalski, M., & Hüttler, W. (2008). Society's Metabolism: The Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part II, 1970-1998. *Journal of Industrial Ecology*, 2, 107–136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1162/jiec.1998.2.1.61>
- Flyvberg, B. (2011). Case Study. In N. Denzin & Y. Lincoln (Eds.), *The Sage Handbook of Qualitative Research* (pp. 301–316). SAGE Publications.
- Forbes México. (2014). *Apagón analógico, la TV ya no será la misma*. <https://www.forbes.com.mx/apagon-analogico-la-tv-ya-sera-la-misma/>

- Forti, V., Baldé, C. P., & Kuehr, R. (2018). *E-Waste Statistics. Guidelines on Classification, Reporting and Indicators* (United Nations University & V. SCYCLE (eds.); Second Ed.).
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *Observatorio Mundial de los Residuos Electrónicos – 2020: Cantidades, flujos y potencial de la economía circular*.
- García-Torres, S., Kahhat, R., & Santa-Cruz, S. (2017). Methodology to characterize and quantify debris generation in residential buildings after seismic events. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.11.006>
- Given, L. M. (2008). *The SAGE Encyclopedia of Qualitative Research Methods* (L. M. Given (ed.)). https://books.google.com/books?id=y_OnAQAAAMAJ&pgis=1
- Goldstein, I. (2007). Reseña “Colapso: por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen” de Jared Diamond. *Revista Geográfica Venezolana*, 48(2), 311–318. <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730366008.pdf>
- González, B. (2005). *El Universal - Ciencia - Millones de TV's se jubilan sin plan de reciclaje*. <https://archivo.eluniversal.com.mx/ciencia/2015/tv-jubilan-reciclaje-99946.html>
- González, M. D., & de Melo, M. A. (2004). Planificación interorganizacional y desarrollo emprendedor: un estudio de caso. *III Conferencia Internacional de Pesquisa Em Empreendedorismo Na América Latina (CIPEAL)*, 1–16. http://www.genesis.puc-rio.br/media/biblioteca/Planificacion_interorganizaci.pdf
- Graedel, T. E., & Allenby, B. (2009). *Industrial Ecology* (3ra Ed.). Prentice Hall.
- Graedel, T. E., Harper, E. M., Nassar, N. T., Nuss, P., & Reck, B. K. (2015). Criticality of metals and metalloids. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(14), 4257–4262. <https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112>
- Grause, G., Yamamoto, N., Kameda, T., & Yoshioka, T. (2014). Removal of lead from cathode ray tube funnel glass by chloride volatilization. *International Journal of*

Environmental Science and Technology, 11(4), 959–966.
<https://doi.org/10.1007/s13762-013-0286-0>

Gudenau, H. W., Senk, D., Wang, S., Martins, K. D. E. M., & Stephany, C. (2005). *Research in the Reduction of Iron Ore Agglomerates Including Coal and C-containing Dust*. 45(4), 603–608.

Gusukuma, M., & Kahhat, R. (2018). Electronic waste after a digital TV transition: Material flows and stocks. *Resources, Conservation and Recycling*, 138(July), 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.014>

Gusukuma, M., Kahhat, R., & Cáceres, K. (2022). Evolution of the stock of electrical and electronic equipment in the Peruvian residential sector. *Journal of Industrial Ecology*, 1–12. <https://doi.org/10.1111/jiec.13231>

Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., Weisz, H., & Winiwarter, V. (2004). Progress towards sustainability? What the conceptual framework of material and energy flow accounting (MEFA) can offer. *Land Use Policy*, 21(3), 199–213. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2003.10.013>

Harrison, B., & Scholand, M. (2014). *Review of Ecodesign and Energy Labelling Regulations for Televisions and Draft Regulation for Electronic Displays : Discussion Paper. November.*

Hart, S. L., Milstein, M. B., & Caggiano, J. (2003). Creating sustainable value. *Academy of Management Executive*, 17(2), 56–69. <https://doi.org/10.5465/ame.2003.10025194>

Heidari, M., & Patel, M. (2020). Stock modelling and cost-effectiveness analysis of energy-efficient household electronic appliances in Switzerland. *Energy Efficiency*, 13(4), 571–596. <https://doi.org/10.1007/s12053-020-09843-x>

Herat, S. (2008). Recycling of cathode ray tubes (CRTs) in electronic waste. *Clean - Soil, Air, Water*, 36(1), 19–24. <https://doi.org/10.1002/clen.200700082>

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la Investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mc Graw-Hill Interamericana.

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación (6ta Edición)*. McGraw-Hill Interamericana.
- Hieronimi, K., Kahhat, R., & Williams, E. (2012). E-waste management: From waste to resource. In *E-Waste Management: From Waste to Resource* (Vol. 9780203116). <https://doi.org/10.4324/9780203116456>
- Hiroyoshi, N., Prin, H., Takaya, Y., & Ito, M. (2013). Application of reductive melting process of CRT glass for recovering valuable metals from PCB waste. *Asean++ 2013 Moving Forward*, 8–10.
- Hojnik, J., & Ruzzier, M. (2016). What drives eco-innovation? A review of an emerging literature. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 19, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.09.006>
- Hu, B., & Hui, W. (2017). Extraction of lead from waste CRT funnel glass by generating lead sulfide – An approach for electronic waste management. *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.048>
- Huang, T., Shi, F., Tanikawa, H., Fei, J., & Han, J. (2013). Materials demand and environmental impact of buildings construction and demolition in China based on dynamic material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 91–101.
- ICER. (2004). *Materials recovery from waste cathode ray tubes (CRTs)*. [https://www.glass-ts.com/userfiles/files/2004 - WRAP - Materials recovery from waste cathode ray tubes \(CRTs\).pdf](https://www.glass-ts.com/userfiles/files/2004 - WRAP - Materials recovery from waste cathode ray tubes (CRTs).pdf)
- Iniaghe, P. O., & Adie, G. U. (2015). Management practices for end-of-life cathode ray tube glass: Review of advances in recycling and best available technologies. *Waste Management and Research*, 33(11), 947–961. <https://doi.org/10.1177/0734242X15604212>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (n.d.). *Microdatos. Consulta por Encuesta*. <http://iinei.inei.gob.pe/microdatos/>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2016). *COU_2007_Corrientes_101 Prod_x_101 Activ (2007-2014)*.

- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2019). *Ficha técnica. Encuesta Nacional de Hogares sobre Condiciones de Vida y Pobreza 2019*.
 iinei.inei.gob.pe/iinei/srienahto/Descarga/FichaTecnica/687-Ficha.pdf
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2020a). *Cuentas Nacionales 1950-2019. Cuentas de Bienes y Servicios y Cuentas por Sectores Institucionales. Año Base 2007*.
<https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/economia/>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2020b). *Perú: Estimaciones y proyecciones de población por departamento, provincia y distrito, 2018 - 2020*.
 1–110.
- Instituto Quanto. (2015). *Estudio de Iluminación en el Perú*.
https://united4efficiency.org/wp-content/uploads/2017/02/00-Informe-Final-01Feb2016_Eficiencia-Energética-final.pdf
- Jaramillo, J. (2015). Apagón analógico en México. *CiENCiA UALN*, 18(72), 8-14.
CiENCiA, 18(72), 8–14.
- Jolkkonen, M. (2000). *Standard Thermodynamic Properties of Chemical Substances*.
http://www.update.uu.se/~jolkkonen/pdf/CRC_TD.pdf
- Kahhat, R., Miller, T. R., Ojeda-Benitez, S., Cruz-Sotelo, S. E., Jauregui-Sesma, J., & Gusukuma, M. (2022). Proposal for used electronic products management in Mexicali. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 13(January), 200065.
<https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200065>
- Kahhat, R., & Williams, E. (2009a). Product or waste? Importation and end-of-life processing of computers in Peru. *Environmental Science and Technology*, 43(15), 6010–6016. <https://doi.org/10.1021/es8035835>
- Kahhat, R., & Williams, E. (2009b). Product or Waste? Importation and End-of-Life Processing of Computers in Peru. *Environmental Science & Technology*, 43(15), 6010–6016.
- Kahhat, R., & Williams, E. (2010). Adoption and disposition of new and used computers in Lima, Peru. *Resources, Conservation and Recycling*.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.10.006>

Kahhat, R., & Williams, E. (2012). Materials flow analysis of e-waste: Domestic flows and exports of used computers from the United States. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.07.008>

Kasulaitis, B. V., Babbitt, C. W., Kahhat, R., Williams, E., & Ryen, E. G. (2015). Evolving materials, attributes, and functionality in consumer electronics: Case study of laptop computers. *Resources, Conservation and Recycling*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.03.014>

Kinaev, N. N., Jak, E., & Hayes, P. C. (2005). Kinetics of reduction of lead smelting slags with solid carbon. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 34(2), 150–157. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0692.2005.00733.x>

Kleemann, F., Lederer, J., Aschenbrenner, P., Rechberger, H., Kleemann, F., Lederer, J., Aschenbrenner, P., Rechberger, H., & Fellner, J. (2016). A method for determining buildings' material composition prior to demolition. *Building Research & Information*, 44(1), 51–62. <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.979029>

Kohara, S., Ohno, H., Takata, M., Usuki, T., Morita, H., Suzuya, K., Akola, J., & Pusztai, L. (2010). Lead silicate glasses: Binary network-former glasses with large amounts of free volume. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 82(13), 1–7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.134209>

Köhler, A. R. (2013). Challenges for eco-design of emerging technologies: The case of electronic textiles. *Materials and Design*, 51(February), 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.012>

Korzenski, M. B., Chen, T., & Jiang, P. (2015). *Removal of lead from solid materials*.

Kowitzarangkul, P.; Babich, A.; Senk, D. (2014). Reduction Kinetics of Self-Reducing Pellets of Iron Ore. *AISTech 2014 Proceedings*, 0, 611–622.

Kumar, A., Holuszko, M., & Espinosa, D. C. R. (2017). E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 32–42.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.018>

- Kuncoro, W., & Suriani, W. O. (2018). Achieving sustainable competitive advantage through product innovation and market driving. *Asia Pacific Management Review*, 23(3), 186–192. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2017.07.006>
- Lecler, M., Zimmermann, F., Silvente, E., Clerc, F., & Chollot, A. (2015). Exposure to hazardous substances in Cathode Ray Tube (CRT) recycling sites in France. *Waste Management*, 39, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.027>
- Lee, C. H., Chang, S. L., Wang, K. M., & Wen, L. C. (2000). Management of scrap computer recycling in Taiwan. *Journal of Hazardous Materials*, 73(3), 209–220. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(99\)00191-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00191-0)
- Lee, K., & Yoo, J. (2019). How does open innovation lead competitive advantage? A dynamic capability view perspective. *PLoS ONE*, 14(11), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223405>
- Lepawsky, J., Araujo, E., Davis, J. M., & Kahhat, R. (2017). Best of two worlds? Towards ethical electronics repair, reuse, repurposing and recycling. *Geoforum*, 81, 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.02.007>
- Lepawsky, J., & Billah, M. (2011). Making Things that (Un)make Things: Waste-Value Relations and the Bangladeshi Rubbish Electronics Industry. *Geografiska Annaler: Series B, Human Geography*, 93(2), 121–139. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.02.012>
- Lepawsky, J., & Mc Nabb, C. (2010). Mapping international flows of electronic waste. *Canadian Geographer/Le Géographe Canadien*, 54(2), 177–195.
- Ley N°1672. (2013). *Por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de Residuos de Artefactos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), y se dictan otras disposiciones.* https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/e-book_rae_/Ley_1672_de_2013.pdf
- Ling, T. C., & Poon, C. S. (2014). Use of recycled CRT funnel glass as fine aggregate in

- dry-mixed concrete paving blocks. *Journal of Cleaner Production*, 68, 209–215.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.084>
- Liu, Jingru, Wang, M., Zhang, C., Yang, M., & Li, Y. (2020). Material flows and in-use stocks of durable goods in Chinese urban household sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104758.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104758>
- Liu, Junxiao, Xu, X., Wu, K., Piao, Z., Huang, J., Guo, Y., Li, W., Zhang, Y., Chen, A., & Huo, X. (2011). Association between lead exposure from electronic waste recycling and child temperament alterations. *NeuroToxicology*, 32(4), 458–464.
<https://doi.org/10.1016/j.neuro.2011.03.012>
- Liu, M. H., Liang, Y. Q., Jian, S., & Zhang, X. D. (2013). Flotation of a Copper-Lead Sulfide-Oxide Ore : Using a Combined Depressant for Galena and an Effective Activator D2 for Copper Oxide Minerals. *Advanced Materials Research*, 634–638, 3368–3374. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.634-638.3368>
- Lu, X., Ning, X. an, Chen, D., Chuang, K. H., Shih, K., & Wang, F. (2018). Lead extraction from Cathode Ray Tube (CRT) funnel glass: Reaction mechanisms in thermal reduction with addition of carbon (C). *Waste Management*, 76, 671–678.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.010>
- Lu, X., Shih, K., Liu, C., & Wang, F. (2013). Extraction of metallic lead from cathode ray tube (CRT) funnel glass by thermal reduction with metallic iron. *Environmental Science and Technology*, 47(17), 9972–9978.
<https://doi.org/10.1021/es401674d>
- Lv, J., Yang, H., Jin, Z., Ma, Z., & Song, Y. (2016). Feasibility of lead extraction from waste Cathode-Ray-Tubes (CRT) funnel glass through a lead smelting process. *Waste Management*, 57, 198–206.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.010>
- Maier, D., Maier, A., Aşchilean, I., Anastasiu, L., & Gavriş, O. (2020). The relationship between innovation and sustainability: A bibliometric review of the literature. *Sustainability (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/SU12104083>

- Mantovani, M. C., & Takano, C. (2000). *The Strength and the High Temperature Behaviors of Self-reducing Pellets Containing EAF Dust*. 40(3), 224–230.
- Matthews, H.S., Hendrickson, C., & Matthews, D. (2015). *Life Cycle Assessment: Quantitative Approach for Decisions that Matters*.
- Matthews, H Scott, Hendrickson, C. T., & Matthews, D. H. (2015). *Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter*.
- Mayorga, M. (2011). *La televisión digital terrestre en el Perú: contexto actual y políticas públicas para su desarrollo* [Pontificia Universidad Católica del Perú]. http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/1757/MAYORGA_MONTOYA_MARCO_TELEVISION_DIGITAL.PDF?sequence=1&isAllowed=y
- Mebratu, D. (1998). Sustainability and sustainable development: Historical and conceptual review. *Environmental Impact Assessment Review*, 18(6), 493–520. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(98\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(98)00019-5)
- Meylan, G., Reck, B. K., Rechberger, H., Graedel, T. E., & Schwab, O. (2017). Assessing the Reliability of Material Flow Analysis Results: The Cases of Rhenium, Gallium, and Germanium in the United States Economy. *Environmental Science and Technology*, 51(20), 11839–11847. <https://doi.org/doi:10.1021/acs.est.7b03086>.
- Miller, R. T., Duan, H., Gregory, J., Kahhat, R., & Kirchain, R. (2016). Quantifying Domestic Used Electronics Flows using a Combination of Material Flow Technologies: a US Case Study. *Environmental Science and Technology*, 50(11), 5711–5719. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00079>
- MINAM. (2021). *REPORTE SECTORIAL DE GASES EFECTO INVERNADERO – 2012*. <http://infocarbono.minam.gob.pe/annios-reportes-sectoriales/2012/>
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2016). *La iluminación representa el 19% de la facturación eléctrica en el hogar*. http://www.minem.gob.pe/_detallenoticia.php?idSector=12&idTitular=7389
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2021). INGEI 2016: Inventario Nacional de Gases

de Efecto Invernadero del año 2016 y actualización de las estimaciones de los años 2000, 2005, 2010, 2012 y 2014. *Normativa*. <http://www.ambiente.gob.ec/el-ministerio/>

Miyoshi, H., Chen, D., & Akai, T. (2004). A Novel Process Utilizing Subcritical Water to Remove Lead from Wasted Lead Silicate Glass. *Chemistry Letters*, 33(8), 956–957. <https://doi.org/10.1246/cl.2004.956>

Mizuno, M., Takahashi, M., Takaishi, T., & Yoko, T. (2005). Leaching of lead and connectivity of plumbate networks in lead silicate glasses. *Journal of the American Ceramic Society*, 88(10), 2908–2912. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00508.x>

Mostaghel, S., & Samuelsson, C. (2010). Metallurgical use of glass fractions from waste electric and electronic equipment (WEEE). *Waste Management*, 30(1), 140–144. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.025>

Mourão, M. B., & Takano, C. (2003). Self-reducing pellets for ironmaking: Reaction rate and processing. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 24(3–4), 183–202. <https://doi.org/10.1080/714856821>

Mueller, J. R., Boehm, M. W., & Drummond, C. (2012). Direction of CRT waste glass processing: Electronics recycling industry communication q. *Waste Management*, 32(8), 1560–1565. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.004>

Musson, S. E., Jang, Y., Townsend, T. G., & Chung, I. (2000). Characterization of Lead Leachability from Cathode Ray Tubes Using the Toxicity Characteristic Leaching Procedure. *Environmental Science & Technology*, 34(20), 4376–4381.

Nadel, S. (2019). *Can Innovation Save the Environment? – Mondes Sociaux*. Mondes Sociaux. <https://sms.hypotheses.org/17639>

Nassar, N. T., Xiaoyue, D., & Graedel, T. E. (2015). Criticality of the Rare Earth Elements. *Journal of Industrial Ecology*, 19(6), 1044–1054. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jiec.12237>

Newell, R. G., & Siikamäki, J. (2014). Nudging Energy Efficiency Behavior: The Role of

- Information Labels. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1(4), 555–598. <https://doi.org/https://doi.org/10.1086/679281>
- Ng, S. (2012). A brief history of entertainment technologies. *Proceedings of the IEEE*, 100(SPL CONTENT), 1386–1390. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2189805>
- Nidumolu, R., Prahalad, C. K., & Rangaswami, M. R. (2009). Why Sustainability Is Now the Key Driver of Innovation. *Harvard Business Review*, September 2009. <https://hbr.org/2009/09/why-sustainability-is-now-the-key-driver-of-innovation>
- Nnorom, I. C., Osibanjo, O., & Ogwuegbu, M. O. C. (2011). Global disposal strategies for waste cathode ray tubes. *Resources, Conservation & Recycling*, 55(3), 275–290. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.007>
- Nobel-Price. (2019). *Wassily Leontief - Facts - NobelPrize.org*.
- OECD/Eurostat. (2018). Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation. In *The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities*. <https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>
https://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/oslo-manual-2018_9789264304604-en
[https://www.oecd-ilibrary.org/scie](https://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/oslo-manual-2018_9789264304604-en)
- OECD Green Growth Studies. (2010). *Eco-Innovation in Industry: Enabling Green Growth (Executive Summary)*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264077225-en>
- OECD Green Growth Studies. (2011). *Fostering Innovation for Green Growth (Executive Summary)*. OECD Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264119925-en>.
- Okada, T., Inano, H., & Hiroyoshi, N. (2012). Recovery and immobilization of lead in cathode ray tube funnel glass by a combination of reductive and oxidative melting processes. *Journal of the Society for Information Display*, 20(9), 508–516. <https://doi.org/10.1002/jsid.113>

- Okada, T., & Yonezawa, S. (2013). Energy-efficient modification of reduction-melting for lead recovery from cathode ray tube funnel glass. *Waste Management*, 33(8), 1758–1763. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.04.009>
- Okada, T., & Yonezawa, S. (2014). Reduction-melting combined with a Na₂CO₃ flux recycling process for lead recovery from cathode ray tube funnel glass. *Waste Management*, 34(8), 1470–1479. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.012>
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). (2008). *Material Flow Analysis*. https://www.unido.org/sites/default/files/2008-05/PR-3-Textbook-heft3_14072003neu_0.pdfhttps://www.unido.org/sites/default/files/2008-05/PR-3-Textbook-heft3_14072003neu_0.pdf
- Ormazábal, K. (2003). *Quesnay and Leontief on Capital and Income*.
- Park, J., Hong, S., Kim, I., Lee, J., & Hur, T. (2011). Dynamic material flow analysis of steel resources in Korea. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(4), 456–462. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.12.007>
- PC Magazine. (2008). *How to Buy a Digital Converter Box*. <https://www.pcmag.com/archive/how-to-buy-a-digital-converter-box-232399>
- Pillihuaman, A., & Shishido, M. (2012). Utilización de pellets autorreductores en la producción de aleaciones (hierro-cromo alto carbono). *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgica y Geográfica*, 15, 91–98.
- PNUMA. (1996). *Life Cycle Assessment. What it is and how to do it*. http://www.sciencenetwork.com/lca/unep_guide_to_lca.pdf
- Pontificia Universidad Católica del Perú, & Carnegie Mellon University, G. D. I. (2021). *Economic Input-Output Life Cycle Assessment (EIO-LCA) Peru (100 sectors) Purchaser model*. <http://www.eiolca.net/>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2014). *Eco-Innovación: Una Oportunidad de Negocios*.

https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/bc_for_ecoinnovation_spanish.pdf

Public Law 109–171 Title III. (2005). *Digital Television Transition and Public Safety of 2005*.

Public Law 111–4. (2009). *DTV Delay Act*.

Pulgarín-Molina, S. A., & Guerrero, N. A. (2017). Innovation and competitive advantage studies in Colombia: findings from organizational culture and business model. *Dimensión Empresarial*, 15. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15665/rde.v15i2.1023>

Qi, Y., Xiao, X., Lu, Y., Shu, J., Wang, J., & Chen, M. (2019). Cathode ray tubes glass recycling: A review. *Science of the Total Environment*, 650, 2842–2849. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.383>

R.S. N° 019-2009-MTC. (2009). *Adoptan estándar de televisión digital terrestre para el Perú*.

Recycling Today. (2017). *Pennsylvania denies Nulife Glass a variance for CRTs - Recycling Today*. <https://www.recyclingtoday.com/article/nulife-crt-variance/>

Redacción Perú21. (2020). *Coronavirus en Perú: Problemas para congelar alimentos en hogares habrían contribuido a aglomeraciones*. Perú21; NOTICIAS PERU21. <https://peru21.pe/economia/problemas-para-congelar-alimentos-en-hogares-habrian-contribuido-a-aglomeraciones-noticia/>

Reed, T. (2006). *The Boudouard Reaction*. https://www.gasifiers.bioenergylists.org/files/boudouard_reaction.xls

René, P.-M. (n.d.). *México: TV viejas. Basura que es un peligro – Economía Circular y Minería Urbana*. Retrieved February 13, 2021, from <https://mineriaurbana.org/2015/12/16/mexico-tv-viejas-basura-que-es-un-peligro/>

Rojas, J. (2016). *Entrevista personal*.

Ryen, E. G., Babbitt, C. W., & Williams, E. (2015). Consumption-weighted life cycle assessment of a consumer electronic product community. *Environmental*

Science & Technology, 49(4), 2549–2559.

Sasai, R. Y. O., Kubo, H., Kamiya, M., & Itoh, H. (2008). Development of an Eco-Friendly Material Recycling Process for Spent Lead Glass Using a Mechanochemical Process and Na₂ EDTA Reagent. *Environmental Science and Technology*, 42(11), 4159–4164.

Schaper, M. (2017). *Ecoinnovación y producción verde. Una revisión sobre las políticas de América Latina y el Caribe* (S. Rovira, J. Patiño, & M. Schaper (eds.)). <http://hdl.handle.net/11362/40968>

Schiederig, T., Tietze, F., & Herstatt, C. (2011). What is Green Innovation? – A Quantitative Literature Review. *The XXII ISPIM Conference 2011, June*.

Shaw Environmental. (2013). *An Analysis of the Demand for CRT Glass Processing in the U.S.* [https://www.recyclingtoday.com/FileUploads/file/An Analysis of the Demand for CRT Glass Processing in the U S.pdf](https://www.recyclingtoday.com/FileUploads/file/An%20Analysis%20of%20the%20Demand%20for%20CRT%20Glass%20Processing%20in%20the%20U.S.pdf)

Shi, X., Li, G., Xu, Q., He, W., & Liang, H. (2011). Research progress on recycling technology of end-of-life CRT glass. *Materials Review*, 11, 129–132.

Silva, A. (2018). Una mirada regional al acceso y tenencia de tecnologías de la información y comunicaciones – TIC, a partir de los censos | Enfoques | Comisión Económica para América Latina y el Caribe. *CEPAL*, 24, 115–135.

Statista. (2021a). *Consumer Electronics - Worldwide | Statista Market Forecast*. <https://www.statista.com/outlook/dmo/ecommerce/electronics/consumer-electronics/worldwide?currency=usd#sales-channels>

Statista. (2021b). *Household Appliances - Worldwide | Statista Market Forecast*. <https://www.statista.com/outlook/dmo/ecommerce/electronics/household-appliances/worldwide#revenue>

Steubing, B., Böni, H., Schluep, M., Silva, U., & Ludwig, C. (2010). Assessing computer waste generation in Chile using material flow analysis. *Waste Management*, 30(3), 473–482. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.007](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.007)

Suarez Fernandez de Miranda, S., Córdoba-Roldán, A., Aguayo-González, F., & Ávila-Gutiérrez, M. J. (2021). Neuro-competence approach for sustainable

engineering. *Sustainability* (Switzerland), 13(8).
<https://doi.org/10.3390/su13084389>

Superintendencia Nacional de Administración Tributaria (SUNAT). (n.d.). *Detallado por Subpartida Nacional*. <http://www.aduanet.gob.pe/aduanas/informae/aepartmen.htm>

Szilagyi, A., Mocan, M., Verniquet, A., Churican, A., & Rochat, D. (2018). Eco-innovation, a Business Approach towards Sustainable Processes, Products and Services. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 238, 475–484.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2018.04.026>

Takano, C., & Mourão, M. B. (2001). Comparison of High Temperature Behavior of Self-Reducing Pellets Produced from Iron Ore with that of Dust from Sintering Plant. *ISIJ International*, 41(Suppl), S22–S26.
https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.Suppl_S22

Taylor, J. (2002). Sustainable Development: A Dubious Solution in Search of a Problem. *Policy Analysis*.

Teunissen, K. C., Schoenmakers, T. J. M., & Olde, L. J. De. (2010). 9 . 4 : Invited Paper : EcoDesign for TV Displays Environmentally-conscious Design. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 116–119.

The Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition*.
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>

Total Materia. (2015). *The KIVCET Smelting Process*.
<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=366>

Turkle, S. (2017). *Alone together: Why we expect more from technology and less from each other*. Hachette UK.

Urbancova, H. (2013). Competitive Advantage Achievement through Innovation and Knowledge. *Journal of Competitiveness*, 5(1), 82–96.
<https://doi.org/10.7441/joc.2013.01.06>

- Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Larrea-Gallegos, G., & Ziegler-Rodriguez, K. (2019). Peru's road to climate action: Are we on the right path? The role of life cycle methods to improve Peruvian national contributions. *Science of the Total Environment*, 659, 249–266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.322>
- Veit, H. M., de Olivera, E., & Richter, G. (2015). Thermal processes for lead removal from the funnel glass of CRT monitors. *Rem: Revista Escola de Minas*, 68(3), 287–294. <https://doi.org/10.1590/0370-44672014680141>
- Vence, X., & Pereira, Á. (2019). Eco-innovation and Circular Business Models as drivers for a circular economy. *Contaduria y Administracion*, 64(1), 1–19. <https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2019.1806>
- Wagner, M. A., Huisman, J., Løvik, A. N., Habib, H., Mähltitz, P., & van der Voet, E. (2021). Methodology to prospect electronics compositions and flows, illustrated by material trends in printed circuit boards. *Journal of Cleaner Production*, 307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127164>
- Wang, P. W., & Zhang, L. (1996). Structural role of lead in lead silicate glasses derived from XPS spectra. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 194(1–2), 129–134. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(95\)00471-8](https://doi.org/10.1016/0022-3093(95)00471-8)
- Williams, E., Kahhat, R., Allenby, B., Kavazanjian, E., Kim, J., & Xu, M. (2008). Environmental, social, and economic implications of global reuse and recycling of personal computers. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/doi:10.1021/es702255z>
- Williams, E., Kahhat, R., Bengtsson, M., Hayashi, S., Hotta, Y., & Totoki, Y. (2013). Linking informal and formal electronics recycling via an interface organization. *Challenges*, 4(2), 136–153.
- Williams, E., Kahhat, R., & Kaneko, S. (2012). Bounding scenario analysis: A case study of future energy demand of China's steel sector. *2012 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*, 1–6.
- Witkowska, A., Rybicki, J., & Cicco, A. Di. (2005). Structure of partially reduced xPbO (1 - X)SiO₂ glasses: Combined EXAFS and MD study. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 351(5), 380–393. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2005.01.036>

- Xu, Q., Li, G., He, W., Huang, J., & Shi, X. (2012). Cathode ray tube (CRT) recycling : Current capabilities in China and research progress. *Waste Management*, 32(8), 1566–1574. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.009>
- Yoshida, A., Tasaki, T., & Terazono, A. (2009). Material flow analysis of used personal computers in Japan. *Waste Management*, 29(5), 1602–1614.
- Yu, G., Tian, X. miao, Wu, Y. feng, Zhe, T., & Lei, L. (2016). Recent development of recycling lead from scrap CRTs: A technological review. *Waste Management*, 57, 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.004>
- Yurdakul, M., & Kazan, H. (2020). Effects of eco-innovation on economic and environmental performance: Evidence from Turkey’s manufacturing companies. *Sustainability (Switzerland)*, 12(8), 3167. <https://doi.org/10.3390/SU12083167>
- Zhang, B., & Xue, Z. (2013). *Kinetics Analyzing of Direction Reduction on Manganese Ore Pellets Containing Carbon*. 2013(July), 116–120. <https://doi.org/10.4236/ijnm.2013.23017>
- Zhang, W., Yang, J., Wu, X., Hu, Y., Yu, W., Wang, J., Dong, J., Li, M., Liang, S., Hu, J., & Kumar, R. V. (2016). A critical review on secondary lead recycling technology and its prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 108–122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.046>
- Zhilyaev, D., Cimpan, C., Cao, Z., Liu, G., Askegaard, S., & Wenzel, H. (2021). The living, the dead, and the obsolete: A characterization of lifetime and stock of ICT products in Denmark. *Resources, Conservation and Recycling*, 164(August 2020), 105117. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105117>
- Zhu, X., Lane, R., & Werner, T. T. (2017). Modelling in-use stocks and spatial distributions of household electronic devices and their contained metals based on household survey data. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.002>

RELACIÓN DE ANEXOS

ANEXO 1: RESUMENES DE LOS PRINCIPALES ARTÍCULOS.....	110
--	-----



ANEXO 1: RESUMENES DE LOS PRINCIPALES ARTÍCULOS

Gusukuma, M., & Kahhat, R. (2018). Electronic waste after a digital TV transition: Material flows and stocks. *Resources, Conservation and Recycling*, 138(July), 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.014>

Abstract:

As with every technology, televisions (TV) are prone to replacement due to technological evolution of the equipment itself (e.g. CRTs to flat panels) or the system (e.g. signal). While the former is commonly a gradual change that depends on the consumer, the latter could be sudden, as it depends on national regulations. When an abrupt change happens, it can generate an abnormal volume of equipment at the end of life. Thus, the principal motivation of this research is to estimate the amount of CRT TV sets that will be stored by users in 2025, the end of the analog switch-off (ASO) in Peru. Dynamic Material Flow Analysis (D-AFM) was applied to estimate flows and stocks of CRTs from residential, business and public sources between 2005 and 2017. Because of data constraints in the Business and Public (B&P) sector, two scenarios were modeled to lower the uncertainty of the estimated number of TV sets. Results show that between 2.6 and 5.7 million CRT TV units, equivalent to 41,100 and 68,200 metric tons of leaded glass and 4500 and 8000 metric tons of lead, were placed in residential and B&P facilities in 2017 and will have become obsolete at the end of ASO. Projections for 2025, the final ASO year, indicate that between 0.27 and 5.86 million CRT TV units will be stored in those places. If planned correctly, resources embedded in CRT TV could create an urban mining opportunity, but an inadequate waste management plan that excludes appropriate recycling technologies could generate significant environmental impacts.

Gusukuma, M., Kahhat, R., & Cáceres, K. (2022). Evolution of the stock of electrical and electronic equipment in the Peruvian residential sector. *Journal of Industrial Ecology*, 1–12. <https://doi.org/10.1111/jiec.13231>

Abstract:

Consumption of appliances in the residential sector in Peru has been growing continuously during the last 20 years. Although social benefits due to this growth are evident, there are also some related environmental impacts in the use and end-of-life (EoL) phases (e.g., inadequate handling or disposal at the EoL stage). Nevertheless, there is also a hidden potential in the growing stock of household appliances, such as their potential exploitation as resources of industrial materials found in urban areas. Thus, the aim of this research paper is to analyze the evolution of the adoption of electronics in Peruvian households and estimate the stock of electrical and electronic equipment and related materials in the residential sector from 2001 to 2019, and greenhouse gases (GHG) emissions due to its use. Material flow analysis is the main methodology used in this research and its application relies on different strategies and the integrated use of official sources. Moreover, a Peruvian input–output table and associated environmental matrices were used to calculate GHG emissions. Results indicate that, in 2019, an average household possessed between 86 and 121 kg of appliances, which means the total stock of household appliances in Peru was in the range of 805,000 to 1,134,000 metric tons, an increase in mass of 70–95% by 2019 compared to 2001. These results will be useful to estimate the urban stock of appliances in the residential sector to help policy-makers design and implement an adequate e-waste management system that comprehends the potential of secondary materials embedded in these products.

Kahhat, R., Miller, T. R., Ojeda-Benitez, S., Cruz-Sotelo, S. E., Jauregui-Sesma, J., & Gusukuma, M. (2022). Proposal for used electronic products management in Mexicali. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 13(January), 200065. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200065>

Abstract:

Mexicali, a Mexican city located near the US-Mexico border, has faced several challenges related to adopting an integrated e-waste management system. Thus, the main objective of this work is to propose a new system to be implemented in phases. The current system is evaluated using several methodological approaches including field studies, surveys, interviews, and quantitative modeling via material flow analysis. We suggest the need to properly integrate both the formal and informal sectors to achieve the optimal system that mitigates environmental impacts while preserving the positive social and economic traits of the current system. Thus, without supplanting the current reuse, refurbishment, repair and maintenance practices, a hybrid system is proposed, based on a centralized facility that primarily handles those parts or materials that create environmental impacts and health hazards if mishandled. Furthermore, a decentralized transition phase toward the new system is recommended.