

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
ESCUELA DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS  
DEPARTAMENTO DE GESTIÓN EMPRESARIAL



**(WTE)**

# **Conversión de residuos en energía evidencia empírica en Chile.**

Tesis para optar al Título profesional de Ingeniero Comercial y al  
Grado Académico de Licenciado en Ciencias de la Administración de empresas

**Abigail Cid González  
Vanessa Contreras Catalán  
Yesenia Ormeño Benavides**

Profesor Guía: **Moisés Carrasco.**  
Departamento de Gestión Empresarial

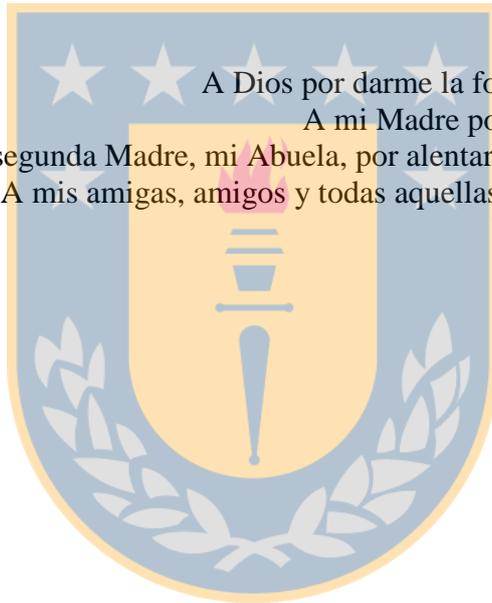
Los Ángeles, Chile  
2016

## DEDICATORIA

A Dios por darme la fuerza para terminar esta etapa.  
A mis padres por ser mis apoyos incondicionales.  
A mis hermanos, amigos y familia por apoyarme y animarme siempre.  
Abigail Cid González

A Dios por terminar esta fase universitaria.  
A mi Padre, Madre y hermana.  
A mis queridos primos Gonzalo, Roberto y Gabriela por su apoyo incondicional.  
A la Virgen Peregrina, a mis abuelos que me acompañan desde el cielo.  
A todas aquellas personas que siempre han estado apoyándome.  
Vanessa A. Contreras Catalán.

A Dios por darme la fortaleza para seguir adelante.  
A mi Madre por apoyarme en este proceso.  
A mi segunda Madre, mi Abuela, por alentarme en cada paso de mi vida.  
A mis amigas, amigos y todas aquellas personas que me apoyaron.  
Yesenia Ormeño Benavides.



## AGRADECIMIENTOS

### “Encomienda a Jehová tu camino y confía en ÉL y ÉL hará” Salmos 37:5

He finalizado mi etapa universitaria en un proceso lleno de altos y bajos, comenzando con la incertidumbre si era la elección correcta o no y hoy que miro hacia atrás me doy cuenta que los propósitos de Dios siempre son perfectos y prevalecen por sobre los míos.

En primer lugar agradezco a *Dios* que me dio la fuerza para luchar y enfrentar cada desafío en mi carrera, soy una infinita agradecida porque este logro sería imposible sin Dios a mi lado.

Agradezco a mis padres, *Manuel* y *Miriam*, mis apoyos incondicionales quienes permanecieron a mi lado en mis momentos más duros y celebraron conmigo cada uno de mis logros. Gracias por entregarme valores y una base espiritual que ha sido trascendental en mi vida para enfrentar cada desafío y dificultad.

También quiero agradecer a mis hermanos, tíos y primos quienes me apoyaron y demostraron su cariño en todo momento.

Gracias a mis amigas y amigos por animarme y entenderme siempre, particularmente a mis compañeras de tesis *Yesenia* y *Vanessa* cuyo esfuerzo se vio coronado al finalizar esta etapa. Juntas pudimos superar cada obstáculo y celebrar también cada logro. Gracias por entregar lo mejor de Uds. al realizar esta investigación y por disponer siempre de su tiempo priorizando por sobre las demás cosas.

Agradezco de manera especial a mi profesor guía el docente *Moisés Carrasco* por disponer de su tiempo y voluntad en todo el proceso de investigación de nuestro proyecto. Le agradezco por traspasar a nuestro equipo su experiencia y conocimientos sobre todo en el Área Medio Ambiental. Agradecida también de cada uno de los docentes por entregarme sus conocimientos y en especial por ser un apoyo en lo personal en muchos momentos difíciles, cuyas palabras fueron claves para seguir adelante.

Y para finalizar agradecer a mi carrera *Ingeniería Comercial* que me entregó las herramientas para hoy enfrentarme al mundo laboral. Gracias por hacer de mí una mujer más fuerte y madura.

Abigail Cid González.

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, doy gracias a Dios por terminar esta fase de mi vida que con mucho esfuerzo se ha culminado, igualmente agradezco a la Virgen Peregrina y a mis abuelos que ya se han ido, pero de igual forma siento que están apoyándome.

También doy gracias a mis queridos padres Héctor Contreras, Gloria Catalán y mi hermana Camila Contreras C. que me han soportado en momentos de mucho estrés y me han brindado su ánimo.

Por otro lado, brindo mis agradecimientos a mis primos Gonzalo Cárdenas, Roberto Muñoz y Gabriela Muñoz por estar siempre en los momentos que más los necesite, ya sea por algún incidente o enseñanza que yo no lograba entender, destacando principalmente su apoyo incondicional.

En fin, a todas aquellas personas que me apoyaron para poder salir adelante y superar cada meta dispuesta en mi vida.

Finalmente, agradezco tanto a mi profesor guía Moisés Carrasco como a los distintos profesores, que fui conociendo durante el transcurso de este ciclo universitario, por darme todas las herramientas necesarias para el mundo laboral.

Vanessa A. Contreras Catalán.



## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto de tesis representa el término de mi etapa universitaria, la cual ha estado llena de altos y bajos, los que gracias a Dios he podido sortear con éxito.

En primer lugar, doy gracias a *Dios* por este logro, por darme la fortaleza necesaria para afrontar cada desafío que se me presentó, concuerdo plenamente con que “los designios de Dios son perfectos”, ya que sin duda ha estado presente en mi vida.

Agradecer a mi Madre *Mirta Benavides C.* y a mi Segunda Madre *Ernestina Roa O.* por impulsarme a cumplir mis metas, por darme valores, por darme la posibilidad de poder estudiar, que era lo que más anhelaba, ya que sin su ayuda quizás no habría sido posible y sobretodo porque quien soy se lo debo a Uds.

Agradezco a mi hermano, quien ya no está conmigo *Gonzalo Urra O.* porque sé que de alguna u otra manera se hace presente en mi vida y donde quiera que te encuentres siempre estás cuidándome.

Agradecer a mi novio y amigo *Andrés Castillo E.* por siempre darme ánimo y tener una palabra de aliento cuando me sentía abatida, gracias por ser un apoyo fundamental en mi vida y nunca dejar de creer en mí y en mis capacidades.

Gracias a mis amigas, amigos, familia y en especial a mi grupo de tesis *Abigail Cid G.* y *Vanessa Contreras C.* ya que sin ellas esto no hubiera sido posible, gracias por este logro que hemos construido juntas y por ser verdaderas amigas antes y durante este proceso.

Finalmente, agradezco a mi profesor guía *Moisés Carrasco* por apoyarme y entregar sus conocimientos respecto al Área Medioambiental, por su dedicación y el tiempo empleado en esta investigación y a todo el cuerpo Docente de mi carrera *Ingeniería Comercial* por brindarme su apoyo, conocimientos y las herramientas necesarias para afrontar la vida laboral.

Yesenia Ormeño Benavides.

## Resumen

La presente tesis realiza un análisis del problema energético de nuestro país y evalúa la posibilidad de obtener una nueva fuente con recuperación de energía a través de la basura, tema que es de gran relevancia en el contexto chileno, puesto que en nuestro país es uno de los principales generadores de residuos a nivel latinoamericano.

Para lograr este objetivo se realizó un estudio a partir de la base de datos correspondiente al primer censo de basura (Reporte de Residuos Sólidos Domiciliarios 2010) encargado a la UDT de la Universidad de Concepción para el Ministerio del Medio Ambiente a través del cual obtuvimos la información para designar a la región Metropolitana como el lugar clave para establecer las posibles plantas generadoras de energía.

Las tecnologías analizadas fueron Gasificación, Incineración, Pyrolysis y Digestión Anaeróbica, en ellas se utilizó los datos para ser introducidos a un modelo de costo beneficio basado en el trabajo de Wendy Pei et al. (2014), cuyo objetivo de la optimización es minimizar los costos, maximizar la reducción del peso relativo de los residuos sólidos urbanos, así como también la generación de electricidad.

Los resultados de esta investigación determinaron que la mejor tecnología es Incineración puesto que genera más energía a un menor costo. Ahora si comparamos Incineración con las actuales energías convencionales y no convencionales, no sería esta tecnología un proyecto rentable, debido a que el costo de implementar una planta es muy elevado. Sin embargo, el costo podría disminuir si existieran mayores bonificaciones por el uso de energías renovables no convencionales como lo hacen países de Europa donde el compromiso con el medio ambiente es prioridad nacional.

*Palabras claves:*

*WTE, RSU, GEI, MSW, Residuos, Energía, Vertederos.*

## Abstract

This thesis analyzes the energy problem of our country and evaluates the possibility of obtaining a new source with energy recovery through trash, a subject that is of great relevance in the Chilean context, since in our country it is one of the main generators of waste in Latin America.

In order to achieve this objective, a study was carried out based on the database corresponding to the first garbage census (Report of Solid Residual Domiciles 2010) commissioned to the UDT of the University of Concepción for the Ministry of the Environment through which we obtained the Information to designate the Metropolitan region as the key place to establish potential power plants.

The technologies analyzed were Gasification, Incineration, Pyrolysis and Anaerobic Digestion, in which data were used to be introduced to a cost-benefit model based on the work of Wendy Pei et al. (2014), whose objective of optimization is to minimize costs, maximize the reduction of the relative weight of municipal solid waste, as well as the generation of electricity.

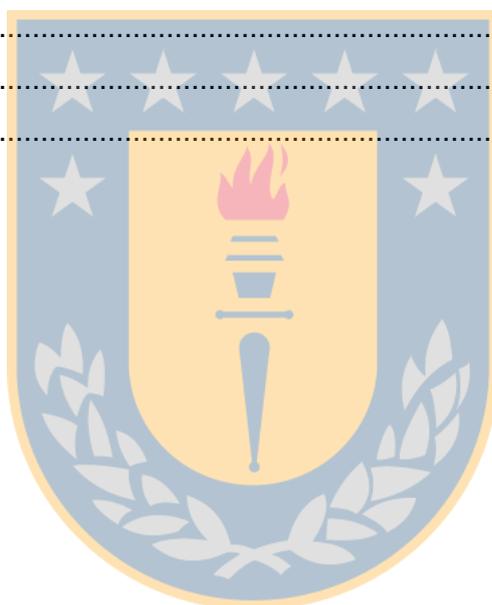
The results of this research determined that the best technology is Incineration since it generates more energy at a lower cost. Now if we compare Incineration with the current conventional and unconventional energies, this technology would not be a profitable project, because the cost of implementing a plant is very high. However, the cost could decrease if there were higher subsidies for the use of non-conventional renewable energies as do European countries where commitment to the environment is a national priority.

*Keywords:*

*WTE, SUW, GEI, MSW, Waste, Energy, Landfill.*

## Tabla de contenido

1	Introducción .....	8
1.1	Objetivo general.....	14
1.1.1	Objetivos específicos.....	14
1.2	Composición .....	15
1.3	Sistemas de recolección: .....	16
1.4	Disposición final.....	16
1.5	Transporte.....	17
2	Revisión bibliográfica .....	18
3	Metodología .....	25
3.1	Delimitaciones .....	27
3.2	Descripción de los datos.....	28
4	Resultados.....	30
5	Conclusión.....	35
6	Referencias:.....	37



# 1 Introducción

En el mundo actual han surgido un gran número de problemas de diversa índole (Kothari, Tyagi & Pathak, 2010). Entre ellos destacan:

- Disminución de las reservas de combustibles fósiles debido al crecimiento de la población mundial y el aumento de la demanda de energía, ya que en la actualidad existe escasez energética debido principalmente, al aumento de la metrópoli.
- Cambio climático global debido al aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.
- Gran aumento de los niveles de residuos ya sean líquidos o sólidos debido al aumento de la población mundial.

Países internacionales que se han enfrentado a estos mismos problemas han adoptado ciertas medidas para entregar una solución sustentable con el medio ambiente. Suecia recicla el 99% de la basura y desean como meta ser el primer país en generar cero basuras con el fin de producir energía. Lo particular de todo esto es que ha sido tan efectivo su sistema que ahora Suecia importa 700.000 toneladas de residuos procedentes de otros países como Italia y Reino Unido para abastecer los 32 centros de energía que ahora poseen. Suecia ha logrado estos resultados con un trabajo colectivo y una gran educación de sus habitantes. (R. Guillemi, 2015)

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) indica que Alemania ha mostrado reciclar o convertir en compostaje un 65% de todo el desperdicio municipal, le siguen muy de cerca Corea del Sur con un 59% y Eslovenia con un 58%, en un listado cuya mayoría de primeras posiciones, son para países europeos. Estados Unidos es el primer país del continente americano con el 35% del reciclaje de sus desperdicios municipales, seguido en la zona por Canadá con 24% y México con apenas el 5%.

Sacarle provecho a la basura es un reto que han asumido muchas industrias del mundo en los últimos años, tarea que no es fácil de enfrentar pero que trae consigo beneficios muy auspiciosos. La tecnología ha abierto la puerta a diversos procesos de transformación de las basuras hacia fuentes como la producción de energía y uno de sus objetivos es evitar que los desechos sólidos, que se acumulan en rellenos sanitarios, liberen altas cantidades de gas metano, una causa directa del calentamiento global. Colombia es un ejemplo de lo adelantado

que se encuentra en procesos de transformación con el objetivo de producir energía. En el 2008, la vereda El Totumo, de Necoclí (Antioquia), no contaba con energía eléctrica y se instaló allí la primera planta del país capaz de generar energía a través de la incineración de trozos de madera, que alimentaban una pequeña red eléctrica. Otro proyecto lo lideraron estudiantes de Ingeniería de la Universidad Nacional en el 2013, con la intención de tratar los residuos sólidos del relleno sanitario Doña Juana, donde se reciben diariamente más de 6.000 toneladas de desechos (D. Reyes, 2015).

Suecia es un buen ejemplo de producción de energía a partir de los residuos. Del total de residuos que se generan, sólo un 4% llega a los vertederos, mientras que el resto que no se recicla o reutiliza, es utilizado para generar energía mediante incineración. Con la incineración de los residuos utilizados para producir energía, se obtiene metano, y con este producto se obtiene energía en forma de calor para la producción de agua caliente. De esta manera se cubre la demanda de calefacción de cerca de 1.000.000 de viviendas y también de electricidad, cubriendo así la demanda de 250.000 hogares en Suecia (P. Serrano, 2014).

Por otro lado, la crisis energética en Chile avanza a pasos agigantados. Para el 2020 se proyecta un aumento de consumo eléctrico en torno a 100 gigavatios (GWh) y nuestro sistema eléctrico conformado por grandes Hidroeléctricas y Termoeléctricas controladas por poquísimas empresas, está siendo cuestionado por la ciudadanía, entre otras cosas demandan energías renovables no convencionales (M. Apablaza, 2015).

La crisis también ha abierto la discusión sobre el tema en diferentes sectores de la sociedad. Paulatinamente, se ha reconocido la importancia de comenzar a definir en nuestro país el rol que cabe a las energías renovables no contaminantes, dentro de la matriz energética, es por ello que es de gran importancia cumplir con el Protocolo de Kyoto (reducir las emisiones de gases contaminantes responsables del calentamiento global de la Tierra), ya que generalmente éste no se respeta, lo que afecta la solución global del problema energético, en términos de reducción de contaminantes y del consumo de energía basada en fuentes convencionales (M. Paz Aedo y S. Larraín, 2004).

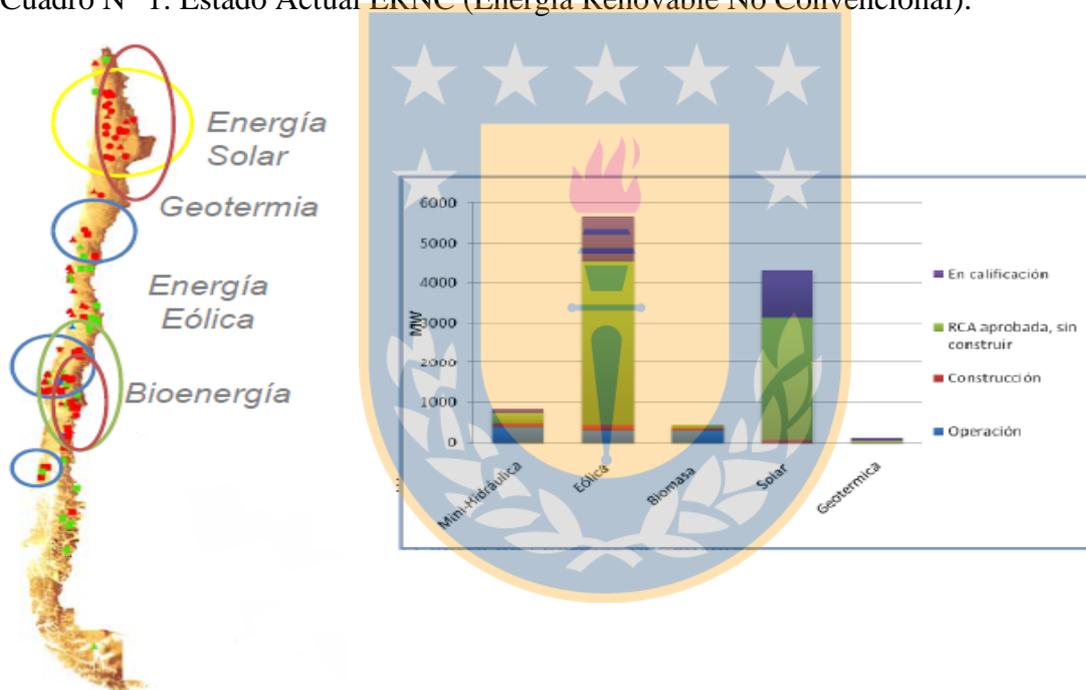
Nuestro país ha tratado de paliar dicha crisis mediante el uso de ERNC (Energía Renovables No Convencionales), dentro de ellas destaca la Energía Hidráulica, Eólica, Biomasa, el Biogás, Geotérmica, Solar y Mareomotriz, pero aun así no se ha logrado avanzar de manera progresiva en el tema. Sin embargo, el potencial de las diferentes fuentes ERNC, estimados

en varios miles de MW, recién está empezando a cobrar su importancia en la política energética del país (Ministerio de Energía, 2014).

La participación de las energías renovables no convencionales en la generación eléctrica del país ha sido marginal, alcanzando a julio de 2007 a sólo al 2,6% de la capacidad instalada de generación eléctrica. Esta situación contrasta con el gran potencial de esas energías en el país, situación que se explica por la baja competitividad económica que tenían respecto de las energías convencionales y a la ausencia de un marco regulatorio que permitiese eliminar las barreras que su desarrollo tenía en Chile.

El cuadro N° 1 presenta en un análisis gráfico cada una de las fuentes de ERNC que existen en Chile.

Cuadro N° 1: Estado Actual ERNC (Energía Renovable No Convencional).



Fuente: CER, SEIA, CNE abril 2013 \*valores preliminares, Corfo.

Por otra parte, en el año 2012 se alcanzaron 10.328 MW de proyectos ERNC en SEIA (Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental). Asimismo, la energía eólica alcanzó los 5890 MW lo que representó un 57%. Luego, siguen los proyectos solares, lo cuales equivalen a 3911 MW y corresponden a un 38%. El 5% restante lo conforman mini proyectos de Biomasa, Hidráulicos y Geotérmicos (Centro de Energías Renovables, Ministerio de Energía).

En relación a la aplicación de tecnologías de ERNC, se ha podido observar que el país no ha avanzado mucho, a pesar de la conciencia que se tiene del potencial de las ERNC. Las principales barreras son:

- Incertidumbre en cuanto a los costos reales de inversión y operación.
- Dificultad de optar por fuentes menos conocidas frente a opciones de generación ya probadas y establecidas.
- Menor precio relativo de la energía convencional, lo cual va en contra de la competitividad de las ERNC.
- No inclusión de externalidades.
- Restringida disponibilidad de recursos financieros, de pequeños empresarios que quieran desarrollar sus proyectos.
- La orientación y cobertura del marco regulatorio no posee incentivos suficientes para las ERNC.
- Limitada información respecto al potencial y localización de recursos renovables.
- La falta de experiencia práctica y riesgo técnico y económico asociado.

A pesar de lo anterior, al transcurrir el tiempo la legislación ha cambiado y a llevado a fomentar el desarrollo de las ERNC en Chile (Wilfredo Jara Tirapegui, 2006).

La instalación de los mega watts (MG) faltantes para el desarrollo del país es la tarea faltante que las autoridades de gobierno, empresas y ciudadanía desean resolver. Esta problemática se basa en dos preguntas. ¿Qué fuente energética se debe implementar? ¿Quién se debería encargar de potenciar dicha fuente? ¿El estado tiene los recursos para ello?

Esta es una tarea mayor, que no podrá ser desarrollada sin un rol protagónico del Estado. Se espera que los esfuerzos de la sociedad civil, puedan verse coronados por una vía expedita de acceso para estas fuentes propias, nacionales y limpias. Es por esto que se hace indispensable buscar soluciones alternativas con el fin de aminorar dicha problemática.

Un ejemplo claro de esto son la contaminación mundial y escasez de energía, en el caso de Noruega producen energía a partir de residuos sólidos domiciliarios los cuales, primeramente, son sometidos a un proceso de reciclaje (Cerde, 2014).

Frente a la crisis energética actual y a los desafíos que nos esperan si queremos un futuro energético seguro y sustentable, resolviendo la equidad en el acceso a la energía para todos los chilenos, la tarea es introducir las energías renovables no convencionales en la matriz energética (M. Paz Aedo, 2004).

La solución que han adoptado países de Europa al utilizar Energías Renovables No Convencionales es generarle un uso más eficiente y amigable con el medio ambiente a los residuos sólidos urbanos (RSU). Un ejemplo de ello se da en la ciudad de Oslo, la capital de Noruega, donde el gobierno ha creado la planta llamada Klemetsrud que transforma la basura del país y del Reino Unido en energía y calefacción. Para dar una idea de la magnitud de basura que se reutiliza, luego de filtrar todo aquello reciclable, es de aproximadamente 300 toneladas de residuos no reutilizables. *“Cuatro toneladas de residuos tienen la misma energía que una tonelada de combustible”*, afirma Pal Mikkelsen, director de la agencia Waste-to-energy para BBC Mundo. Y un kilogramo de residuos de alimentos produce la mitad de un litro de combustible. En otras palabras, se toma una pequeña parte de la carga máxima de un camión recogedor de basura británico, cargado en las ciudades de Lees o Bristol, se convierte en energía en esta planta y puede calentar una casa en Oslo durante medio año (BBC Mundo, 2013).

Otro ejemplo de esta medida de recuperación de energía a partir de los RSU se da en Suecia. En la actualidad recicla o reutiliza un 99 % de sus residuos, una cifra que mejora la de 2012 que fue del 96 %. El país utiliza un sistema jerárquico en la gestión de residuos, el cual se centra en la prevención, la reutilización, el reciclaje, las alternativas al reciclado, y como último recurso, la eliminación en vertedero (Ecoinventos, 2014).

Considerando lo mencionado anteriormente, nuestro país es uno de los principales generadores de basura a nivel latinoamericano según estudios realizados por el Ministerio del Medio Ambiente 2012. Al año, cada chileno produce en promedio 384 kg de residuos domiciliarios, totalizando en todo el territorio nacional cerca de 6,5 millones de toneladas al año, de lo que sólo se recicla el 10% (Ministerio del Medio Ambiente). Es por ello que debemos centrar nuestra atención en las regiones que poseen un alto índice de producción de residuos.

Cuadro N° 2: Distribución de residuos por regiones principales

Región	Toneladas al año 2009
Metropolitana	2.807.247
Bio- Bio	645.875
Valparaíso	587.600
Otras	2.472.736

Fuente: Elaboración Propia en base al Reporte de Residuos Sólidos (2009).

Podemos observar que la Región Metropolitana genera el mayor volumen de residuos a nivel nacional debido a que más de la mitad de la población se concentra en ésta. Asimismo, se considera que el nivel de vida también ha aumentado (Reporte Residuos Sólidos, 2009).

Es por ello que hacia el año 2009 se producían alrededor de 2.807.247 toneladas anuales de basura (Reporte Residuos Sólidos, 2010). A raíz de esto surge la siguiente pregunta: ¿Cómo reducir la cantidad de residuos y cuidar del medio ambiente a nivel nacional? Para responder a esta interrogante es que se plantea estudiar el caso de establecer una planta generadora de energía a partir de RSU (Reporte Residuos Sólidos, 2010). Cabe destacar que se encuentra en proceso la evaluación del lugar geográfico donde se establecería dicha planta o plantas, pero en primera instancia se elegiría la ciudad de Santiago porque cumpliría con la mayoría de las características ideales para nuestra investigación.

La cantidad de los residuos sólidos generados en Chile, según estimaciones para el periodo 2000-2009, presenta un crecimiento variable debido, principalmente al aumento de la población, crecimiento en la producción industrial y tasas de valorización de residuos aún incipientes (Reporte Residuos Sólidos, 2010). Respecto a los vertederos, existen 25 rellenos sanitarios en Chile los cuales poseen capacidad para evitar la filtración de líquidos percolados existiendo altas medidas de seguridad, entre otros aspectos, también hay 72 vertederos que cuentan con cierre perimetral y un tratamiento mínimo de los desechos, por último 62 vertederos o basurales que no cumplen con las normas sanitarias, estos datos son recopilados mediante un catastro realizado por el Ministerio del Medio Ambiente, (2011). Cabe destacar

que la minoría de las regiones no tiene rellenos sanitarios, por lo que se agrava aún más la problemática. En la Región Metropolitana los desechos son enviados a tres rellenos sanitarios, Lomas Los Colorados (Tiltil), Santa Marta (Talagante), y Santiago Poniente (Maipú), pero se necesita un mayor número de depósitos.

Si bien la mitad de los desechos del país se genera en la Región Metropolitana, los que en su mayoría son depositados en tres rellenos sanitarios que se ajustan a la normativa, las autoridades reconocen que el problema está en el resto del país, donde existen sitios pequeños que, en su mayoría, carecen de autorizaciones de salud y de calificaciones ambientales. En Chile, el 68% de los vertederos opera al margen del reglamento, sin permisos sanitarios o ambientales. Es decir, casi 7 de cada 10 lugares en los que hoy se deposita la basura funciona de manera irregular (Chile Desarrollo Sustentable). Como consecuencia de lo anterior, los vertederos en Chile no son capaces de dar abasto lo que a su vez incrementa los problemas ambientales.

## 1.1 Objetivo general

Valorizar económicamente la utilización de residuos para la generación de electricidad a través de un proceso denominado “Modelo de Conversión de Residuos en Energía” (WTE), en Chile.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Dimensionar los requerimientos, disponibilidad y costos de utilización de residuos para generación de energía eléctrica a través del proceso WTE en Chile.
- Contar con propuestas de modelos de abastecimiento de residuos para generar electricidad a través del proceso WTE en Chile.
- Determinar los precios de la utilización de residuos para generación eléctrica en Chile.

## 1.2 Composición

La generación de residuos sólidos municipales (RSM) en el año 2009 fue estimada en 6,5 millones de toneladas observándose un incremento de un 28% respecto del año 2000, en el que la generación fue de 5 millones de toneladas.

Cuadro N° 3: Composición de Residuos Municipales para el año 2009.

Tipo de residuos	Composición %
Papeles y cartones	12,4
Textiles	2,0
Plásticos	9,4
Vidrios	6,6
Metales	2,3
Materia Orgánica	53,3
Otros	14,0

Fuente: Reporte de Residuos Sólidos (2010).

Podemos notar que la mayor parte de la composición de los residuos sólidos municipales, se centra principalmente en la categoría Materia Orgánica y Otros, siendo ambas preponderantes en el estudio.

Por otro lado, Chile ha experimentado un amplio crecimiento económico lo que lleva consigo que las principales actividades productivas que contribuyen al PIB generan una gran cantidad de residuos industriales. En el periodo 2000-2009 la tasa de generación aumentó en un 53% lo que implica un aumento del 4,8% anual.

Cuadro N° 4: Generación de Residuos Sólidos Industriales (RSI).

Sector	Generación de RSI (Millones de toneladas)	Porcentaje (%)
Agrícola y Forestal	1,56	15
Minería y Cantera	0,63	6

Industria Manufacturera	1,83	18
Producción de Energía	0,47	5
Purificación y Distribución de Agua	0,08	1
Construcción	5,82	56

Fuente: Reporte de Residuos Sólidos (2010).

Se puede observar que los sectores que aportan con una mayor generación de residuos son: Construcción e Industria Manufacturera, respectivamente.

### 1.3 Sistemas de recolección:

La recolección de residuos domiciliarios en la Región Metropolitana de Chile se realiza de dos maneras: formal e informal.

La recolección formal es efectuada por una empresa especializada dependiente de la gestión municipal, mediante camiones compactadores.

Presenta una cobertura elevada en comparación a otros países de la región, e incluso superiores a las de otros países de mayor ingreso por habitante. En el año 2004, un 99,9% de la población urbana disponía de un servicio regular de recolección domiciliaria, observándose que en un 95,4% de los servicios la frecuencia de recolección era de, a lo menos, tres veces por semana (CONAMA, 2004).

La recolección informal contempla aproximadamente un 20% del total de residuos sólidos domiciliarios generados, no presentando un mecanismo de transporte definido (Vasconi, 2004).

### 1.4 Disposición final.

En la Región Metropolitana de Chile el 100% de los residuos recolectados formalmente son depositados en rellenos sanitarios (CONAMA, 2004).

Desde el año 1996, la Región cuenta con instalaciones denominadas estaciones de transferencia, en las cuales se traspasan los residuos provenientes de los camiones

recolectores a contenedores más grandes, para ser llevados a los rellenos, reduciendo los costos por conceptos de transporte y recolección residuos de un 33,3% (SEIA, 1998).

Los rellenos sanitarios de la Región Metropolitana son: Santiago Poniente, Santa Marta y Lomas Lo Colorado, estos dos últimos se encuentran asociados a las estaciones de transferencia Puerta Sur y KDM, respectivamente (SESMA, 2004).

Los servicios de disposición final de residuos, ofrecidos por los diferentes rellenos, se distribuyen por comunas.

Por otra parte, los residuos sólidos domiciliarios que son recolectados de manera informal son depositados en vertederos ilegales de residuos sólidos (VIRS). En el año 1994 se detectaron un total de 78 vertederos ilegales, disminuyendo para el año 2002, a tan sólo 66. Éstos se concentran principalmente en comunas de bajos recursos económicos y en aquellas con procesos de crecimiento demográfico en extensión, producto de una mayor disponibilidad de suelos a menores precios (SESMA, 2004).

## 1.5 Transporte.

Se realiza en camiones tipo compactadores en zonas urbanas y en camiones tolva en áreas rurales. En el caso de la Región Metropolitana, existen dos estaciones de transferencia, donde se vacían los residuos desde los camiones recolectores a un contenedor cerrado de mayor capacidad, para ser compactados y luego transportados hacia el relleno sanitario.

Por otra parte, es necesario mencionar que no existe evidencia sobre la generación de energía a través de residuos, es decir, no hay mercado, además en Latinoamérica muy pocos países han utilizado este método y en el resto del mundo los estudios tienden a ser pocos.

## 2 Revisión bibliográfica

Wendy Pei et al. (2014). Plantea un modelo sobre la problemática de los residuos y busca la manera de disminuirlos para generar energía. En primer lugar, se obtienen los componentes, los cuales se clasifican según su composición, posteriormente la basura es llevada a dos centros A y B, donde en el último existe mayor conversión. Cada tecnología es ubicada entre un límite mínimo y superior, se le agregan sus respectivos costos por recolección, disposición, ingreso, recuperación, operativos, entre otros. Luego, aplicando temas económicos y algebraicos se llega a la conclusión que el modelo posee errores en cuanto a costos de operación, disposición de residuos y capital. Los altos costos tanto para el procedimiento de clasificación de residuos y la tecnología necesaria hacen que el proyecto no sea atractivo no respondiendo así a las problemáticas de energía y contaminación.

De igual modo, para reducir la gran problemática del aumento de residuos en el Reino de Arabia Saudita (KSA), se tomó en consideración el modelo WTE. Ouda et al, (2013) plantea un modelo considerando dos escenarios Mass Burn y Mass Burn con el reciclaje de todo el país incluyendo las seis principales ciudades de KSA. El objetivo de éste es evaluar la contribución de las instalaciones WTE relacionadas con una demanda peak al año 2032.

Dichas contribuciones fueron evaluadas mediante un análisis de previsión cuantitativa del potencial de generación de electricidad WTE. En el caso de Mass Burn con reciclaje, se muestra una capacidad de producción de 166 Megavatios (MW) de electricidad a partir de RSU para 2032. Este valor genera unos 0.14% de los 120 GW que se espera sea la demanda de electricidad requerida en 2032.

Por otra parte, en el contexto de Mass Burn sin clasificación de residuos la producción de energía en base a WTE es de 2073 MW que es aproximadamente 1.73% de la demanda máxima proyectada para el año terminal. Como se puede apreciar, en el segundo escenario se puede generar 12 veces más electricidad con WTE en relación con el primero.

Dicha investigación se podría utilizar para diseñar un futuro centro de WTE en las principales ciudades de Arabia Saudita.

Respecto al impacto del modelo WTE sobre el medio ambiente. Tabasová et al, 2012. Plantea algunos de los contaminantes sólidos procedentes de la incineración imperfecta son el hollín

y el alquitrán, éstos aumentan el riesgo de corrosión y su emisión a la atmósfera podría causar problemas respiratorios.

Sin embargo, la gestión de los residuos es de gran relevancia tanto para implementar el modelo WTE como para cuidar el medio ambiente. Sie Ting Tang et al. (2014), en su estudio llamado Energy, Economic and Environmental: Analysis of WTE strategies for municipal solid waste management in Malaysia tomó en cuenta varias investigaciones ya realizadas, para dar distintas soluciones a la problemática de los desperdicios. En general, los residuos sólidos urbanos (RSU) en Malasia suelen desecharse en un contenedor o recipiente dentro de la premisa de casa y recogido por los respectivos concesionarios privados regionales. Los residuos se transfieren en primer lugar a las estaciones de transferencia para la compactación. Algunos de los RSU son reciclados o eliminados por compostaje. Sin embargo, los métodos de tratamiento de los RSU se realizan en los vertederos o tiraderos a cielo abierto. Aunque hay varios modelos diseñados para abordar las cuestiones de RSU, la literatura indica la falta de propuesta de gestión de residuos integral en Malasia, que integró la selección de tecnologías para el tratamiento de residuos sólidos y tratamiento de residuos en energía (WTE), la mitigación de emisiones de gas de efecto invernadero (GEI) y la optimización de impacto económico. Por lo tanto, este estudio pretende sintetizar una red de procesamiento rentable para RSU integrada en Malasia, que tenga en cuenta los siguientes factores:

- La asignación de recursos.
- Cartera de Producción.
- Mejor tecnología disponible para cierta capacidad y el tiempo de construcción apropiado.
- Óptimo económico y ambiental para el tratamiento integral de residuos sólidos y tratamiento de residuos en energía (WTE).

El modelo propuesto entera mixta de programación lineal (MILP), se aplicó para Iskandar Malasia. Este modelo es útil por la simplicidad y el uso común para la solución de los problemas complejos de gestión de residuos sólidos MSW. Los resultados de este estudio dieron a conocer que la producción de energía desde el escenario WTE era extremadamente alta 8.594,13 GWh, en comparación con la energía renovable, cabe destacar que el costo de inversión también es elevado por lo cual se hace poco atractivo, sin embargo, WTE mostró una gran protección del medio ambiente con la emisión de carbono más bajo. Por otro lado,

un alza del porcentaje de la meta de reducción de GEI requeriría la integración de gran parte de la tecnología de energía WTE.

Para obtener una buena gestión de residuos ya su vez una óptima reducción que favorezca una sostenible gestión del medio ambiente. Federica Cucchiella et al. (2014) en su estudio llamado “Strategic municipal solid waste management: A quantitative model for Italian regions”, da a conocer que todo debe ir alineado con la protección de la salud pública y la calidad ambiental, es decir una reducción del uso de vertederos.

A través de un análisis financiero, Cucchiella demostró que las inversiones de incineración no proporcionan un beneficio neto con respecto al vertedero y la escala y capacidad de recuperación de energía son insuficientes. Puesto que las instalaciones con una capacidad de procesamiento inferior a 350 Kt tienen una propuesta de valor actual neto financiero (VANF) negativo, pero en cambio sí es igual o superior a 350 Kt se obtiene un VANF positivo.

Sin embargo, en este documento se proporciona un marco de gestión de residuos de hormigón y, cuando se aplica correctamente, permite:

- Reducir fuertemente los gases y lixiviados producidos en los vertederos, mientras que los residuos producidos por la incineración son totalmente libres de cualquier riesgo ambiental.
- Reducir el volumen de residuos, alrededor de 90%.
- Generar calor por el proceso de conversión de residuos en energía que puede ser recuperado para la producción de energía eléctrica y térmica.
- Conservar las fuentes convencionales de energía, como los combustibles fósiles.

En general, se puede destacar que las regiones que son capaces de obtener altas tasas de recolección selectiva de residuos, con una capacidad adecuada para el procesamiento de los RSU en diferentes opciones de tratamiento de residuos y un mercado para los materiales reciclados, generalmente muestran niveles más bajos de vertederos.

Para determinar un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos que cause un menor impacto se utilizó el método de evaluación del ciclo de vida (LCA) para la gestión de residuos municipales en Sakayra, Turquía. Erses Yay (2015) realiza este estudio, obteniendo

algunos resultados que mostraron que los mayores impactos ambientales surgen de vertederos sin recuperación de energía y si se mezcla con la incineración de residuos con recuperación de energía esto podría ser nefasto. La opción de gestión de residuos más ecológica es la instalación de recuperación de materiales (MRF), compostaje, incineración y vertederos, ésta es la mejor alternativa con beneficios ambientales superiores, pero puede no ser económicamente sostenible debido a sus altos costos de inversión y operación en el corto plazo. Por lo tanto, la instalación de materiales de recuperación (MRF), compostaje y vertedero puede ser una elección favorable.

Los resultados indican que el LCA puede ser una herramienta útil para la planificación de la gestión municipal de residuos, ya que permite a los municipios comparar directamente los impactos ambientales reales de diferentes tecnologías y opciones de planificación. Como conclusión, el actual sistema de gestión de los RSU en Sakarya no es adecuado para uso en el futuro debido a sus impactos ambientales considerables.

Es bien sabido que las legislaciones en todo el mundo funcionan de manera diferente, es por ello que al utilizar WTE cada una podrá clasificar los residuos de acuerdo a los estatutos establecidos de cada país, pero existe una forma más general los cuales se presentan a continuación. Speight et al, 2008:

- Estado de la materia
- Peligrosidad
- Categoría de uso

Es importante mencionar que la destrucción de la materia peligrosa puede representar un alto riesgo para la salud pública y el medio ambiente. Por ello, es necesario tener en cuenta que el tratamiento de los desechos también puede acarrear impactos negativos. Existe una gran preocupación por parte de las autoridades por la posible generación de emisiones de contaminantes en los gases de combustión, la existencia de sustancias peligrosas en la ceniza, la contaminación del agua utilizada en las distintas etapas del proceso del equipo de incineración, etc.

No obstante, Hui-zhen Fu (2015), realizó una estimación de la generación de residuos sólidos urbanos por diferentes actividades y diversos grupos de residentes en cinco provincias de China en Julio del 2015. Se empleó el modelo de generación de residuos en relación con el

consumo y las actividades humanas. El detalle del modelo consiste en que las actividades humanas diarias fueron clasificadas en tres grupos: las actividades de mantenimiento (que cumple con las necesidades básicas de alimentación, vivienda y cuidado personal, MA); actividades de subsistencia (que proporciona los requisitos de apoyo financiero, SA); y actividades de ocio (actividades sociales y recreativas, LA). Cuyas variables están correlacionadas.

Las relaciones importantes se dan entre el grupo y las actividades de residentes, entre las actividades y bienes de consumo, también entre bienes de consumo y composición de los residuos. Se proponen tres parámetros importantes en base a estas tres relaciones para describir la generación de residuos y las conclusiones fueron las siguientes:

1. El comportamiento de consumo durante las diferentes actividades humanas es el factor clave de la base de la generación de RSU.
2. La generación de residuos por unidad de gasto del consumidor están directamente relacionados con los gastos de consumo y la generación de RSU.

Por lo tanto, los factores como el consumo, la renta, las actividades, los gastos, etc son patrones de gran relevancia a la hora de analizar los RSU.

Por otra parte, para un enfoque de sistema integrado, una de las opciones defendidas por el manejo de los planificadores y regulaciones del gobierno es el reciclaje y la recuperación de material, así como la energía mediante la producción de un combustible derivado de residuos (RDF), en lugar de masa convencional quemada (Di María y Pavesi, 2006).

RDF proceso de producción comienza con la separación y clasificación de los RSU para eliminar materiales reciclables o potencialmente peligrosos de la corriente de desechos. El combustible restante material se tritura o muele y se transporta a un secador para eliminar el exceso de humedad, vapor o calor aire. Por último, se compacta en la forma de pellets. RDF tiene varias ventajas sobre el tratado de RSU. Las principales ventajas son el poder calorífico superior, la homogeneidad de su composición físico-química, la facilidad de almacenamiento, manipulación y transporte, las emisiones contaminantes inferiores y un exceso de aire reducido, requisito durante la combustión Chang et al. (1998).

Se realizó una investigación que se centra en la generación integrada de gestión de residuos y su poder calorífico. Este proyecto se realizó en Chiang Mai, Tailandia el año 2009 utilizando la tecnología RDF.

Instalaciones WTE están basadas en RDF y la tecnología de la incineración. La cantidad entera (400 toneladas / día) de los RSU pasa por una línea de producción de RDF. Esto se logra a través de sucesivas etapas de tratamiento de cribado, trituración, reducción de tamaño, la clasificación, la separación, secado, densificación y el almacenamiento.

El modelo propone la creación de una planta de energía con capacidad de 1-10 MW y es considerado atractivo para la inversión privada en la zona objetivo.

Desde el análisis de costos, era necesario la alta inversión inicial para establecer una planta RDF sin embargo el retorno de la inversión puede causar un gran interés. La tecnología para RDF en energía no se practica actualmente en esta escala en Tailandia, por lo que es necesaria exportarla. El costo de capital de la tecnología importada y la maquinaria era, por tanto, alto. Se espera que una vez que el país comience a practicar en gran escala y desarrollen sus propias maquinarias el costo de capital se reduzca considerablemente.

Los resultados de viabilidad económica son los siguientes:

- Con la opción tecnológica considerada hasta 3 MW la planta de energía tiene rentabilidad atractiva de la inversión. Capacidades de energía más grandes obtuvieron VAN y TIR negativo.

Bajo este escenario, la mayoría de los RSU todavía se arroja en los basureros, por lo tanto no existe completo beneficio. Para obtener 100% beneficios ambientales, sociales y económicos tales como la reducción de la necesidad de nuevos vertederos, aire limpio y menos contaminación deberían ser cofinanciados con el gobierno.

WTE representa una estrategia importante en el área de tratamiento de residuos en la actualidad. Este planteamiento lleva a la purificación de la eliminación de residuos y contribuye a la utilización del potencial de energía contenida en los gases de combustión, es por ello que se califica como una tecnología de alto impacto que generará grandes beneficios en el futuro (Tabasová, 2012).

En el contexto internacional, Stehlík mencionó que el supuesto básico para la utilización de residuos como método de combustible alternativo es su gran poder calorífico el que podría ser utilizado tanto para energía, calor, automóviles, etc (Stehlík, 2009).

Finalmente, existen una gran cantidad de técnicas para producir energía, Munster y Mainborn (2011), llegaron a la conclusión que la solución más viable, desde el punto de vista económico, es la incineración de residuos mezclados, la digestión anaerobia de residuos orgánicos y la gasificación de una parte de los residuos derivados del combustible. Debido a esto es que las tecnologías han tenido un gran desarrollo en el tratamiento térmico de los residuos.



### 3 Metodología

En nuestro estudio emplearemos el modelo de optimización basado en el trabajo de Wendy Pei et al. (2014), el cual permite la modelización multicriterio la cual acepta información adicional en conjunto con la relación costo-beneficio, lo que asimismo entrega soluciones más exactas en muchas situaciones de la vida real.

El objetivo de la optimización es minimizar los costos y maximizar la reducción del peso de Residuos Sólidos Urbanos, así como también la producción de electricidad. A continuación, se presenta la formulación del modelo, según Wendy Pei et al. (2014):

*MSW* posee componentes *i*, que pueden ser chatarra, plásticos, etc. La cantidad de cada componente *a* en *MSW* se muestra en la ecuación (1.1):

$$F1_{a,i} = MSW_a \times COM_i \quad \forall a \in A, i \in I \quad (1.1)$$

Donde  $MSW_a$  es el flujo *MSW* de la fuente *a* en (t/d);  $COM_i$  es la porción del componente *a* en *MSW*.

El reciclaje obtenido de la fuente *a* se puede obtener como:

$$F2_{a,i} = F1_{a,i} \times REC_i \quad \forall a \in A, i \in I \quad (1.2)$$

Donde  $F2_{a,i}$  es el flujo de materiales reciclables (t/d);  $REC_i$  es la fracción de reciclaje de *MSW* tipo *i*.

La parte no reciclable de *MSW* de la fuente *a* es transferida a las posibles plantas de procesamiento *b* para su posterior procesamiento, éstas plantas se ubican en algunas fuentes.

$$\sum_{b \in B} F3_{a,b} = \sum_{i \in I} F1_{a,i} - F2 \quad \forall a \in A \quad (1.3)$$

Donde  $F3_{a,b}$  es el flujo sobrante *MSW* (t/d). Notar que el índice *i* del componente de referencia no se tiene en cuenta desde este punto en adelante y se asume que *MSW* entra en el

conjunto de las tecnologías de procesamiento sin ninguna clasificación de *MSW* o extracción adicional.

En la planta *b*, los *MSW* recibidos se procesan en distintas tecnologías; las cuales pueden ser incineración, digestión anaeróbica, la pyrolysis y gasificación.

La cantidad de *MSW* enviado a cada tecnología *j* tiene un tope, un límite superior de capacidad máxima de funcionamiento, pero en un punto de fuente puede existir más de una planta del mismo procesamiento.

$$F3_{b,j} \leq UB_j \quad \forall b \in B, j \in J \quad (1.4)$$

Donde  $UB_j$  es el límite superior de procesamiento de la planta *b* para la tecnología *j*. La *MSW* se procesa a través de la tecnología *j* y se logra la reducción del volumen de residuos. La cantidad de *MSW* reducida, es así que  $F6_{b,j}$  es:

$$F6_{b,j} = F3_{b,j} \times SPA_j \quad \forall b \in B \quad (1.5)$$

Donde  $SPA_j$  es la reducción de residuos en fracción de peso.

De cada fuente se cobra una tarifa de recolección de residuos,  $C1$  (USD / d), la cuota incluye el costo de operación de la planta de procesamiento, costo vertedero de eliminación de los residuos y de cualquier ingreso de productos de valor añadido / energía recuperada / electricidad generada:

$$C1_{b,j} = F3_{b,j} \times TIP_j \quad \forall b \in B \quad (1.6)$$

Donde  $TIP_j$  es la tasa de recolección de residuos para cada tecnología de conversión individual de *MSW* (USD / t de *MSW* procesados).

La longitud de la distancia recorrida para la entrega de *MSW* contribuye a la optimización del diseño de la red de suministro. Así, El costo de transporte de *MSW*  $C2$  (USD/d), se calcula utilizando la siguiente ecuación, suponiendo una tasa fija:

$$C2_j = \sum_{a \in A, b \in B} DT_{a,b} \times F3_{b,j} \times TC \quad (1.7)$$

Donde  $TC$  es el parámetro de costo de transporte (0,10 USD/ t de material entregado) y  $DT_{a,b}$  es la distancia de la fuente  $a$  a la planta  $b$ . El costo total de recolección y transporte de residuos para  $MSW$ ,  $TTC$  (USD / d) viene dado por la siguiente ecuación:

$$TTC = \sum_{b \in B} C1_{b,j} + C2_j \quad (1.8)$$

En la siguiente ecuación;  $TEG$  indica la electricidad que se generará en el procesamiento, es decir; es la cantidad total de electricidad (kW h/d):

$$TEG = \sum_{b \in B} F5_{b,j} \quad (1.9)$$

Donde  $F5_{b,j} = F3_{b,j} \times PR_j$  y  $PR_j$  es la tasa de conversión de la tecnología  $j$  para la generación eléctrica.

El modelo maximiza en base a los siguientes tres criterios:

1. Máximo rendimiento económico a través de mínimo costo incurrido.
2. Máximo espacio asignado a través de máximo volumen de  $MSW$ / reducción de peso.
3. Máxima recuperación de energía para la mejora de la seguridad local de energía a través de la generación de energía eléctrica máxima.

Además, es importante mencionar que el modelo expuesto anteriormente fue procesado mediante el programa GAMS 23.4.3/ BARON.

### 3.1 Delimitaciones

Utilizaremos la base de datos correspondiente al primer censo de basura (reporte de residuos sólidos domiciliarios 2010) encargado a la UDT de la Universidad de Concepción para el Ministerio del Medio Ambiente. Cabe mencionar que la información se solicitó bajo la premisa de la Ley de Transparencia.

## 3.2 Descripción de los datos

Los datos se obtendrán del informe "Catastro Nacional Residuos Sólidos" publicado el año 2010, realizado por UDT Universidad de Concepción en 2009, encargado por el Ministerio del Medio Ambiente, se trata del primer Censo de Residuos a nivel nacional.

El documento corresponde al Informe Final del proyecto "Levantamiento, análisis, generación y publicación de información nacional sobre Residuos Sólidos de Chile", iniciativa impulsada por CONAMA y desarrollada por la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción. El objetivo principal de este estudio es fortalecer y generar información relacionada con los residuos sólidos a nivel nacional.

De la recopilación de antecedentes nacionales sobre gestión de residuos sólidos, tanto municipales como industriales, se logró identificar 17 estudios asociados a residuos de origen municipal, 7 estudios asociados a residuos generados a nivel industrial y 2 estudios con información referente a instalaciones de eliminación y valorización de residuos.

Para realizar este Censo se enviaron encuestas a las 345 municipalidades del país, de éstas sólo se recibieron 123 respuestas, las cuales corresponden a 35,7% del total de municipios a nivel nacional. Sin embargo, la cobertura nacional del total de municipios que contestó la misma abarcó el 51%.

Se generó una data de 1186 entidades encuestadas, de las cuales 172 corresponden a entidades de eliminación, 174 a entidades de valorización, 495 a industrias generadoras de residuos sólidos y 345 municipios del país. Se visitaron 38 entidades, de las cuales 17 corresponden a sitios de disposición final y 21 a entidades de valorización; siendo éstas las más representativas del sector valorización y eliminación de cada región.

La generación de residuos municipales a nivel nacional para el año 2009 fue de aproximadamente 6,5 millones de toneladas y la recolección de éstos corresponde a aproximadamente 6,2 millones de toneladas, presentando una cobertura de recolección estimada del 95%.

Se consideraron parámetros fijos como la tecnología y la infraestructura por lo que se homologará del modelo original (Wendi Pei et.al, 2014) o experiencias internacionales. Los datos de los costos de transporte los obtuvimos del informe del centro de Investigación periodística en un reportaje de investigación realizado el 25 de mayo del 2015 analizando los contratos de basura en 14 capitales regionales y 34 comunas del Gran Santiago cuyo

resultado fue un mapa interactivo con los montos pagados y las empresas favorecidas en cada municipio.

Nuestro estudio consideró solo la Región Metropolitana y se ubicaron 5 puntos arbitrarios de extracción diferentes a “x distantes” esparcidos en toda la región que corresponden a las ciudades de Santiago Centro, San José de Maipo, Puente Alto, Buin y Lampa. Esta ubicación estratégica permite que si se mueve un punto más cerca de un lugar no altera mucho los costos porque se acercará a otra ciudad que va a abastecer, es decir, los costos serán similares en promedio dado que tenemos distintos puntos distribuidos en la región. Mientras más puntos menores son los costos.

Obtuvimos un costo de transporte aproximadamente en 0.03 dólares, si cambia este parámetro los costos totales también aumentan. Para obtener un costo actualizado del costo de transporte es necesario realizar una investigación aparte y no se dispone de ese tiempo, es por ello que este costo solo hace a una referencia aproximada comparado con el costo que nos muestra la literatura base de nuestra tesis de 0.1 dólares.

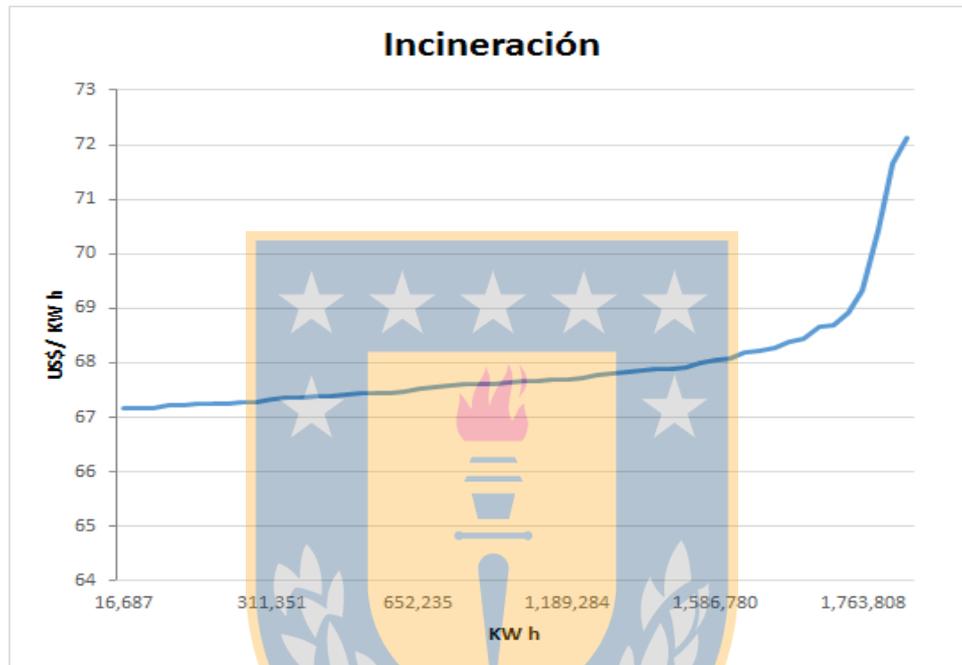
Nuestro estudio realiza un modelo de asignación considerando estos dos parámetros y la asignación se mantiene constante, es decir existe un incremento en el delta, pero el comportamiento es el mismo.



## 4 Resultados

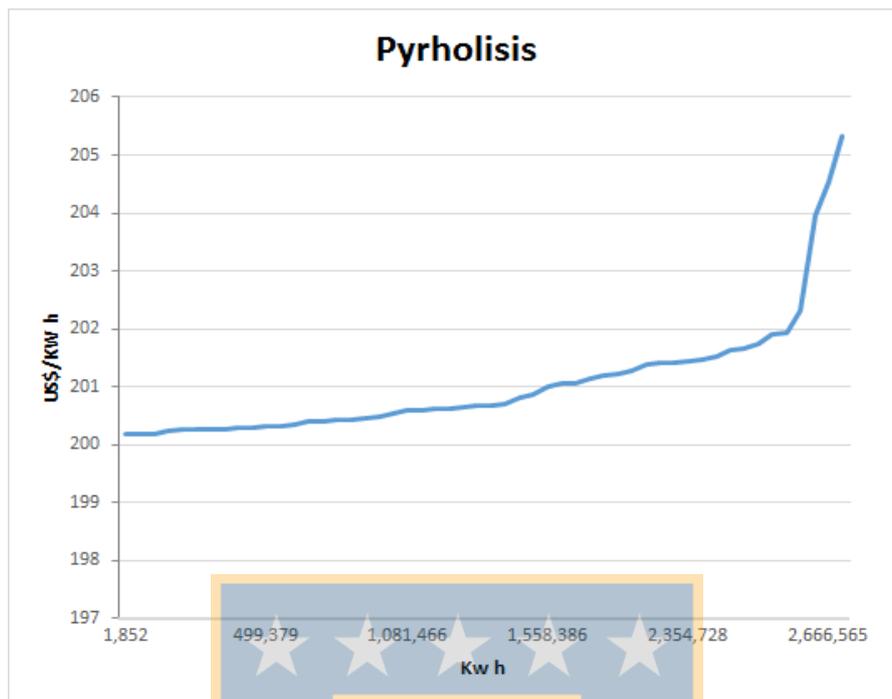
A continuación, se presentan los resultados obtenidos para distintas tecnologías: incineración, gasificación, pyrolysis y digestión anaeróbica. Cabe mencionar, que no se consideró el compostaje y vertedero debido a que no generan energía en comparación con las anteriores.

Figura N° 1: Curva de precios Incineración



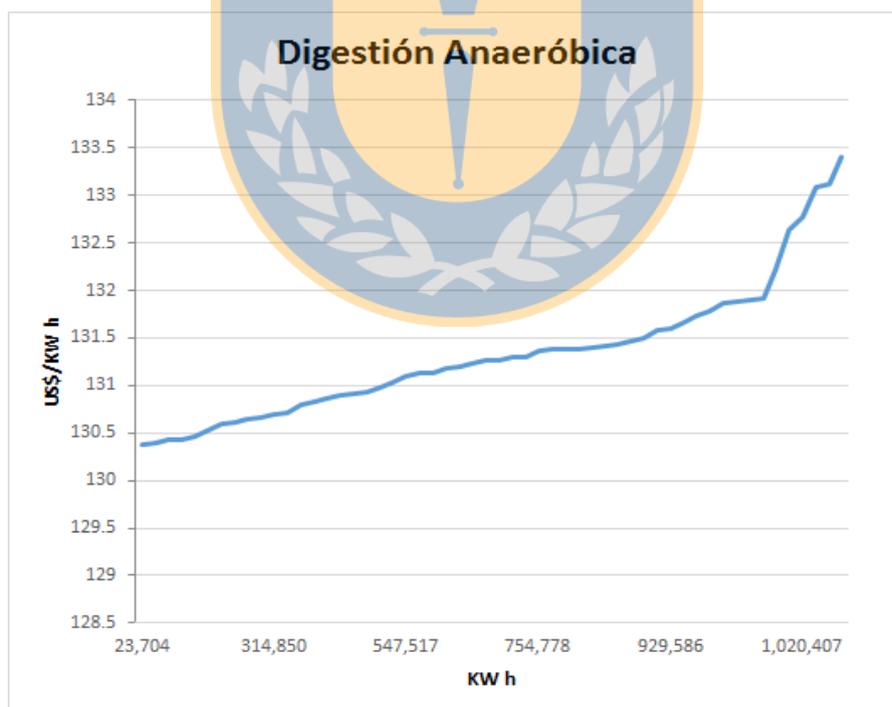
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 2: Curva de precios Pyrholisis



Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 3: Curva de precios Anaeróbica



Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 4: Curva de precios Gasificación.



Fuente: Elaboración Propia

Los gráficos mostrados anteriormente poseen una pendiente positiva puesto que si requerimos de más basura los costos suben, es decir, existe una relación directa entre ambas variables.

Ahora si mostramos se presenta un cuadro resumen (cuadro N° 5), en el cual se puede ver en números lo presentado anteriormente en los gráficos:

Cuadro N° 5: Costo de recolección en las distintas tecnologías.

MM ton KWH	Incineración	Gasificación	Digestión An.	Pyrolysis
500	67,4275	200,3225	131,261	130,954
1000	67,663	200,468	131,375	131,9095
1500	67,9645	200,9285	131,444	0
2000	0	201,1595	131,5955	0

Fuente: Elaboración propia

Según lo visto anteriormente, podemos deducir que la incineración es una de las tecnologías más eficientes ya que al incluir las tres restricciones del modelo; costos de recolección,

reducción del peso máximo de la basura y cantidad de electricidad generada; hemos podido apreciar que es la más barata ya que ésta genera más energía a un menor costo.

Cuadro N° 6: Comparativa de energías convencionales y no convencionales

<b>Energía</b>	<b>Tipo</b>	<b>Costo medio total (US \$/ kWh)</b>
Hidroeléctricas	Embalse	0.017
	Pasada	0.024
Termoeléctricas a base de gas	Gas Natural	0.0463
	Gas Natural a Diesel	0.0624
Termoeléctricas	Carbón	0.0493
	Diesel	0.0212
No Convencionales	Geotérmica	0.03
	Eólica	0.045
	Biomasa	0.035
	Solar	0.27
	Mini Hidro	0.03
<b>Basura</b>	<b>Incineración</b>	<b>67.93</b>

Fuente: Elaboración propia en base a Distribución y consumo energético en Chile.

El cuadro N° 6 muestra las diferentes fuentes de energía utilizadas en Chile y sus respectivos costos medios sin considerar la inversión inicial.

Si comparamos Incineración que corresponde a la fuente de energía más eficiente según nuestra investigación con Hidroeléctrica-embalse que posee un costo de 0.017 US \$/KGh no sería un proyecto rentable. Debemos considerar que bajo el contexto chileno este proyecto se aplicó en 5 fuentes distribuidas en 5 comunas ubicadas a x distancia en la Región Metropolitana lo que genera costos altos en comparación con Wendy Pei que estableció fuentes en cada municipio. Sin embargo, el costo podría disminuir si existieran mayores bonificaciones para el uso de energías renovables no convencionales como lo hace el gobierno de Noruega que financió la instalación de la planta de recuperación de energía llamada Klemestrud que transforma los desechos del país en electricidad para abastecer a las escuelas en Oslo y calefacción para la mitad del país.

Chile necesita una Ley que promueva fuertemente las ERNC a través de bonificaciones o primas similares a las establecidas por países en Europa. La idea es que a través de incentivos se permita viabilizar proyectos que actualmente no lo son aun con la existencia de la Ley 20.257. Además, crear mecanismos que estimulen a inversionista a ser partícipes de proyectos con una alta inversión inicial y riesgo.



## 5 Conclusión

Respecto a la revisión bibliográfica, se menciona a Wendy Pei et al. (2014), quien plantea un modelo sobre la problemática de los residuos buscando la manera de disminuirlos y a su vez generar energía. Considerando varios puntos de esta investigación como las tecnologías de procesamiento de la basura y el método de clasificación, se realiza este estudio, pero con los costos asumidos en Chile.

También se tomó en cuenta a los demás autores mencionados en la revisión bibliográfica, donde todos coinciden que la gestión de los residuos es de gran relevancia tanto para implementar el modelo WTE como para cuidar el medio ambiente. Además, la producción de energía bajo el escenario WTE es más alta en comparación con la energía renovable, destacando que las regiones que son capaces de obtener altas tasas de recolección selectivas de residuos muestran niveles más bajos de uso de vertederos. Es por esto que para obtener buenos resultados en el correcto uso de los RSU y de la matriz energética de la cual el país se encuentra en déficit, debe existir un compromiso de todos, tanto de los hogares con su clasificación de los residuos y del gobierno en conjunto con privados con un involucramiento en la implementación e inversión de nuevas tecnologías de procesamiento de la basura.

Cabe destacar un aspecto importante que es decidir para el éxito de las nuevas tecnologías de procesamiento de basura que es la “cultura de reciclaje” que poseen los países Europeos como Noruega y Suecia. El reciclaje es tan eficiente que los desperdicios no alcanzan para alimentar las plantas que ellos tienen instaladas para la generación de energía y calefacción por lo que decidieron importarla. Éste es el resultado de un compromiso que abarca a todos los noruegos, del más grande al más pequeño, en un país donde cuidar la naturaleza es prioridad nacional. Para lograr este objetivo es necesario un compromiso del gobierno alineado con la protección del Medio Ambiente como lo hace en Reino Unido con una tasa impuesta a los ayuntamientos por el uso de vertederos que orienta a promocionar el reciclaje.

Por ende, en este estudio se realizó un análisis en cuanto a cuán factible es procesar basura para generar electricidad, considerando solo la Región Metropolitana de Chile donde se seleccionaron 5 ciudades o fuentes de distintos puntos de Santiago, las cuales fueron Santiago Centro, San José de Maipo, Puente Alto, Buin y Lampa.

Este estudio se ha realizado en otros países, trabajos como el de Wendy Pei que considera cada fuente como una planta lo que hace al modelo más flexible, eligiendo las localidades más eficientes. Nuestra investigación considera puntos fijos en base a los costos de nuestro país además de la base datos de la UDT de la Universidad de Concepción del informe "Catastro Nacional Residuos Sólidos".

Finalmente, en nuestro estudio, la tecnología más eficiente para poder realizar este proceso es la incineración ya que a diferencia de las otras fuentes ésta tiene un costo menor, pero si lo

comparamos con respecto a las tecnologías convencionales y no convencionales existentes actualmente, no sería rentable ni competitiva con la energía producida por las hidroeléctricas. Esto nos lleva a una delimitación importante de nuestro estudio que es la optimización de la localización, puesto que no se utilizó un método de minimización de los costos en la elección del lugar, es decir, el método planteado establece que, para llevar la basura de las comunas a las 5 plantas, los camiones recolectores debieron recorrer grandes distancias donde cada municipio se acercaba a la planta más cercana lo que no garantiza que sus costos de transporte sean más bajos. Es por esto que sería necesario considerar un modelo que optimice el lugar.

Es importante mencionar que el costo de la planta no se incluyó en este estudio ni tampoco en la investigación de Wendy Pei y otros autores, es decir, las inversiones necesarias para la puesta en marcha, solo se consideró el costo de procesos tomando en cuenta las distintas tecnologías y la evidencia internacional. Además, al no poder comprar licencia del programa GAMS debido a su alto costo monetario y la escasez de recursos, los caracteres que soportaba la prueba eran mínimos por ello se consideró solo la Región Metropolitana y no se pudieron incluir las demás regiones del país. Posterior a este análisis, se podría seguir trabajando en él considerando el punto mencionado anteriormente, ya que éste es la base para continuar con diversos estudios, además de plantear el hecho de que el gobierno aumentará las bonificaciones e incentivos para el uso y aplicación de energías renovables no convencionales enfocadas a su vez en el uso potencial de energía de la basura permitiendo así que las conclusiones del estudio se enfocarán en la producción de energía más que en el costo de la implementación

Por todo lo anterior, nuestras conclusiones coinciden con las de Wendy Pei et. al. (2014), siendo los costos de las tecnologías para la implementación de las plantas y los procedimientos de clasificación de los residuos muy altos, lo que hacen que el proyecto no sea atractivo en términos económicos.

## 6 Referencias:

- Aedo M. (2004). Crisis energética en Chile: Rol y futuro de las energías renovables no convencionales, programa Chile Sustentable.
- Ambiente, M. d. (2011). [mma.gob. Obtenido de http://www.mma.gob.cl/1304/articles-52016\\_resumen\\_ejecutivo2011.pdf](http://www.mma.gob.cl/1304/articles-52016_resumen_ejecutivo2011.pdf).
- Ambiente, M. d. (2010). 2010-2014.gob. Obtenido de <http://www.2010-2014.gob.cl/media/2010/05/MEDIOAMBIENTE.pdf>.
- Cerdá E. (2014). Energía obtenida a través de Biomasa, Universidad Complutense de Madrid.
- Cucchiella F, D'Adamo I. & Gastaldi M. (2014). Strategic municipal solid waste management: A quantitative model for Italian regions, *Energy Conversion and Management*, 77, 709–720.
- Energía Solar Fotovoltaica en Chile Alfredo Olivares S. (2014), IX Foro Chileno-Alemán de Energías Renovables, Centro de Energías Renovables, Ministerio de Energía.
- Hui-zhen F, Zhen-shan L & Rong-hua W (2015). Estimating municipal solid waste generation by different activities and various resident groups in five provinces of China, *Waste Management*, 41, 3–11.
- Jara W, (2006). Introducción a las Energías Renovables no Convencionales (ERNC). Endesaeco.
- Kothari R, Tyagi V & Pathak A. (2010), Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 3164–3170.
- Münster M. & Meiborn P. (2011). Optimization of use of waste in the future energy system, *Energy*, 36, 1612–1622.
- Ouda O, Cekirge H & Raza, S. (2013) An assessment of the potential contribution from waste-to-energy facilities to electricity demand in Saudi Arabia, *Energy Conversion and Management*, 75, 402–406.
- Palavecino, A. B. (17 de 05 de 2012). La Tercera. Obtenido de <http://www.la-tercera.com/noticia/chile-lidera-produccion-de-basura-anualmente-en-latinoamerica/>
- Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile, (Basado en el Proyecto “Levantamiento, Análisis, Generación y Publicación de Información Nacional sobre Residuos Sólidos de Chile) (2010).

- Sie Ting T, Wai Shin H, Haslenda H , Chew Tin L, Mohd Rozainee T & Chin Siong H (2015). Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia, *Energy Conversion and Management*, 102, 111–120.
- Sie Ting T, Chew Tin L, Haslenda H, Wai Shin H & Jeng Shiun L (2014). Optimal process network for urban solid waste management in Iskandar Malaysia, *Journal of Cleaner Production*, 71, 48–58.
- Stehlík P. (2009). Contribution to advances in waste-to-energy technologies, *Journal of Cleaner Production*, 17, 919–931.
- Tabasová et al (2012). Waste-to-energy technologies: Impact on environment, *Energy*, 44, 146–155.
- Tippayawong N. (2009). Feasibility Assessment of RDF Utilization for Power Generation in Thailand, *International Journal of Renewable Energy*, 4, No. 1.
- Vásquez O (2004). Modelo de simulación de gestión de residuos sólidos domiciliarios en la Región Metropolitana de Chile, *Revista de Dinámica de Sistemas*, 1, Núm. 1, 27-52.
- Wendy P, Hon Loong L, Petar Sabev V & Jiří Jaromír K (2014). Waste-to-Energy (WTE) network synthesis for Municipal Solid Waste (MSW), *Energy Conversion and Management*, 85, 866–874.
- Yay E. (2015) Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya, *Journal of Cleaner Production*, 94, 284–293.