

Universidad Nacional Autónoma de México



Facultad de Ingeniería

**Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el
Ciclo de Vida de un Calentador Solar Doméstico**

Tesis Profesional

que para obtener el título de

Ingeniero Industrial

Presenta:

Jordi Messeguer Gally

Director de Tesis: Dr. Fabio Luigi Manzini Poli



Agradecimientos

A mis papás por creer en mí y por siempre ser más que el apoyo necesario para llegar a este punto. A mi Mamá en especial por ser toda una madre “Honoris Causa” con todo lo que ello implica. A mi Papá por ser ese ejemplo y contagiarme con su pasión.

A mis hermanos, por siempre aguantar y por caminar conmigo durante la vida.

A mi abuela, por aguantarme toda la carrera, y por su tortilla de papas.

A mis tíos y primos por siempre tener una palabra de aliento.

A mis amigos, los de toda la vida: Ezequiel, Karlos, Enrique, Fabián, Daniel, Leonardo, Israel, Karely, Manuel y Paulina.

Al director de mi tesis el doctor Fabio Manzini por su paciencia y buen humor, y por supuesto a los sinodales por sus comentarios,

A todos mis maestros que durante toda la carrera dejaron algo en mí, siempre bueno.

A todo el personal administrativo y de base de Modulo Solar por abrir sus puertas, en especial a la Familia García Valladares por todas sus atenciones.

A la Facultad de Ingeniería

A la Universidad Nacional Autónoma de México

“A Hombros de Gigantes”

Índice de contenido

Capítulo 1. Introducción.....	7
1.1 Antecedentes	7
Cambio Climático.....	7
Energías Renovables: calentador solar de agua para uso doméstico.....	10
1.2 Análisis del Ciclo de Vida	13
Normas ISO.....	13
Fases del Ciclo de Vida.....	14
Enfoque sistémico del Análisis del Ciclo de Vida.....	15
Variantes del ciclo de vida.....	16
Eco-Indicator 99.....	17
.....	18
1.3 Planteamiento del problema.....	21
Objetivo.....	21
Hipótesis.....	22
Justificación.....	22
Capítulo 2. Metodología.....	24
2.1 Definición de Objetivo y Campo de Estudio.....	24
2.2 Aplicación de la metodología del ACV.....	24
2.3 Inventario del Ciclo de Vida.....	26
Producción del absorbedor.....	26
.....	29
Habilitado de los componentes de la caja.....	29
Armado final.....	32
Empleo de energía.....	34
2.4 Suposiciones y selección de datos de entrada del inventario.....	36
Capítulo 3. Resultados de la Evaluación del Impacto.....	38
Emisiones equivalentes de dióxido de carbono.....	38
Eco-Indicator 99: Evaluación de impactos en Salud, Recursos y Calidad del Ecosistema.....	41
Individualista.....	41
Igualitaria.....	42
Jerárquica.....	42
Capítulo 4. Interpretación.	44
4.1 Tiempo de recuperación de las emisiones	44
4.2 Análisis por perspectiva y categorías.....	50

Análisis por Categorías de Impacto.....	51
Análisis por perspectivas.....	53
4.3 Eco-Indicator 99: Análisis de resultados.....	56
Capítulo 5. Conclusiones.....	60
Anexos.	62
I. Estimaciones para el termo tanque.....	62
II. Comparación entre las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción de un Mega Joule Eléctrico para América del Sur y para México.	63
III. Resultados completos de las emisiones atmosféricas.	64
Referencias.....	69
Índice de Ilustraciones.....	72
Índice de Tablas.	73

Capítulo 1. Introducción

Hoy en día en la industria, sea de manufactura o de servicios, hay un interés creciente respecto a la conservación del medio ambiente y a la problemática mundial de cambio climático. Las organizaciones están buscando reducir en la mayor cantidad posible las emisiones de gases de efecto invernadero, como son: metano, dióxido de carbono, y óxidos nitrosos, cuya emisión ha demostrado tener una fuerte correlación con el cambio climático.

Existen diversos acuerdos a nivel internacional, a nivel local e incluso a nivel regional, sobre la necesidad urgente de reducir las emisiones y así frenar o disminuir el impacto sobre el medio ambiente. A pesar de ello poco se ha hecho a nivel industria para atacar el problema, aunque hay que destacar que se han desarrollado industrias limpias, y energéticamente eficientes, planes y programas desde los gobiernos para alentar este tipo de certificaciones, incluso existe una serie de normas ISO (*International Organization of Standardization*) relativa al medio ambiente (ISO14000). Todo ello con el único objetivo de alcanzar una producción de bienes y servicios de manera sustentable.

Los criterios para un desarrollo sustentable fueron definidos en la Declaración de Río de Janeiro Sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. El primero de ellos es el derecho de todas las personas a la vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza.

El desarrollo sustentable, del que se habla en el párrafo anterior, lo define la Organización de las Naciones Unidas (ONU) de la siguiente manera: “Desarrollo que satisface las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades” (*Organización de las Naciones Unidas Centro de Información para México, Cuba y República Dominicana, 1992*).

1.1 Antecedentes

Cambio Climático

Actualmente la amenaza del cambio climático está latente y en muchos aspectos empezamos a sentir sus estragos. El cambio climático ha sido explicado en distintos foros y con distintos ponentes.

Podemos definir el fenómeno como una modificación al clima, tanto natural como humana, a una escala global y respecto a un historial de registros. Se puede percibir y medir en diversos parámetros como la nubosidad, la precipitación, el aumento de: la temperatura, de las sequías y del nivel del mar; así como el aumento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos destructivos como huracanes o frentes fríos.

La ONU definió puntualmente el cambio climático como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera y se suma a la variabilidad natural del clima observada en periodos de tiempo comparables (*Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático*)

Existen muchas variables que definen el clima en una zona y en nuestro planeta. Estas van desde la órbita terrestre, la emisión de energía irregular del sol, erupciones volcánicas y otras variables naturales. Muchos autores han desestimado la actividad humana y han dado a estos fenómenos naturales un peso preponderante en el fenómeno de cambio climático. Lo cierto es que ni todos estos fenómenos juntos, explican el total de las variaciones.

La inmensa mayoría de la comunidad científica mundial está de acuerdo en que este fenómeno se debe al cambio en las concentraciones de ciertos gases, conocidos como de efecto invernadero sobre la atmósfera terrestre. Estos gases son en su gran mayoría, emitidos debido a la creciente actividad humana, por lo que se les conoce como emisiones antropogénicas.

Los principales gases de efecto invernadero son desde el aparentemente inofensivo vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, los óxidos nitrosos y los gases fluorados.

El vapor de agua es el principal gas de efecto invernadero al cual le debemos dos terceras partes del fenómeno natural de efecto invernadero. El vapor es parte del ciclo hidrológico y las actividades humanas no emiten vapor de agua a la atmósfera; pero si la temperatura del aire se eleva, este puede retener más humedad e indirectamente generar más vapor de agua.

El dióxido de carbono es el elemento que más contribuye al efecto invernadero antropogénico. En los países industrializados se calcula que el 80% del efecto de las emisiones de gases de efecto invernadero son de dióxido de carbono (CO₂). En nuestro planeta existe una cantidad limitada de carbono que pertenece a un complejo ciclo donde el carbono se desplaza a través de la atmósfera, a los

océanos y a la biósfera. Las plantas absorben CO_2 para el proceso de foto-síntesis y lo liberan a la atmósfera cuando mueren e inicia su descomposición. Los humanos y los animales están constituidos de carbono, además lo ingieren con las plantas y otros animales que a su vez comen plantas, este carbono lo liberan tanto con la respiración como en la descomposición posterior a la su muerte.

Cada año se intercambian millones de toneladas de CO_2 de forma natural entre la atmósfera, los océanos (que absorben CO_2 , que en forma disuelta, se utiliza en la fotosíntesis marina) y la vida vegetal terrestre. Estudios revelan que las variaciones de la concentración de CO_2 no fueron de más del 10% durante los 10,000 años anteriores a la revolución industrial. A partir de esta, y con la quema masiva de combustibles fósiles, la concentración de CO_2 ha aumentado cerca de 30% esto significa la emisión anual de 25,000 millones de toneladas de CO_2 . El CO_2 puede permanecer en la atmósfera entre 50 y 200 años según como sea su ciclo.

El metano es el segundo gas de efecto invernadero antropogénico que contribuye en un 15% en el calentamiento global para el caso de los países industrializados. Desde los inicios de la Revolución Industrial las emisiones de metano (CH_4) se han duplicado y han contribuido en un 20% al incremento en el efecto invernadero.

El metano es producto de la descomposición anaerobia de bacterias. El metano emana de fuentes naturales y de fuentes influenciadas por el hombre, siendo estas últimas la mayoría. Las fuentes antropogénicas son: la minería, la quema de combustibles fósiles, la cría intensiva de animales, el cultivo de arroz, las fugas de hidrocarburos, los tiraderos a cielo abierto y los rellenos sanitarios.

Lo más perjudicial del CH_4 es que su capacidad de absorber energía en forma de calor es 23 veces mayor que el dióxido de carbono, aunque su ciclo de permanencia en la atmósfera es de entre 10 y 15 años lo que lo hace mucho más corto que el dióxido de carbono.

El siguiente gas de efecto invernadero en importancia es el óxido nitroso (N_2O) el cual se libera en forma natural de las selvas tropicales y los océanos producto de la descomposición bacteriana del suelo. Las fuentes antropogénicas son: la quema de combustibles fósiles, el uso de abono y fertilizantes a base de nitrógeno, la producción química industrial y el tratamiento de residuos.

En los países industrializados el N_2O representa el 4% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Desde el inicio de la Revolución Industrial la concentración de N_2O ha aumentado en un

16% aproximadamente y esto ha contribuido entre un 4% y 6% a acentuar el efecto invernadero. La capacidad de absorber calor del N₂O es 310 veces más que la del dióxido de carbono y permanece en la atmósfera hasta por 170 años.

Los gases fluorados de efecto invernadero son los únicos que solamente tienen una componente antropogénica en sus emisiones. Fueron creados por el hombre con fines industriales y pueden atrapar y concentrar el calor 22,000 veces más que el dióxido de carbono con un tiempo de permanencia en la atmósfera de miles de años.

El ciclo natural por el cual la energía solar calienta la superficie de la Tierra implica una reflexión de calor como energía infrarroja hacia la atmósfera; esta fase se ve interrumpida por la absorción de los ya mencionados gases de efecto invernadero, provocando una elevación de la temperatura. Este efecto se da naturalmente, de hecho permite que se desarrolle la vida en la Tierra. Tal como un invernadero común, permite que la temperatura media de nuestro planeta sea de 15°C. Sin el efecto invernadero natural los científicos calculan que la temperatura de la Tierra podría ser hasta de -18°C.

Energías Renovables: calentador solar de agua para uso doméstico.

La Agencia Internacional de Energía estima que el 35.3% de la oferta energética es empleada en el sector doméstico (*Renewal Cooling and Heating, IEA2006*) del cual el 75% se emplea en calentamiento de espacios o de agua.

En nuestro país en el 2005 el sector Residencial, Comercial y Público registró el 20.62% del consumo final energético, esto representa 842.182 [petaJoules] de los cuales el 83.6% corresponde al consumo en el sector doméstico (*SENER, 2006*). La fuente principal de energía primaria para satisfacer las necesidades de este sector fue el Gas Licuado de Petróleo (GLP) con una participación del 39.1%.

La tecnología solar para aplicaciones térmicas ha demostrado ser altamente rentable y competitiva dentro de ciertas circunstancias. Es considerada una tecnología bastante madura; de hecho hace más de 30 años que se encuentran disponibles comercialmente, calentadores solares.

Los calentadores solares son una de las aplicaciones más sencillas de la energía solar en casas habitación, y los que hasta ahora han tenido un gran éxito comercialmente son los calentadores solares de agua. Desde la década de los 30 existen calentadores solares, pero con la introducción del gas natural

barato estos fueron quedando en desuso.

El calentador consta de un colector solar plano, un depósito de agua caliente llamado termotanque (con buen aislamiento) y sistemas de tuberías y control. Un diagrama típico de instalación de un calentador solar con alimentación por gravedad se muestra en la ilustración 1.

La temperatura necesaria para el baño, el lavado de ropa y el lavado de trastes es de 38°C aunque estos estándares pueden variar de país a país. Se estima que en Israel el consumo de agua caliente es de 120 litros por una familia de 4 personas, es decir 30 litros por persona por día. Por otro lado Estados Unidos estima que su población consume alrededor de 75 litros de agua caliente por persona por día.

Actualmente las líneas de investigación más importantes tienen como objetivo mejorar el aislamiento de los tanques de almacenamiento ya que en zonas con inviernos muy extremos se pierde toda la energía por radiación.

Para calentar el agua con una demanda continua la inclinación óptima de los calentadores durante todo el año es de 10° más la latitud del lugar donde se instale.

El proceso de transferencia de calor es: el agua caliente circula a través del colector y hacia el termotanque por el efecto de la convección térmica natural (diferencia de densidades) conocido como termosifón, sin que sea necesario emplear bombas o equipos adicionales. El termotanque se localiza por encima del colector para evitar que durante la noche el agua fría del panel circule con el mismo efecto invertido.

Existen diversas variaciones para el diseño de calentadores. En lugares donde la temperatura en las noches es inferior a los 0°C es necesario utilizar un líquido de trabajo distinto al agua. Es decir, el líquido circulara a través del panel, se calentará y en el termo tanque es donde cederá su calor al agua.

Para hacer atractiva la inversión en un sistema de calentamiento solar es importante que el usuario amortice su inversión en menos de tres años.

A partir de la década de 1990 el mercado de calentadores solares, a nivel mundial, ha presentado un franco crecimiento. Para el final del año 2001 se tenía una superficie instalada de 100 millones de metros cuadrados en 26 países en los que se concentra el 50% de la población mundial, y que aproximadamente representan el 85% al 90% del mercado de energía solar a nivel mundial.

Esta área se distribuye en tres tipos de calentadores: el primero son calentadores sin recubrimiento de vidrio que son utilizados principalmente para calentamiento de albercas; el segundo son calentadores solares planos con recubrimiento de vidrio o plástico transparente y que se utilizan en calentamiento de agua para uso doméstico; por último los calentadores de tubos evacuados que tienen aplicaciones similares a los anteriores.

En total para el año 2001 nuestro país tenía instalados 430,490 metros cuadrados de superficie colectora. Esta superficie esta dividida en 320,000 metros cuadrados de calentadores sin cristal para calentamiento de albercas, que representa el sexto lugar a nivel mundial. El resto que suman 110,490 metros cuadrados de calentadores con cristal para aplicaciones domésticas nos sitúa en el lugar número 20 a nivel mundial.

En total, a nivel mundial se estima que las emisiones anuales que se evitan por el uso de calentadores solares de agua asciende a los 18,166,848 toneladas de dióxido de carbono equivalente. Nuestro país contribuye con evitar 84,820 toneladas al año de CO_{2eq}.



Ilustración 1: Diagrama de los componentes de un calentador solar para agua

1.2 Análisis del Ciclo de Vida

Considerando que toda producción de bienes o servicios involucra de manera directa o indirecta el consumo tanto de energía como de materias primas, se desarrolló una metodología conocida como “Análisis de Ciclo de Vida”, la cual tiene como objetivo hacer una evaluación integral del producto desde su concepción hasta su disposición final.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) está definido en la serie de normas ISO 14000 como “la compilación y evaluación de los suministros y salidas junto con sus potenciales impactos al medio ambiente de un producto, a lo largo de su ciclo de vida”.

El ACV es una herramienta que permite evaluar el impacto ambiental de un producto a lo largo de las diferentes etapas de producción del mismo. Esto incluye desde la extracción de las materias primas, a lo largo de su transformación, el uso del producto durante su vida útil (i.e. el periodo de tiempo durante el cual el producto satisface o excede los requerimientos para los que fue creado) y su disposición final o reciclaje. A este conjunto se le conoce como sistema de producción.

Una característica del ACV es que, en principio, únicamente toma en cuenta aspectos estrictamente cuantitativos y deja de lado los aspectos cualitativos que pudieran incidir en el resultado.

Las aplicaciones ambientales más importantes del ACV están en:

- Analizar el origen de los problemas relacionados con un producto en particular,
- comparar mejoras o variantes de un mismo producto,
- diseño de nuevos productos,
- escoger entre un número de productos similares.

Normas ISO

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO por sus siglas en inglés) ha establecido un conjunto de normas relacionadas al ACV. Estas normas son:

- ISO 14040: en esta norma se definen los principios y la estructura básica de un ACV.

- ISO 14041: esta norma define los objetivos, campo de aplicación y la forma de hacer el análisis de inventarios.
- ISO 14042: Se utiliza para hacer el estudio en el impacto del ciclo de vida en el medio ambiente.
- ISO14043: por último, esta norma dicta los estándares para la interpretación del análisis.

Fases del Ciclo de Vida

De acuerdo con la normatividad ISO 14040 y 14044 el ACV se divide en cuatro fases:

1. Objetivo y ámbito de estudio:

En esta fase se hacen las consideraciones iniciales como lo son el plan de acción, las preguntas exactas que se plantean responder, a quien va dirigido y que aplicaciones va a tener el estudio. El ámbito de estudio esta definido por términos como la temporalidad, la ubicación geográfica, la tecnología empleada y el nivel del estudio respecto al objetivo planteado. Es importante que en esta fase se definan las unidades ambientales que van a ser empleadas, por ejemplo [kilogramos/energía]. Por último se describe el producto o productos que van a ser estudiados.

2. Inventario del ciclo de vida:

En esta etapa del estudio se define el o los sistemas de producción que se van a estudiar. Esto incluye las fronteras del sistema y las relaciones entre otros sistemas satélite del sistema principal. Se incluyen también diagramas de flujo de materiales y datos relevantes sobre la producción. El resultado final de esta fase es una lista que incluye las entradas o suministros y las salidas o productos asociados.

3. Evaluación del impacto:

En este tercer punto se evalúa los posibles impactos humanos y ambientales por el uso de materiales, energía y agua. También evalúa las relaciones entre sistemas identificadas en el análisis de inventarios. Además en esta etapa se estandarizan los resultados para facilitar su comparación con otros productos.

4. Interpretación:

La interpretación del ciclo de vida es la fase en la que los datos recolectados y las consideraciones hechas a lo largo del estudio son evaluadas en términos de la robustez del objetivo. Los elementos

principales de esta fase son la evaluación y el análisis de los resultados así como la redacción de conclusiones y recomendaciones.

En la ilustración 2 se muestran esquemáticamente las principales fases del ACV.

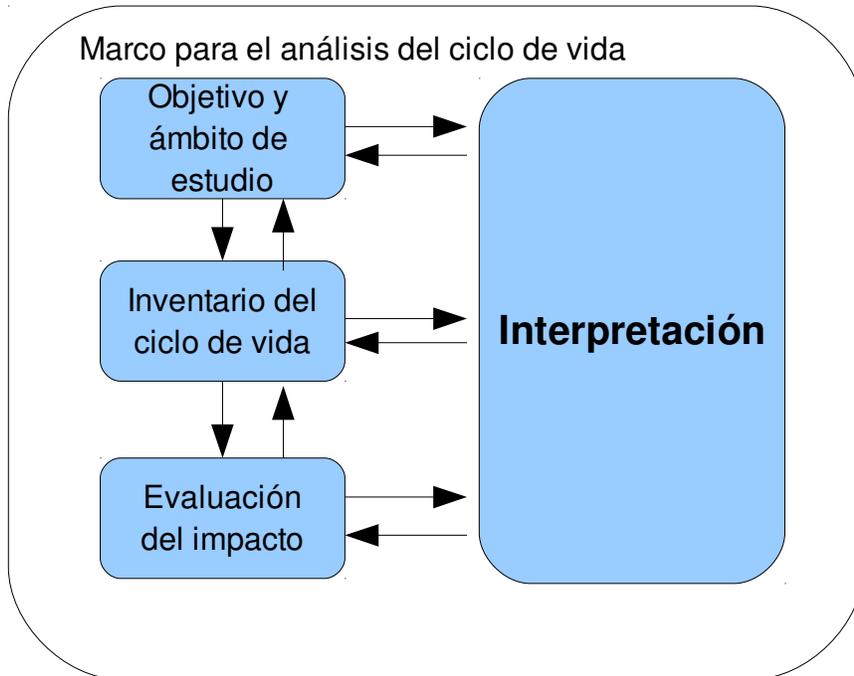


Ilustración 2: Fases del análisis del ciclo de vida

Enfoque sistémico del Análisis del Ciclo de Vida

El ACV es un proceso que se hace a lo largo de la vida de un producto. Por lo tanto puede ser representado como un sistema a evaluar. En este caso lo que es importante evaluar son las salidas que impactan directa o indirectamente al medio ambiente. Difiere de un sistema convencional donde el objetivo es analizar las salidas (productos terminados o en proceso) respecto a las entradas (materias primas y energía) con su respectivo valor agregado.

La forma más común de representar un sistema es como una caja negra en la que se muestran las entradas y las salidas. En este caso, en la Ilustración 3 se muestra una versión de esta representación para el ACV.

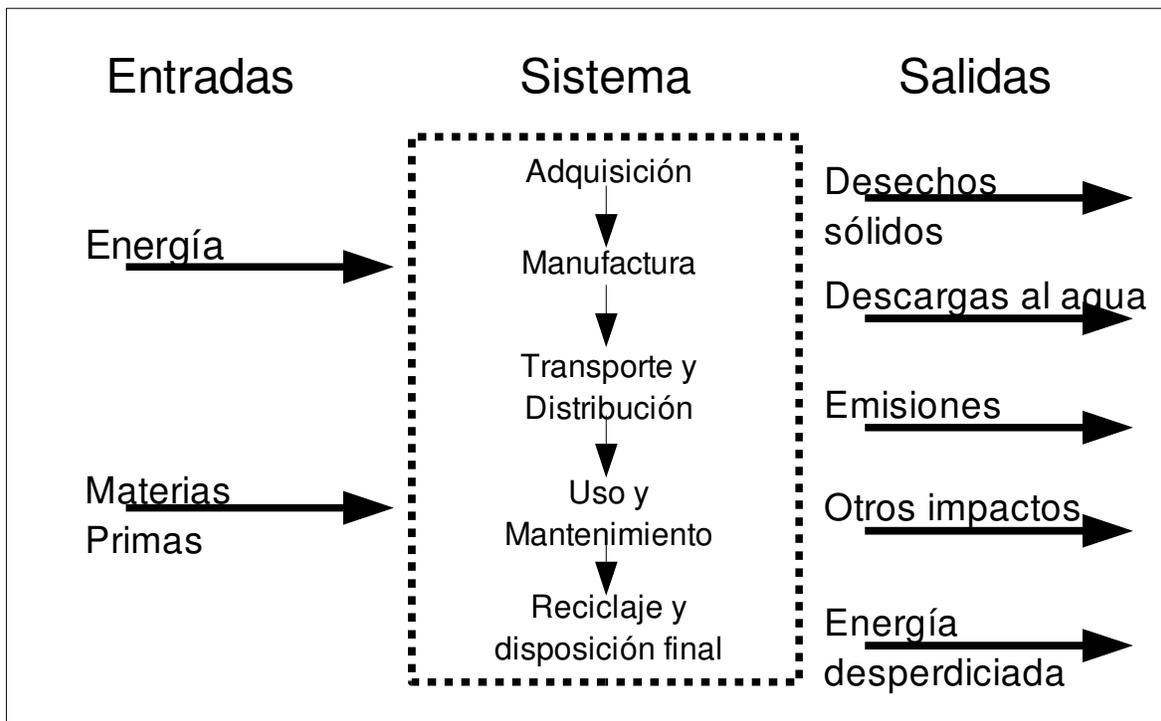


Ilustración 3: Enfoque sistémico del Análisis del Ciclo de Vida.

Variantes del ciclo de vida

Según la complejidad, o según las fronteras que se establezcan para el sistema existen algunas variantes del ciclo de vida. A continuación se presentan algunos de los más comunes, posteriormente se muestra un diagrama con las principales variantes (Ilustración 4).

- De la cuna a la tumba: Este es el análisis más completo. Las fronteras del sistema están, primero, en la extracción de la materia prima y por último en la disposición final. Contempla la mayor cantidad de procesos de manufactura, de transporte, de mantenimiento y de desarme. En inglés se conoce como “*cradle to grave*”.
- De la cuna a la puerta: Traducción de “*cradle to gate*” en inglés, este análisis contempla desde la extracción de las materias primas hasta la salida de la manufactura omitiendo el proceso de transporte, instalación, uso y disposición final. Son muy útiles para reportes y declaraciones ambientales de productos.
- De la cuna a la cuna: En este análisis se incluye también el reciclaje de los productos y su inclusión en otros ciclos de vida. Es una ampliación de la primer variante (de la cuna a la tumba).

- De puerta a puerta: En la realización de este análisis, solamente se estudia el impacto ambiental a lo largo de la cadena de producción. Con esto se evitan los procesos de extracción, transporte, mantenimiento y disposición.
- De llanta a llanta: Representa un estudio específico sobre la eficiencia y el impacto ambiental del transporte en el ciclo de vida.
- Análisis económico del ciclo de vida: Resulta ser el análisis más general que existe. En el, se estudian los sectores económicos y sus relaciones.

Eco-Indicator 99.

Hasta el día de hoy se han desarrollado muchas metodologías que permiten analizar los resultados del ACV en su fase de inventario. La mayoría de estas herramientas pueden ser clasificadas en dos grandes rubros según su orientación principal: orientadas hacia un tema u orientadas hacia el daño causado según los resultados de la fase de inventarios. El Eco-Indicador 99 tiene una clara orientación hacia la segunda, el daño causado. El antecedente del Eco-Indicador 99 es el Eco-Indicador 95. Cabe mencionar que esta metodología de evaluación es un proyecto del Ministerio Holandés para la Planeación de Espacios, Medio Ambiente y Urbanismo.

Esta metodología define tres categorías de daño en las que se enfocarán los resultados, éstas son: Salud Humana, Calidad del Ecosistema y Recursos. Además arroja los resultados en diferentes representaciones para su análisis: Caracterización, Normalización, Ponderación y Análisis del Impacto.

Para la categoría de Salud Humana, la metodología trabaja con algunos aspectos relacionados directamente con el impacto del ciclo de vida y excluye algunos elementos indirectos como la salud del trabajador, los riesgos por desastres naturales y aspectos económicos. Para su cuantificación se emplea la unidad DALY (*Disabilite Adjusted Life Years*). Esta unidad intenta agrupar algunos elementos como lo son los individuos afectados por el problema, el tiempo en que las personas sufren una discapacidad y el tiempo de vida perdido por una muerte prematura. Es importante mencionar que este es un tema que presenta un componente ético muy importante en su dimensión y que pocas veces es posible asignarle un valor adecuado.

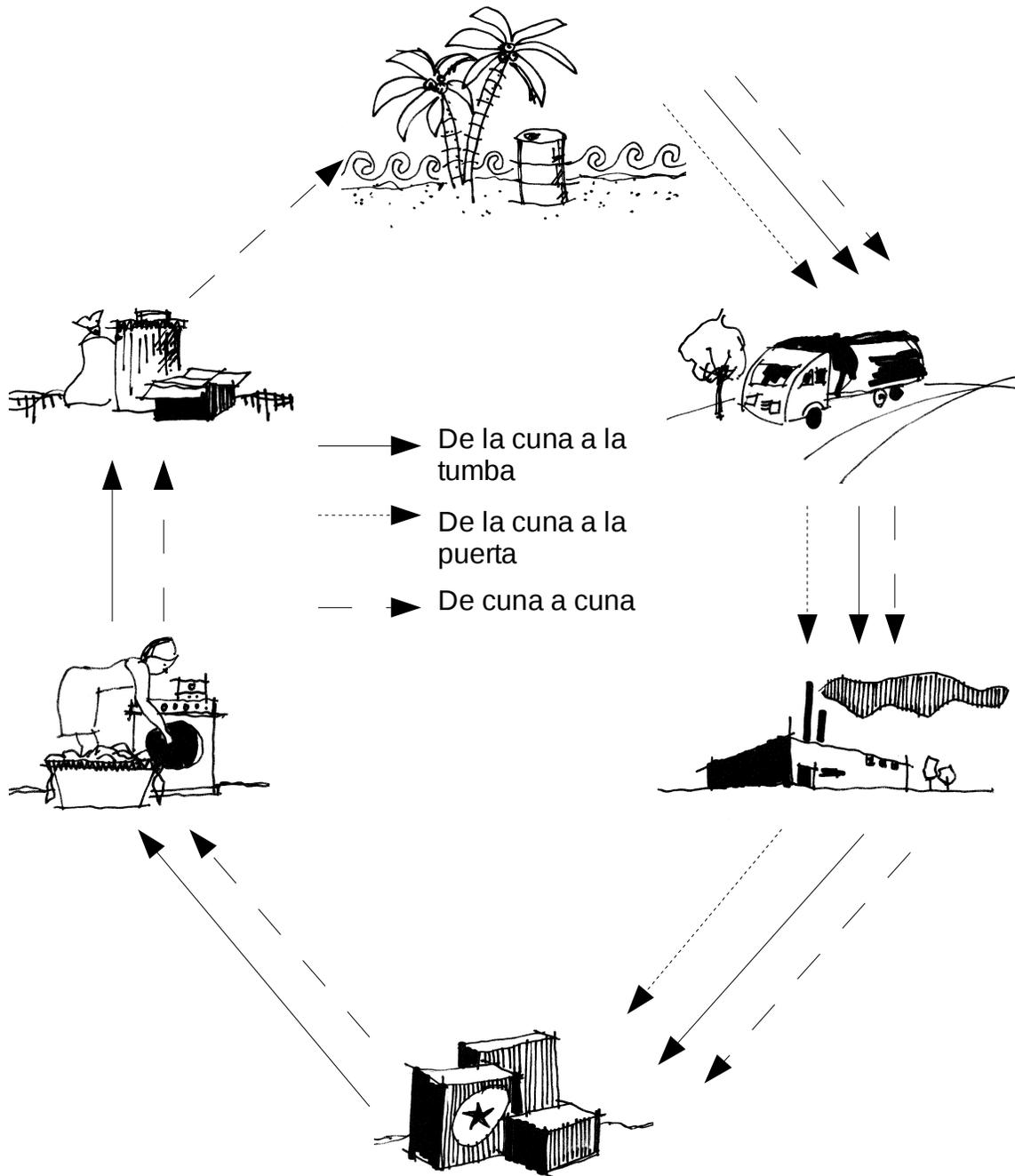


Ilustración 4: Esquema de las variantes del ciclo de vida

En la categoría de calidad del ecosistema es importante situarnos en la complejidad que representa un ecosistema debido a su tamaño y heterogeneidad. Algunos atributos importantes de un ecosistema (sin ser los únicos) son: la biodiversidad, el valor cultural e histórico, los servicios y

funciones del ecosistema así como los recursos que pueden ser extraídos de él.

Para modelar un ecosistema de una manera simple, lo podemos visualizar como un sistema en el que fluyen materiales, energía e información. A medida que estos flujos no son alterados de manera significativa por una actividad humana se puede hablar de una alta calidad del ecosistema.

A diferencia de la categoría anterior, en este caso es difícil asignar una sola unidad que represente la calidad del ecosistema. Las dos unidades escogidas son: PAF (*Potentially Affected Fraction of Species*) la cual se puede emplear para medir principalmente, la toxicidad del ecosistema. En los casos en que se requiera medir la acidificación, eutroficación y el uso de la tierra se utilizan los PDF (*Potentially Disappeared Fraction*) que se puede interpretar como la fracción de especies que tienen una alta probabilidad de no encontrarse en una cierta región en condiciones adversas. En general se utiliza esta última unidad ampliándola e incluyendo los parámetros de área y de tiempo [PDF* m^2 *año].

Por último, la categoría de Recursos vuelve a presentar el mismo problema de la complejidad del tema. De hecho para este caso no existe un acuerdo internacional para definir precisamente el daño que se provoca al sistema por la extracción de recursos. Para atacar el problema se ha convenido dividirlo en dos partes: la reducción en la concentración de los recursos y el superávit de energía que será necesario para poder compensar la escases de minerales en un futuro.

La metodología aplicada para esta categoría asume que, a medida que la explotación de un mineral se incrementa y manteniendo la calidad de dicho material constante, se incrementará el esfuerzo necesario para extraer los minerales restantes. A partir de esta suposición, la unidad que se emplea es el Mega Joule que representa este superávit energético necesario para satisfacer, de los materiales involucrados, a las futuras generaciones.

Respecto a las representaciones que se utilizan empezaremos con describir la Normalización. Con esta representación podemos determinar la contribución relativa de un cierto daño al daño total marcado como referencia, este daño referencial puede ser la suma de los daños. Por ejemplo, para calcular la contribución de las emisiones de dióxido de carbono podemos hacerlo respecto a la suma del resto de las emisiones atmosféricas o respecto a la suma de un conjunto en específico. La utilidad de esta representación está en detectar errores, proveer información relativa y preparar los datos para otros

indicadores y representaciones.

La ponderación, asigna valores arbitrarios a los datos normalizados para distinguir el peso de un daño sobre el de otro. Estos valores suelen representar la visión de los investigadores o de la comunidad. Para complementar esta representación, se incluye un triángulo en donde el usuario puede definir la ponderación que le quiere dar a cada categoría y sobre eso arrojar un resultado.

Por último la representación de evaluación del daño es parecida a la anterior pero aplica una ponderación determinada por un conjunto de 365 científicos europeos.

Además la metodología del Eco-Indicador 99, nos presenta tres distintas perspectivas para analizar el impacto. Estas perspectivas son:

- Jerárquica: Entre sus características está que mantiene un balance entre el corto y el largo plazo y que los daños que se presentan pueden ser evitados o disminuidos con la aplicación de políticas correctas.
- Individualista: Su enfoque es hacia el corto plazo y considera únicamente efectos probados sobre las tres categorías anteriormente presentadas.
- Igualitaria: la temporalidad es a muy largo plazo e incluye todos los efectos dañinos posibles.

La siguiente tabla presenta la ponderación que se le da a cada categoría durante la normalización para cada una de las perspectivas que se presentaron anteriormente:

Categoría/Perspectiva	Jerárquica	Igualitaria	Individualista
Salud Humana	40%	30%	55%
Calidad del Ecosistema	40%	50%	25%
Recursos	20%	20%	20%

Tabla 1: Factores de normalización y ponderación predeterminados

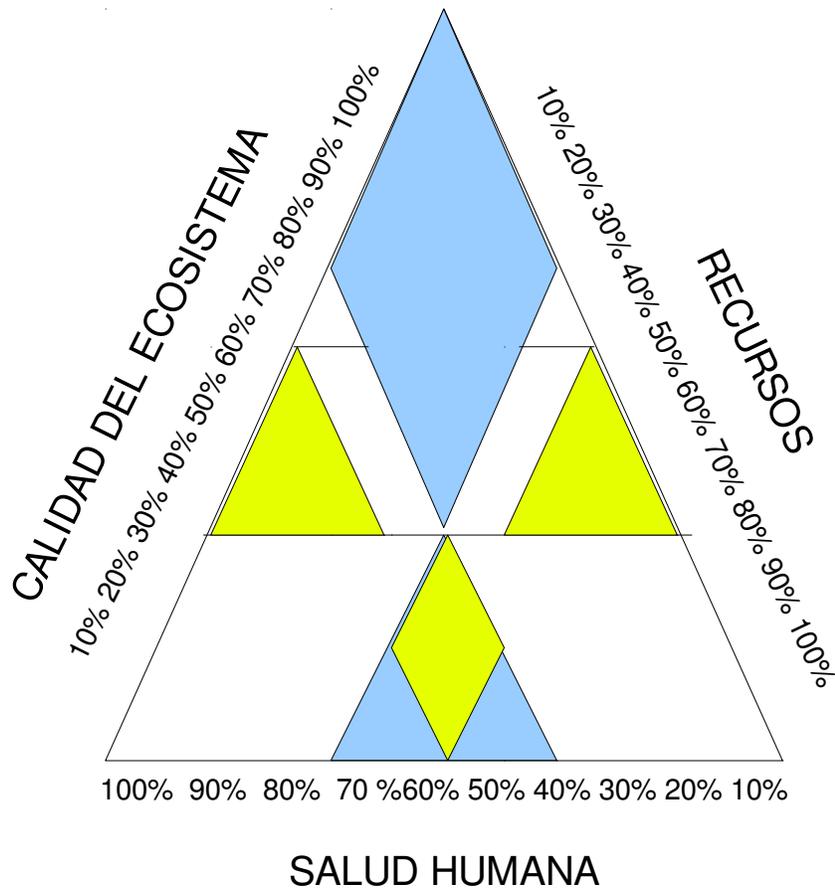


Ilustración 5: Ejemplo de un triángulo de ponderaciones para el Eco-Indicator 99

1.3 Planteamiento del problema

Objetivo

El objetivo de la presente tesis es estudiar el ciclo de vida de un calentador solar de agua para uso doméstico. Así mismo evaluar la cantidad de dióxido de carbono que se emite tanto directa como indirectamente en su ciclo de vida, calculando las emisiones evitadas de dióxido de carbono, respecto a un calentador de agua de gas licuado de petróleo, i.e. las que se dejan de emitir por el uso del calentador a lo largo de su vida útil.

Hipótesis

Los calentadores solares a pesar de que son considerados como energías limpias, presentan impactos ambientales relacionados con los materiales, su extracción, manufactura, transporte, uso, mantenimiento y disposición final. Sus principales impactos son en emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, estos impactos se dan relacionados con el consumo de energía eléctrica en todas las fases del ciclo de vida.

Como una segunda hipótesis se tiene que, todas las emisiones son amortiguadas en periodos cortos de tiempo (menores a dos años) lo que representa que a lo largo de la vida útil del calentador, se están evitando importantes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero al medio ambiente.

Justificación

La justificación de esta tesis está en la importancia que tiene en la formación del Ingeniero Industrial la conciencia por el cuidado de los recursos y del medio ambiente. Hoy por hoy, es importante considerar en todas las líneas de producción el impacto ambiental y más aún si el producto que se está fabricando es vendido como un producto ecológico o un producto sustentable.

En muchos países de Europa, existen organizaciones certificadoras de lo que se conoce como huella de carbono (emisiones de dióxido de carbono equivalentes para la producción de un producto o servicio). De hecho muchas cadenas comerciales en estos países están exigiendo a sus proveedores incluir junto con la información nutricional, la huella de carbono.

Según el *New York Times* (*NY-Times* 2009) los proveedores de Walmart (la cadena de supermercados más grande a nivel mundial) tendrán cinco años como máximo para incluir en sus etiquetas la información del impacto ambiental del producto. Esto tiene mucho sentido si consideramos que en el mercado cada vez existe más competencia en productos y precios, entonces la variable de impacto ambiental podrá ser decisiva para el consumidor final.

Como este ejemplo particular existen otras cadenas y otras organizaciones que empiezan a tomar en cuenta el impacto ambiental y poco a poco más consumidores a nivel mundial también lo hacen. Con ello se abre un panorama enorme para el estudio y la evaluación del impacto en cada caso particular a partir de crear, primero, una metodología que sea válida para todos los casos.

En el caso particular del calentador solar plano para uso doméstico es un buen ejemplo dado que es un mercado que, como ya se mencionó anteriormente, está en franco crecimiento y que además es vendido como un producto ecológico y sustentable. Este estudio podrá servir para fortalecer ésta hipótesis y abonar una justificación más para su comercialización masiva.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Definición de Objetivo y Campo de Estudio

El objetivo de realizar el análisis del ciclo de vida sobre el calentador solar es definir para este producto en específico, la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que se producen. Con estos datos, y ampliando el estudio, se pueden comparar con las emisiones de estos mismos gases que se evitan por utilizar estas tecnologías, que sustituyen a los calentadores de gas ordinarios.

El producto que se desea estudiar es un calentador solar. Es importante recordar que los calentadores solares para uso doméstico tienen dos grandes sistemas, el primero es el absorbedor, este es el sistema que se encarga de la captación de la radiación solar y el intercambio de calor entre la radiación y el agua. El segundo sistema es el termotanque, cuya función primordial es la de almacenar y conservar el agua a cierta temperatura para estar disponible cuando no hay radiación o la que existe no es suficiente para garantizar confort (mañanas y noches).

En este estudio se va a evaluar el calentador solar desde la extracción de las materias primas hasta su procesamiento. Luego, se hará el análisis dentro de la fábrica para determinar el impacto relacionado con la manufactura propia del calentador y hasta la entrega al distribuidor. Posteriormente se hará un análisis durante su vida útil, la cual incluye el uso junto con un sistema de calentamiento auxiliar que se supone ya está instalado.

Para limitar el sistema, la instalación del calentador se hará próxima a la planta de fabricación en el municipio de Cuernavaca en el estado de Morelos. Definiremos la unidad ambiental como: un calentador solar, esto en base a la literatura (*Ardente, 2004*). Este calentador solar tiene una capacidad de 150 litros de agua caliente y es ideal para una familia de cuatro personas con el consumo equivalente a dos baños.

2.2 Aplicación de la metodología del ACV

Como se planteó en los antecedentes el primer paso es el plantearse el objetivo y definir las fronteras del sistema. Este paso ya lo realizamos en el subtema anterior.

En segundo lugar se hará un inventario, seguido de la evaluación del impacto y finalmente la interpretación.

El inventario consistió en una serie de visitas a la fábrica de Modulo Solar SA de CV en Cuernavaca Morelos durante la etapa de producción del calentador solar. En la empresa se hizo, en primer lugar, un reconocimiento del proceso de producción y sus etapas. Posteriormente, se identificaron aquellas etapas que por su consumo energético debían de ser estudiadas; en estas etapas se tomaron los tiempos respectivos de proceso junto con los datos de las placas de los equipos que se empleaban.

Para realizar el inventario de las materias primas todas fueron pesadas en la báscula de la empresa y los datos se cotejaron con los datos históricos que tiene el departamento de calidad. En el caso de la pintura y del gas butano se hizo una estimación por una cierta cantidad de piezas fabricadas. Posteriormente se hizo una selección y una simplificación para ajustar los datos de entrada al programa que se utilizó.

Durante la etapa de evaluación del impacto se utilizó una herramienta computacional. Este programa nos permitió hacer una aproximación muy completa a todos los procesos externos a la empresa y que proveen de las materias primas.

Existen muchos programas para realizar ACV en el mercado que responden a diferentes tipos de usuarios y de requerimientos del análisis.

Para la realización de esta fase del ciclo de vida se utilizó el software Simapro 7.1. Este software cuenta con una base de datos Ecoinvent 2003 que incluye más de 2300 procesos y materiales documentados en diversos institutos suizos. Además, el sistema incluye la opción de analizar el impacto del sistema por diversos métodos como el CML 92, Eco-indicator 95, Eco-indicator 99 y EPS-2000.

El software fue desarrollado por la compañía “Pré Consultants BV” por primera vez en 1990. Cuenta con una versión demostrativa gratuita que se puede utilizar hasta en diez ocasiones. Está clasificado como un programa para usuarios avanzados y puede ser utilizado en organizaciones de todos tamaños. El programa y los resultados se ajustan a las normas ISO 14000 (*Jönbrink, 2000*).

Para su uso, el sistema guarda los datos de entrada y salida como procesos, materiales o proyectos para después modelarlos o compararlos. El sistema tiene la opción de modelar escenarios de

destrucción, de reciclaje, incinerado o de disposición en rellenos sanitarios municipales.

El sistema incluye también la posibilidad de interpretar los resultados con las cuatro representaciones mencionadas anteriormente (normalización, evaluación del impacto, ponderación y puntuación única) en las tres perspectivas del Ecoindicador-99. Los resultados pueden ser interpretados de manera gráfica o textual y fácilmente exportados a otros programas para su publicación. Además, los resultados pueden ser clasificados según el tipo de contaminante, materia prima, energía requerida o impacto, para obtener resultados mucho más extensos.

Para la última fase de interpretación, en primer lugar se extrajeron todos los resultados de las emisiones de gases a la atmósfera. De estos se seleccionaron aquellos que según nuestro objetivo y los antecedentes presentados eran de gran importancia para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero; con esto fue posible iniciar la interpretación y el desarrollo de las conclusiones. Otro aspecto relevante que se tocó fue el de interpretar los resultados de manera global con el Eco-indicador-99 con el objeto de entender mejor el impacto que tiene la fabricación del calentador solar y con el objetivo paralelo de proponer una metodología para abordar el ACV de otros productos.

2.3 Inventario del Ciclo de Vida

Para el inventario del ciclo de vida dividiremos el proceso en tres grandes rubros: producción del absorbedor, habilitado de los componentes de la caja, armado y cierre final del calentador. En cada proceso se muestran las materias primas, las máquinas, herramientas y procesos que se realizan que involucran directa o indirectamente consumo de energía.

Producción del absorbedor

El absorbedor consta de dos cabezales de tubo de cobre rígido de diámetro 3/4 [in] con ocho aletas de cobre. Las aletas de cobre se componen de tubos de cobre rígidos de 3/8 [in] soldados con soldadura ultrasónica a láminas de cobre de 0.12 [mm] de espesor y ancho de 147 [mm]. Estos están pintados de negro para incrementar la absorción del equipo.

El proceso de producción (que se muestra en la ilustración 6) inicia con el corte por un lado de los tubos del cabezal así como el corte de los largueros y de la lámina de cobre que conformarán los

tubos aletados o aletas. Posteriormente el tubo delgado es soldado con la placa de cobre mientras que el tubo del cabezal es perforado, abocardado y se le sueldan los conectores. El siguiente paso es soldar las aletas a los cabezales. Con el absorbedor armado se realiza una prueba hidrostática con agua y aire a presión. Por último el absorbedor armado es pintado de negro en una cámara de pintura.

Materia Prima	Características	Peso [kg]
Absorbedor		
Tubo de cobre rígido 3/8 [in]	Tipo M con espesor de 0.635 [mm] y diámetro exterior de 12.7 [mm]	2.33
Aleta de cobre	Aleación conforme a la norma B-152. Espesor de 0.12 [mm]	1.78
Conector roscable	Cuerda de 3/4 [in] de cobre	incluido en el tubo de 3/4
Soldadura	Cobre fosforado de 1/8 [in].	0.0289
Tubo de cobre rígido 3/4 [in]	Tipo N cobre fosforado C12200	0.85
Pintura Negro Mate	Rebajada con thinner estándar máximo al 75%	0.63

Tabla 2: Materias primas involucradas en la producción del absorbedor y sus características

Máquina	Potencia Nominal [kW]
Cortadora de disco para tubo	2.238
Lijadora para tubo de 3/8	1.189
Máquina de Soldadura Ultrasónica	1.426
Estampadora de aletas	0.560
Abocardadora de cabezal	0.850
Compresor para pintura	3.730

Tabla 3: Equipos utilizados en la producción del absorbedor y sus características de potencia

En esta etapa del proceso se utilizan dos equipos neumáticos, la pistola para pintar y la máquina perforadora. A partir de los manuales de operación de ambas herramientas se obtuvieron los gastos promedio de aire de cada componente en unidades de volumen por unidad de tiempo. Para el caso de la pistola de aire se obtuvo un consumo promedio de 240 [L/min] y para la perforadora neumática de 0.0096[L] por perforación.

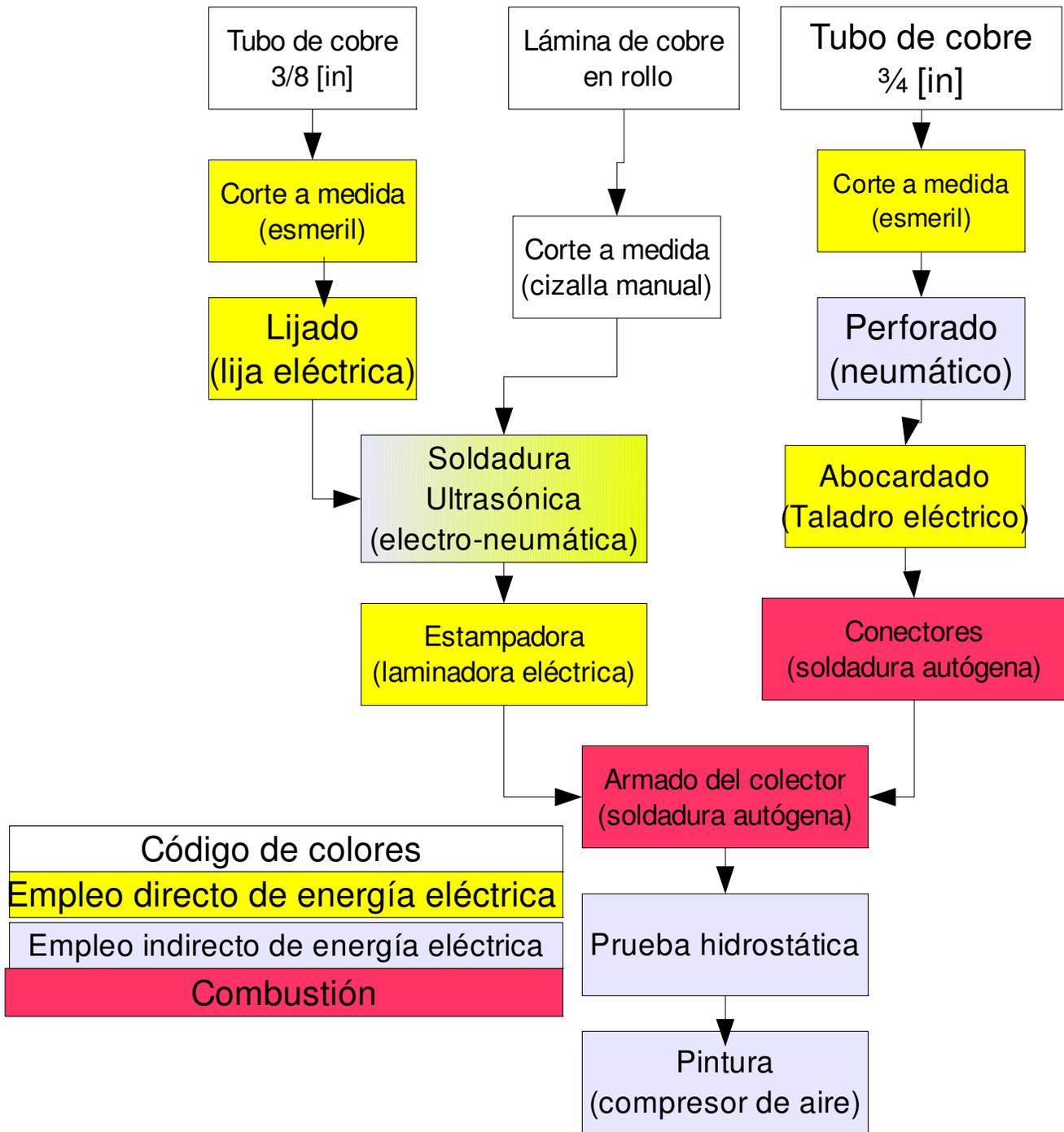


Ilustración 6: Diagrama de flujo de la producción del absorbedor



Ilustración 7: Absorbedor montado previo al proceso de pintado

Habilitado de los componentes de la caja

La caja del absorbedor está hecha de lámina pintro. La materia prima se recibe en rollos que son cortados según la medida (laterales o transversales). Los pedazos laterales son troquelados y doblados en dos puntos formando un perfil. Igualmente los pedazos transversales son doblados en tres puntos creando un perfil con pestañas.

Otras tiras más delgadas de la misma lámina pintro son recortadas y dobladas en tres puntos para formar el marco de cierre final del colector.

Se utiliza aluminio para serigrafía reciclado para realizar la cenefa que recubre los cabezales. La lámina se corta y se dobla en dos puntos para posteriormente ser pintada. Por otro lado la base de polisocianurato (PU) es cortada a la medida y pintada en una de sus caras.

Las materias primas que se utilizan para la caja se muestran a continuación. Así mismo se muestran las características más importantes para cada caso y se indica el peso de los materiales.

Materia Prima	Características	Peso [kg]
Caja		
Lámina pintro	Calibre 26, ancho 44[mm] y largo de 120 [mm]	4
Primer rojo		0.45
Placa de polisocianurato	Sirve como respaldo del colector	2.3
Lámina de aluminio natural	Con 99.37% de aluminio, calibre 30, reciclada	0.1

Tabla 4: Materias primas involucradas en la caja y sus características

Las máquinas y herramientas que se utilizan para realizar el habilitado de los componentes son una dobladora con capacidad de 400 toneladas, una cortadora cierra cinta para la lámina de PU con una potencia de 5.5 [kW], una cortadora para tiras de PU con una potencia de placa de 2.23 [kW], y tres troqueladoras con potencia de 0.55 [kW].

Es importante resaltar que para esta serie de procesos solamente se emplea la pistola para pintura que se mencionó en el subcapítulo anterior. Así mismo para futuros cálculos la pintura de este material esta considerada en la pintura del absorbedor.



Ilustración 8: Dobladora empleada para habilitar la lámina pintro utilizada en la caja del calentador

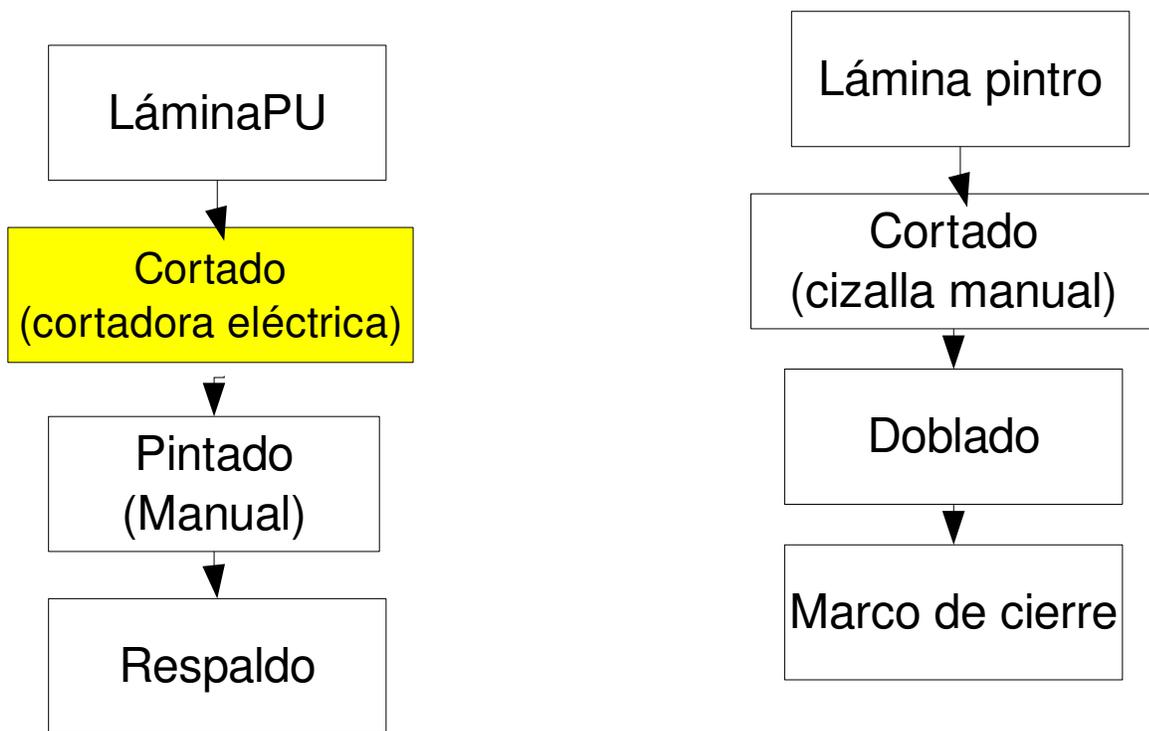
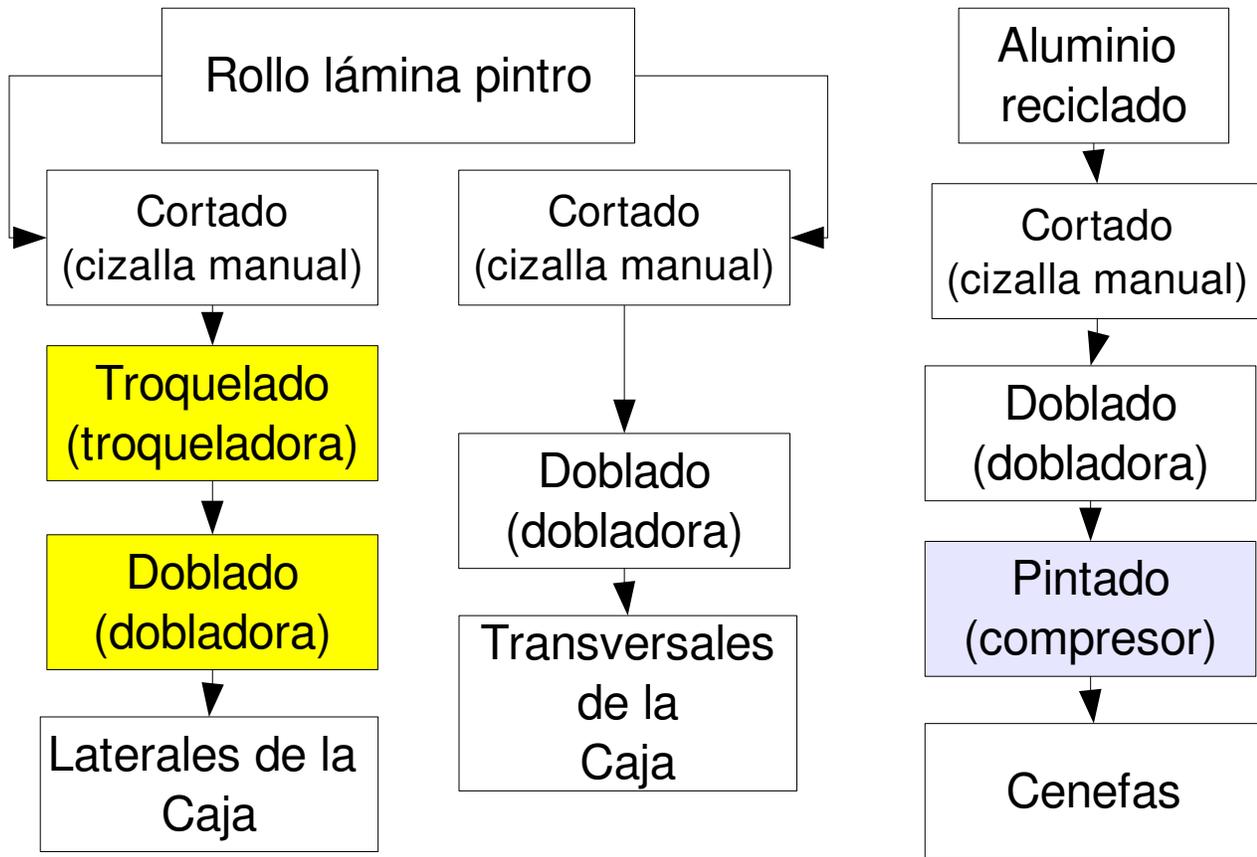


Ilustración 9: Diagrama de flujo del habilitado de los componentes de la caja

Armado final

Los perfiles laterales y transversales de la caja son perforados en sus esquinas y remachados. Antes de colocar el último perfil, se coloca la lámina de PU y se cierra la caja. Posteriormente se coloca el absorbedor, al cual se le pega con silicón las cenefas en cada uno de los cabezales de distribución. Luego se coloca el empaque de plástico a las orillas de la caja y se asienta el vidrio. Para sellar con mayor precisión se utiliza silicón blanco. Por último se coloca el marco de cierre final, el cual se atornilla directamente a la caja.

Las materias primas que se emplean se muestran a continuación. En este caso no se incluyen todos los pesos por ser muy pequeños.

Materia Prima	Características	Peso [kg]
Caja		
Vidrio templado	Largo de 2035[mm], ancho de 917[mm] y espesor de 3.2[mm]	16.3
Pasatubo en "U"	De 1 [in]	4 piezas
Esponja autoadherible	de PVC normal negro.	
Remache pop	de ALMG 3.5 (5154)	8 piezas
Silicón	Neutro y transparente	0.076
Ventoe de plástico	Para permitir la ventilación del colector	2 piezas
tornillo autotaladrante		12 piezas
Pintura vinilica	color gris.	0.62

Tabla 5: Materias primas involucradas en el armado final y sus características



Ilustración 11: Taladro neumático utilizado en los procesos de cierre final



Ilustración 10: Remachadora neumática empleada en los procesos de cierre final

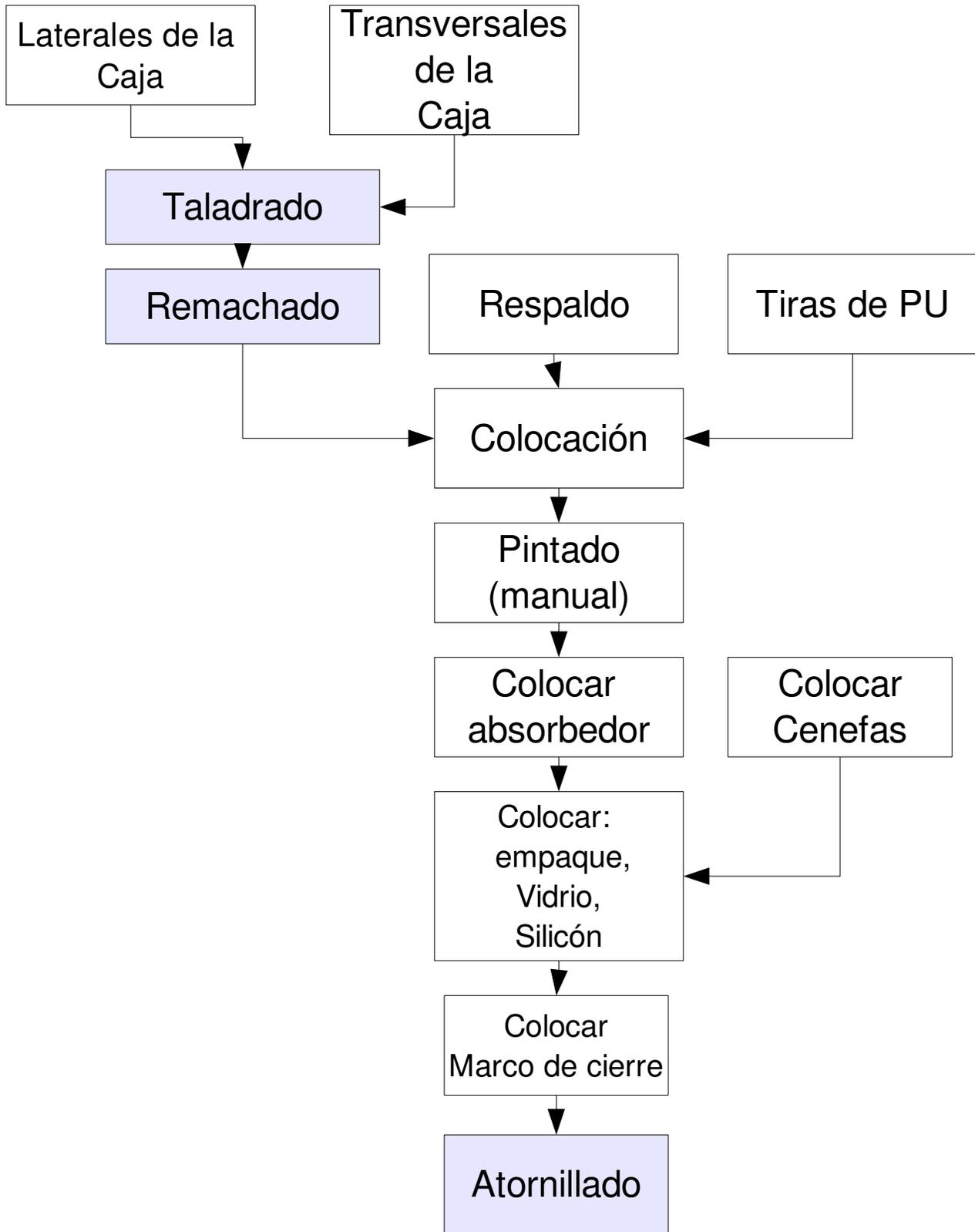


Ilustración 12: Diagrama de flujo del armado final del calentador solar plano

Como se puede observar en este diagrama, para este bloque de procesos solamente encontramos procesos que emplean de manera indirecta la energía eléctrica a través de la compresión de aire. Para ello se utilizan herramientas (taladros y remachadoras) neumáticas acopladas a un compresor que provee únicamente a esta área de la fábrica y con el único fin de armar la caja.

Al igual que se indicó anteriormente, el proveedor de las herramientas (“*Chicago Pneumatics*”) calcula el gasto promedio de aire por unidad de tiempo. Para el caso de los taladros esta tasa es de 117[L/min] mientras que para la remachadora es de 283 [L/min].

En este punto también es importante anotar las materias primas que se emplean tanto en la base del colector como en el termo tanque. Solamente se incluyen los materiales debido a que la manufactura de este componente no se realiza en la fábrica y no es posible contar con ellos.

Termotanque y base		Peso [kg]
Lámina de pintura horneada	calibres del 12 al 24	19.73**
Espuma aislante		1.75 **
acero galvanizado	Calibre 18	9.15 *

* representa valores medidos. **representa valores estimados (véase anexo 1)

Tabla 6: Materias primas involucradas en el termotanque y la base así como sus características

Empleo de energía

La mayor cantidad de energía empleada es energía eléctrica proveniente de la Comisión Federal de Electricidad y suministrada a media tensión y transformada al interior de la compañía a 220 [V].

Se identificaron procesos en los que se emplea energía neumática que proviene de un compresor de aire. Estos se consideraron como usos indirectos de energía eléctrica. Solamente para el caso de las soldaduras se emplea combustión de butano.

Aunque realmente la mayor cantidad de energía es la que proveen los empleados de la fábrica, esta energía no es cuantificable y solamente se menciona para tomar en cuenta en futuras comparaciones.

Los procesos en los que se emplea energía eléctrica se muestran en la siguiente tabla donde además se indican las potencias de los motores y los tiempos de proceso.

La metodología para tomar el tiempo de proceso fue tomar diez mediciones de cada proceso mientras la máquina estuviera funcionando, fuera ocioso o no, y considerando que la corriente es

constante durante todo este tiempo. En la tabla se muestra la media de estos tiempos medidos y dados en horas. Por último se muestra la columna de energía empleada que resulta de la multiplicación del tiempo total por la potencia de cada equipo.

Máquina	Potencia [kW]	Tiempo [min]	Tiempo [h]	Energía [kWh]
Cortadora de disco para tubo	2.238	0.827	0.013778	0.0308
Lijadora para tubo de 3/8	1.189	0.403	0.006718	0.0080
Máquina de Soldadura Ultrasónica	1.426	1.627	0.027120	0.0387
Estampadora de aletas	0.560	1.066	0.017768	0.0099
Abocardadora de cabezal	0.850	1.040	0.017338	0.0147
Troqueladora para laterales	0.746	0.923	0.015379	0.0115
Troqueladora para laterales cortos	0.550	0.923	0.015379	0.0085
Compresor para pintura	3.730	0.000		0.0000
Compresor para herramientas	3.730	0.000		0.0000
Cortadora cierra cinta para PU	5.595	1.487	0.024791	0.1387
Cortadora tiras PU	2.238	1.487	0.024791	0.0555

Tabla 7: Tiempo de uso y potencia de cada equipo

En las herramientas neumáticas se emplea una medición indirecta de la energía eléctrica que se consume. En primer lugar con las características del compresor dadas por el proveedor sabemos que el motor es de 5 [Hp] y que se requieren entre diez y doce minutos para completar su llenado (500 [l]) a partir de un supuesto vacío total. A partir de estos datos se hacen las siguientes operaciones:

$$Energía_{indirecta} = \frac{(Corriente) * (voltaje_{alimentación}) * (tiempo_{operación})}{capacidad_{compresor}} \left[\frac{kWh}{L} \right]$$

$$Energía_{indirecta} = \frac{(16.95[A]) * (220[V]) * (0.20[h])}{1000 * (500[L])} \left[\frac{kWh}{L} \right]$$

$$Energía_{indirecta} = 1.49 \times 10^{-3} \left[\frac{kWh}{L} \right]$$

A partir de este valor, con el volumen (dado en litros) empleado en cada proceso y en cada herramienta se puede calcular una aproximación al consumo de energía eléctrica.

Herramientas Neumáticas	consumo de aire [L]	tasa [kWh/L]	Consumo energético [kWh]
Perforadora para cabezal	0.0768	0.00149	0.00011
Pistola para pintura	201.04		0.2995
Remachadora	1.65		0.0025
Taladro (atornillador)	114.69		0.1709
Taladro (taladrado)	50.67		0.0755
SUMA			0.5485

Tabla 8: Consumo energético equivalente para las herramientas neumáticas

A partir de esto, se obtiene la energía eléctrica total empleada en la construcción del colector solar que equivale a 0.86 [kWh].

Otra forma de energía empleada es la química en forma de combustibles, para transformarla en calorífica la cual se emplea en la soldadura de los tubos aletados al cabezal de distribución en el absorbedor. Para aproximar la cantidad de energía empleada se tomaron los pesos de los tanques de butano en el tiempo cero; posteriormente se construyeron 18 colectores en cada una de las dos estaciones de trabajo, se volvieron a pesar los tanques y se obtuvo un diferencial de pesos que equivale a la cantidad de butano empleado y que dividido entre los 18 colectores fabricados obtenemos la cantidad de gas por colector, que es igual a 0.0883 [kg].

2.4 Suposiciones y selección de datos de entrada del inventario

Para utilizar el programa se realizaron algunas simplificaciones al inventario presentado anteriormente. Esto se hace con el fin de poder ajustarse lo más posible a los datos que contiene el sistema y poder usar las herramientas de comparación de una manera más amplia.

El inventario quedó como sigue:

- En el caso del absorbedor se utilizó un solo tipo de cobre con un 20% de chatarra entregado en la ciudad de Rotterdam a partir del promedio mundial de producción de cobre en 1999. También se utilizó pintura estándar.
- Para el caso de la caja se utilizaron los siguientes materiales:

- Aluminio con 99% de pureza y hasta 15% de chatarra.
- Vidrio templado o recubierto
- Pintura estándar (considerando el primer (*prymer*) y la pintura para la caja)
- Acero inoxidable austenítico con aplicaciones para electrodomésticos (para simular la lámina pintada).
- Espuma rígida tipo poliuretano en sustitución a la lámina PU.
- Electricidad:
 - Se seleccionó la cantidad de combustible y las emisiones involucradas en la producción de un Mega Joule eléctrico promedio en América del Sur. Cabe mencionar que en este caso la variación con respecto a nuestro país no es considerable por ser menor a 0.30 [kgCO₂/MJ_e] (véase anexo 2 para detalles de este cálculo).
- Termotanque y base
 - Para el termotanque se utilizó una aleación de hierro y 13% cromo para un acero inoxidable resistente a temperaturas y a la intemperie.
 - Para el aislante se utilizó espuma rígida de poliuretano.
 - Se utilizó hierro fundido con una composición de 67% chatarra para la base.

Dadas estas consideraciones se procedió a hacer la evaluación del impacto ambiental de cada uno de los tres componentes del calentador solar y también a hacer el inventario de las emisiones atmosféricas las cuales se presentan completas en el Anexo 3.

Capítulo 3. Resultados de la Evaluación del Impacto

Emisiones equivalentes de dióxido de carbono

Para los fines que se propusieron en este estudio, solamente resaltaremos los valores de emisiones de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, monóxido de carbono y óxido nítrico). El resultado de todas las emisiones atmosféricas se encuentra en el Anexo III. Es importante mencionar en este punto que se considera dentro del rubro de energía tanto la energía eléctrica directa como indirecta y la combustión del gas butano en la soldadura.

Sustancia	Unidad	termotanque y base	energía	Caja	Absorbedor	Suma
Dióxido de Carbono	kg	187.41	1.34	59.47	38.26	286.48
Metano		0.065	13.83	90.66	2	106.56
Monóxido de Carbono		0.58	2.03	124.88	16.45	143.94
Óxido nítrico		0.32	0.44	26.23	-	27

Tabla 9: Resultados de las emisiones de los gases de efecto invernadero seleccionados.

Para poder presentar estos resultados de una manera homogénea se emplea el concepto de Potencial de Calentamiento Global que es la contribución al calentamiento global de un determinado gas comparado con el efecto del dióxido de carbono. El resultado de esta comparación se evalúa en unidades de masa de dióxido de carbono equivalente [gCO_{2eq}].

Los potenciales de calentamiento global fueron presentados por la IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, por sus siglas en inglés) en 2007 y engloba más de 63 gases distintos y su potencial en tres escenarios distintos: 20, 100 y 500 años.

En la siguiente tabla presentamos los potenciales de calentamiento global para los gases de efecto invernadero seleccionados¹:

¹ Es importante resaltar que la IPCC considera que se debe incluir el monóxido de carbono (CO) en el escenario de 100 años para representar la fracción de este gas (CO) que se convertirá en dióxido de carbono y los efectos que este gas, a su vez, tendrá en el incremento del efecto invernadero.

Gas / Escenario	Potencial de Calentamiento Global (escenarios)		
	20 años	100 años	500 años
Dióxido de Carbono	1	1	1
Metano	72	25	7.6
Monóxido de Carbono	-	1.9	-
óxido nitroso	289	298	153

Tabla 10: Factores adimensionales para calcular el potencial de calentamiento global en tres escenarios (20,100 y 500 años)

Con estos datos se puede calcular (con una simple multiplicación), para los tres escenarios, el equivalente de dióxido de carbono emitido en la construcción de un calentador solar para uso doméstico. Para fines comparativos y de reporte se considerará en este trabajo, el escenario a 100 años con el fin ser consistentes con otros reportes.

Dióxido de Carbono Equivalente	Unidad	termotanque y base	Caja	Absorbedor	energía	Total
100 años	kgCO ₂ eq	286.9	69.79	38.35	1.82	395.04
20 años		285.94	73.58	38.41	2.46	397.92
500 años		237.58	64.17	38.28	1.51	340.03

Tabla 11: Emisiones equivalentes de dióxido de carbono por componente [kg CO₂eq]

Esta tabla resume los resultados de las emisiones de dióxido de carbono equivalente en los tres escenarios de tiempo. Es muy importante resaltar que en el escenario de 100 años tenemos un punto intermedio entre el escenario de 20 años, donde se espera que todos los gases estén presentes en la atmósfera y hayan alcanzado su máximo potencial, y el escenario de 500 años donde muchos de estos gases han sido absorbidos por sus respectivos ciclos naturales. A pesar de ser un punto intermedio tampoco podemos dejar de resaltar que esta claramente más cercano al escenario de 20 años que al de 500 años.

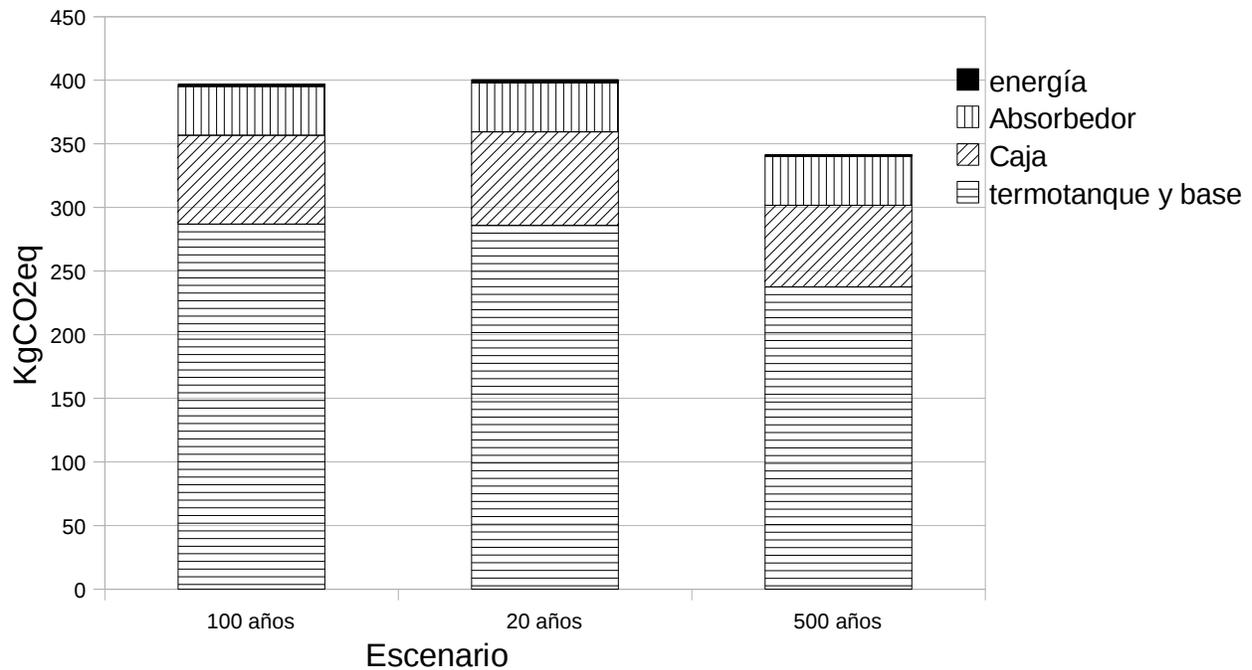


Ilustración 13: Gráfica de barras de las emisiones de dióxido de carbono equivalente para los tres escenarios

Tampoco debemos dejar de resaltar que por sistema, el conjunto de termotanque y base representan el mayor impacto ambiental con aproximadamente el 72% de las emisiones equivalentes, seguido de la caja con casi el 17% y del absorbedor con casi el 10% y el resto producto del consumo energético.

Estos resultados corresponden también a la masa medida y estimada de cada una de las materias primas empleadas en la manufactura de los tres sistemas. Así, el termotanque que presentó la masa estimada de materias primas más grande también presenta la mayor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero.

Eco-Indicador 99: Evaluación de impactos en Salud, Recursos y Calidad del Ecosistema.

En el presente trabajo se utilizará el Eco-Indicador 99 para evaluar los resultados obtenidos en la sección anterior. Este indicador tiene tres perspectivas para hacer el ACV: Igualitaria, Jerárquica e Individualista. A continuación presentaremos los resultados de la representación normalizada arrojados por el software (Simapro) para las tres perspectivas, se presentarán los resultados gráficos y por último en el siguiente subcapítulo haremos el análisis para una perspectiva.

Es importante hacer notar que se escogió la representación normalizada por ser la único en el que no se requiere hacer suposiciones que pueden juzgarse como subjetivas y que las únicas operaciones que se realizan para su obtención son restas y divisiones.

Individualista

Categoría de impacto	termotanque y base	energía	Caja	Absorbedor
Carcinógenos	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000
Resp. Orgánicos	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Resp. Inorgánicos	0.0262	0.0000	0.0037	0.0158
Cambio climático	0.0046	0.0000	0.0015	0.0009
Radiación	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Capa de ozono	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ecotoxicidad	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000
Acidificación/ Eutrificación	0.0018	0.0000	0.0004	0.0009
Uso de suelo	0.0027	0.0000	0.0002	0.0011
Minerales	0.7937	0.0000	0.0791	1.2422

Tabla 12: Normalización. Perspectiva Individualista.

En esta tabla lo que podemos observar es que el mayor impacto lo provoca la columna del absorbedor, en el renglón de los minerales. A pesar que los valores para la mayoría de las celdas son cero, cabe mencionar que son valores muy pequeños que no alcanzan la magnitud de cuatro cifras significativas. Este hecho se repite en las demás perspectivas.

Igualitaria

Categoría de impacto	termotanque y base	energía	Caja	Absorbedor
Carcinogenos	0.0001	0.0000	0.0005	0.0000
Resp. Orgánicos	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Resp. Inorgánicos	0.0222	0.0000	0.0036	0.0125
Cambio Climático	0.0026	0.0000	0.0008	0.0005
Radiación	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Capa de Ozono	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ecotoxicidad	0.0002	0.0000	0.0003	0.0001
Acidificación/ Eutricación	0.0016	0.0000	0.0003	0.0008
Uso de Suelo	0.0024	0.0000	0.0002	0.0009
Minerales	0.0200	0.0000	0.0020	0.0312

Tabla 13: Normalización. Perspectiva Igualitaria.

Una vez más lo que observamos es que el impacto más importante es en el renglón de combustibles fósiles para las tres columnas (termo tanque y base, Caja y Absorbedor). Hablando de columnas el termotanque y la base junto con el absorbedor representan el mayor impacto debido a la cantidad de materias primas que se requieren para su producción, mismas que pueden ser distinguidas en la fase de inventario como las de mayor peso.

Jerárquica

Categoría de impacto	termotanque y base	Absorbedor	Caja	energia
Carcinogenos	0.0001	0.0000	0.0005	0.0000
Resp. Orgánicos	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Resp. Inorgánicos	0.0223	0.0126	0.0036	0.0000
cambio climático	0.0026	0.0005	0.0008	0.0000
Radiación	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Capa de Ozono	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ecotoxicidad	0.0002	0.0001	0.0003	0.0000
Acidificación/ Eutricación	0.0016	0.0008	0.0003	0.0000
Uso de Suelo	0.0024	0.0009	0.0002	0.0000
Minerales	0.0141	0.0221	0.0014	0.0000
Combustibles fósiles	0.0233	0.0070	0.0091	0.0011

Tabla 14: Normalización. Perspectiva Jerárquica.

Por último en esta perspectiva se sigue presentando el fenómeno en los combustibles fósiles. Una

posible explicación a estos resultados puede ser la cantidad de energía requerida para explotar los minerales presentes en el subsuelo, por su complejidad e incluso por algunos fenómenos sociales que han marcado la mineralogía de la última década.

Capítulo 4. Interpretación.

4.1 Tiempo de recuperación de las emisiones

El tiempo de recuperación es un indicador que nos permite evaluar el desempeño de una fuente de energía renovable definido en 2004 por el investigador italiano Fluvio Ardente. El resultado de este indicador está dado en unidades de tiempo y puede ser aplicado a varios resultados del ACV como son la energía empleada y las emisiones evitadas. Es importante resaltar que estos indicadores se asemejan al tiempo de recuperación de una inversión monetaria normalmente planteado en estudios de ingeniería económica.

A continuación se presentará el indicador de: tiempo de recuperación de las emisiones. Este indicador nos permite calcular el tiempo en el que la cantidad de contaminantes emitidos a lo largo del ciclo de vida del calentador, son iguales a la cantidad de contaminantes emitidos por el uso de algún otro sistema de calentamiento para agua. En este caso un calentador de agua a base de gas licuado de petróleo.

Conociendo la tasa de emisión del sistema que queremos comparar (calentador de gas) podemos indicar cuántas emisiones de contaminantes son necesarias para igualar la energía útil captada por el dispositivo de calentamiento solar. Con esto conocemos la cantidad de emisiones ahorradas anualmente.

Este índice puede ser calculado para cada uno de los contaminantes o para el equivalente en dióxido de carbono.

Resulta, entonces:

$$EM_{PT-i} = \frac{EM_i}{(EM_{S-i} - EM_{ut-i})}$$

Donde:

EM_{PT-i} : tiempo de recuperación de las emisiones del contaminante i , dado en años.

EM_i : emisiones del contaminante i relativas al ciclo de vida del calentador solar.

EM_{S-i} : Emisiones ahorradas anualmente del contaminante i . Este valor fue calculado previamente y esta dado en kg/año.

EM_{ut-i} : emisiones del contaminante i producidas por el uso del calentador solar durante un año. Esta dada en kg/año. Este valor es cero si no se instala un sistema auxiliar al calentador solar.

Para iniciar con el cálculo de este cociente es necesario conocer la tasa de emisión de un calentador de gas doméstico. Debemos de hacer el cálculo de la energía necesaria para satisfacer las necesidades de agua caliente de una familia promedio de cuatro miembros, considerando únicamente el servicio de regadera.

El consumo de agua caliente en promedio por persona y por día es de 40 [L/persona día], lo que equivale a 160 [L] por casa de cuatro personas al día, y a unos 58,400 [L/año] por casa. Sabiendo que la capacidad calorífica del agua es de 4.18 [kJ/kg°C] y según la Norma Oficial Mexicana (*NOM-003-ENER-2000*) el incremento de temperatura en un calentador de agua para uso doméstico debe ser de cuando menos 25°C a partir de la temperatura a la que se alimente el agua, podemos realizar el cálculo termodinámico de la cantidad de calor requerido durante un año por una familia como se muestra a continuación:

$$\text{Energía requerida} = \text{masa} * Cc_{\text{agua}} * \Delta T$$

$$\text{Energía requerida} = (58,400 [\text{kg/año}]) * (4.18 [\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}]) * 25^\circ\text{C}$$

$$\text{Energía requerida} = 6102.8 [\text{MJ/año}]$$

Por otro lado, también sabemos que el poder calorífico del gas licuado de petróleo (GLP) es de 46.1 [MJ/kg] (*Horst Bauer, 1996*), así que dividiendo la energía requerida entre el poder calorífico dado obtenemos la masa de GLP requerida para satisfacer las necesidades de agua caliente:

$$Masa_{GLP} = \frac{6102.8 [\text{MJ/año}]}{46.1 [\text{MJ/kg}]}$$

$$Masa_{GLP} = 132.38 [\text{kg/año}]$$

Aquí es importante resaltar que se eligió el GLP no por ser el único, sabemos que actualmente en muchas ciudades se cuenta con la posibilidad de contratar el servicio de Gas Natural, pero según los

datos de la Secretaría de Energía, cinco de cada siete usuarios de gas optan por el Gas Licuado de Petróleo (*SENER, 2009*)

Considerando que en promedio los calentadores de gas tienen una eficiencia de 80% (*SENER, 2009*) ajustaremos el dato de la masa requerida quedando con un valor de 165.64 [kg_{GLP}/año].

Para transformar la masa en volumen haremos la conversión a partir de la densidad del GLP que se reporta de 0.51 [kg/L] en estado líquido (*Features of propane gas, 2010*). Haciendo el cociente correspondiente, sabemos que el volumen en litros del GLP es de: 324.78 [L_{GLP}/año].

Debemos hacer un paréntesis en este cálculo para deducir las emisiones de CO₂ por cada litro de combustible quemado. Para ello la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) publicó los factores de emisión del gas propano. La tabla ajustada al Sistema Internacional se muestra a continuación:

Emisiones CO2	lb/1000gal	kg/L	Equivalencias 100 años	KgCO ₂ eq/L
N ₂ O	0.9	0.000107715	298	0.0321
CO ₂	12500	1.496042216	1	1.4960
CO	7.5	0.000897625	1.9	0.0017
CH ₄	0.2	0.000023937	25	0.0006
Total				1.53

Tabla 15: Factores de emisión de dióxido de carbono equivalente para el propano por unidad de volumen en un escenario de 100 años.

Como se aprecia en la tabla anterior, también se incluyeron las equivalencias de cada gas en dióxido de carbono a 100 años según la IPCC, para mantener una congruencia con cálculos anteriores. En total, como se resalta en la tabla, se calcula que se emiten 1.53 [kgCO₂eq] por cada litro de gas quemado.

Ahora continuamos con el cálculo principal. Sabiendo el factor de emisión podemos saber que durante un año, al multiplicarlo por el consumo de GLP, una familia emite en promedio 497.05 [kgCO₂eq] para satisfacer sus necesidades de agua caliente para el servicio de regadera durante un año.

Retomando el factor mencionado al inicio de este subtema sabemos que debemos hacer el cociente entre las emisiones producidas durante el ciclo de vida (395.04 [kgCO₂eq]), y las emisiones producto del uso del calentador solar.

Suponiendo que el calentador solar sustituye totalmente al calentador común de GLP se tiene el

siguiente cociente:

$$EM_{PT-CO2} = \frac{395.04 [kgCO_{2eq}]}{497 [kgCO_{2eq}/año]}$$

$$EM_{PT-CO2} = 0.795 [años] = 290.42 [días]$$

Es decir, en aproximadamente 290 días de uso del calentador solar se está evitando emitir la misma cantidad de contaminantes que las que fueron necesarias emitir para su construcción. Esto, recordemos, si suponemos que el calentador solar se usa sin un sistema de respaldo de GLP para días nublados o con fríos intensos por la noche.

Para aproximar mejor esta suposición haremos una modificación al cociente considerando el uso de un sistema auxiliar de GLP y no solamente el calentador solar. Para ello multiplicaremos el dividendo por un porcentaje de participación que irá desde 5% hasta el 100%. Este porcentaje equivale a la participación del calentador solar en este sistema híbrido.

Así entonces, consideraremos que el calentador solar sustituye al calentador convencional desde un 5% (No tiene sentido aplicar un 0% porque sería el equivalente a no instalar un calentador solar) hasta el mejor escenario en el que el calentador de GLP no tiene que ser encendido durante todo el año (100%).

Los resultados se presentan en la siguiente tabla y en la siguiente gráfica:

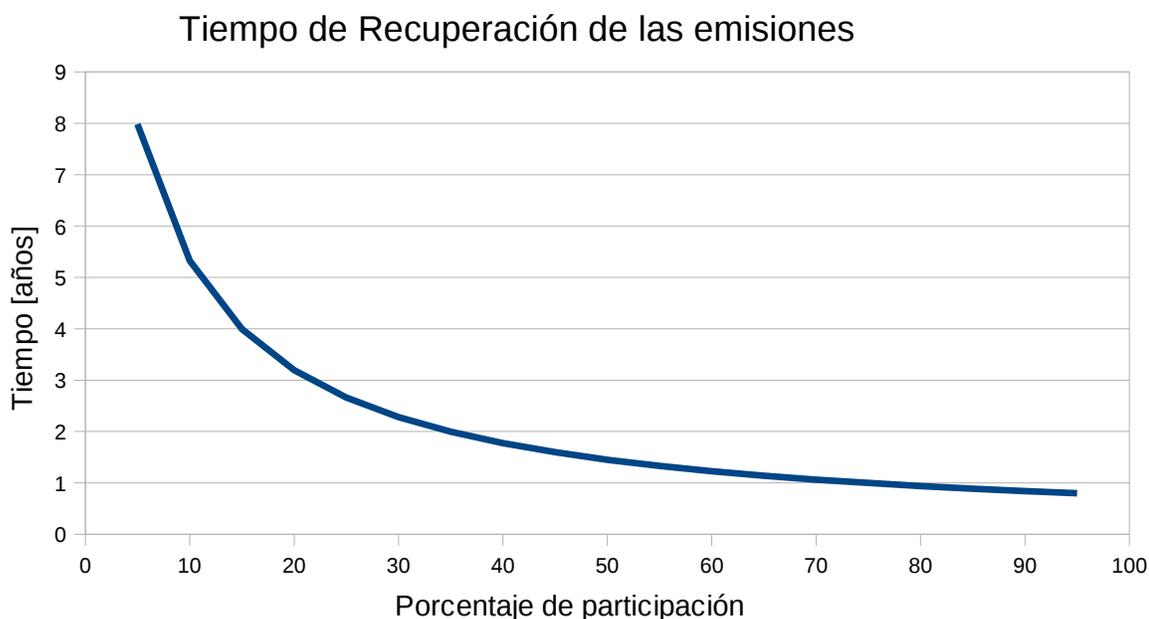


Ilustración 14: Gráfica del tiempo de recuperación de las emisiones para los distintos escenarios

Caso	Porcentaje participación calentador solar	de Tiempo de recuperación [años]
1	5%	15.97
2	10%	7.98
3	15%	5.32
4	20%	3.99
5	25%	3.19
6	30%	2.66
7	35%	2.28
8	40%	2.00
9	45%	1.77
10	50%	1.60
11	55%	1.45
12	60%	1.33
13	65%	1.23
14	70%	1.14
15	75%	1.06
16	80%	1.00
17	85%	0.94
18	90%	0.89
19	95%	0.84
20	100%	0.795

Tabla 16: Tiempo de recuperación de las emisiones en distintos escenarios

Con estos datos podemos hacer un interesante análisis sobre la sustentabilidad del calentador solar. En primer lugar es importante decir que los casos simulados anteriormente solamente consideraron las emisiones del calentador de GLP por su uso y sin considerar su ciclo de vida entero, así como el ciclo de vida en la producción del propio combustible. Aún así, en el peor de los casos, cuando el calentador solar solamente participa en el 5% del calentamiento del agua, en alrededor de 16 años se igualan la cantidad de emisiones por la fabricación, con las emisiones evitadas. Este periodo de tiempo es menor al tiempo de vida proporcionado por el proveedor de calentadores solares que va desde 10 años (con garantía) hasta 20 años y que según la experiencia con calentadores instalados se han alcanzado más de 30 años de servicio.

Ahora, en los casos en los que el calentador solar aporta desde el 50% hasta el 100% de la energía necesaria (que son escenarios totalmente posibles) tenemos periodos de recuperación de entre 1.6 y 0.798 años. Este intervalo es una prueba absolutamente contundente sobre la sustentabilidad del calentador solar.

Si consideramos un punto medio conservador en el que la aportación energética del calentador solar es del 70% del total de la energía requerida, en un periodo de 1.14 años se recupera la emisión inicial de contaminantes. Utilizando el factor de emisiones ahorradas que resulta de multiplicar las emisiones del calentador de GLP por el porcentaje de participación del calentador solar (70% en este caso), obtenemos que el ahorro en emisiones por año, para este escenario es de 347.94 [kgCO_{2eq}].

A partir del año 1.15 todas las emisiones se pueden considerar como ahorradas, entonces, si multiplicamos el ahorro anual por el número de años restantes de vida útil posteriores al periodo de recuperación (18.86 [años]) obtenemos un ahorro neto de emisiones de 6561.87 [kgCO_{2eq}] para una familia mexicana promedio.

Ampliaremos este último ejemplo en la siguiente tabla y en la siguiente gráfica para cada caso:

Caso	Porcentaje de Ahorro	Emisiones ahorradas por el uso del CS	Tiempo de recuperación [años]	Tiempo restante de (vida útil - periodo de recuperación)	Emisiones de realmente evitadas [kgCO _{2eq}]
1	5%	24.85	15.97	4.03	100.20
2	10%	49.71	7.98	12.02	597.25
3	15%	74.56	5.32	14.68	1,094.30
4	20%	99.41	3.99	16.01	1,591.36
5	25%	124.26	3.19	16.81	2,088.41
6	30%	149.12	2.66	17.34	2,585.46
7	35%	173.97	2.28	17.72	3,082.51
8	40%	198.82	2.00	18.00	3,579.56
9	45%	223.67	1.77	18.23	4,076.61
10	50%	248.53	1.60	18.40	4,573.66
11	55%	273.38	1.45	18.55	5,070.71
12	60%	298.23	1.33	18.67	5,567.77
13	65%	323.08	1.23	18.77	6,064.82
14	70%	347.94	1.14	18.86	6,561.87
15	75%	372.79	1.06	18.94	7,058.92
16	80%	397.64	1.00	19.00	7,555.97
17	85%	422.49	0.94	19.06	8,053.02
18	90%	447.35	0.89	19.11	8,550.07
19	95%	472.20	0.84	19.16	9,047.12
20	100%	497.05	0.795	19.21	9,545.87

Tabla 17: Emisiones evitadas a lo largo de la vida útil del calentador.

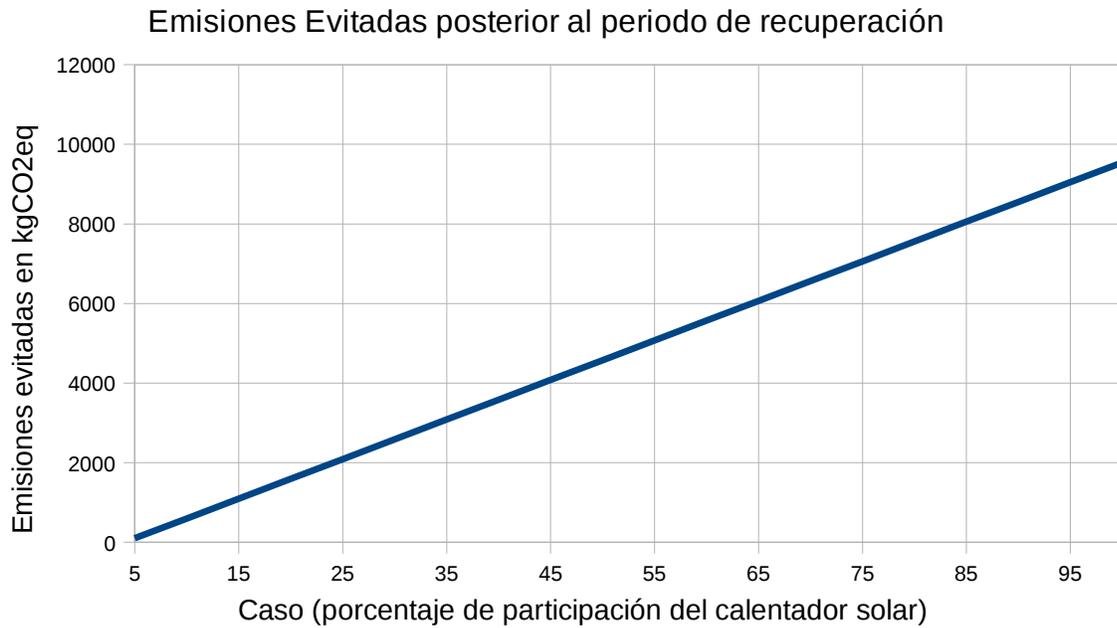


Ilustración 15: Gráfica de las emisiones evitadas posteriores al periodo de recuperación

Como se observa nuevamente, incluso en el peor escenario se obtiene un ahorro positivo de dióxido de carbono equivalente. Mientras que en el mejor de los casos se ahorran más de nueve toneladas y media de dióxido de carbono equivalente.

4.2 Análisis por perspectiva y categorías

Empezaremos por decir que para hacer el análisis, se han reducido las categorías de impacto a las tres categorías más importantes: Salud Humana, Calidad del Ecosistema y Recursos. Con ello distribuimos los impactos como se muestra en la figura 16.

Esta agrupación es la misma que utiliza el programa computacional para hacer el análisis y arrojar los resultados y se basa en sumar los resultados que tengan las mismas unidades.

Para hacer este análisis comparativo se ha escogido la normalización como representación de referencia debido a que, como ya se mencionó, para obtener los datos normalizados solamente se hacen operaciones algebraicas y que no asumen factores de ponderación ni tampoco se utiliza algún criterio en específico.

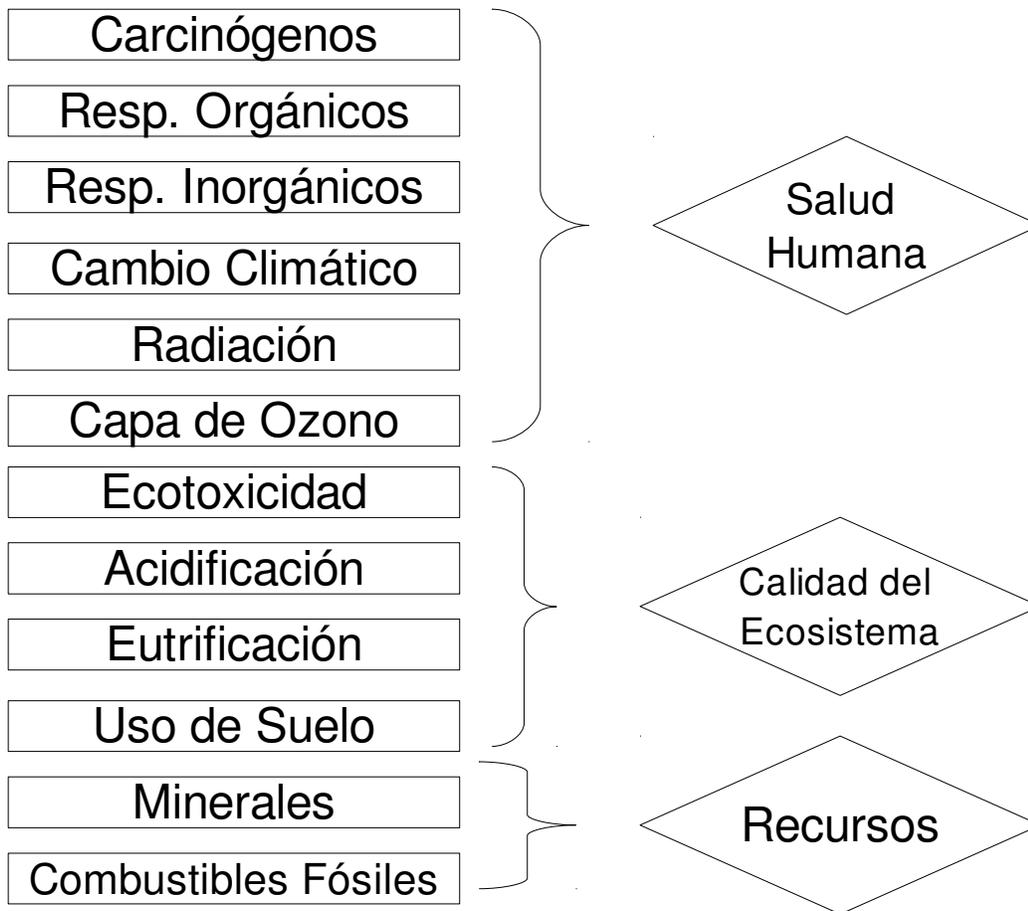


Ilustración Ilustración16: Esquema de la agrupación de los distintos impactos en las tres categorías principales.

Análisis por Categorías de Impacto

Iniciaremos con la categoría de Salud Humana. En esta categoría las tres perspectivas mantienen un nivel bastante similar entre ellas. En las perspectivas Igualitaria y Jerárquica tenemos un resultado de 0.043 (recordemos que son valores adimensionales por estar normalizados) para ambas, mientras que para la perspectiva Individualista se alcanza un valor de 0.053. Los resultados de manera gráfica se muestran a continuación:

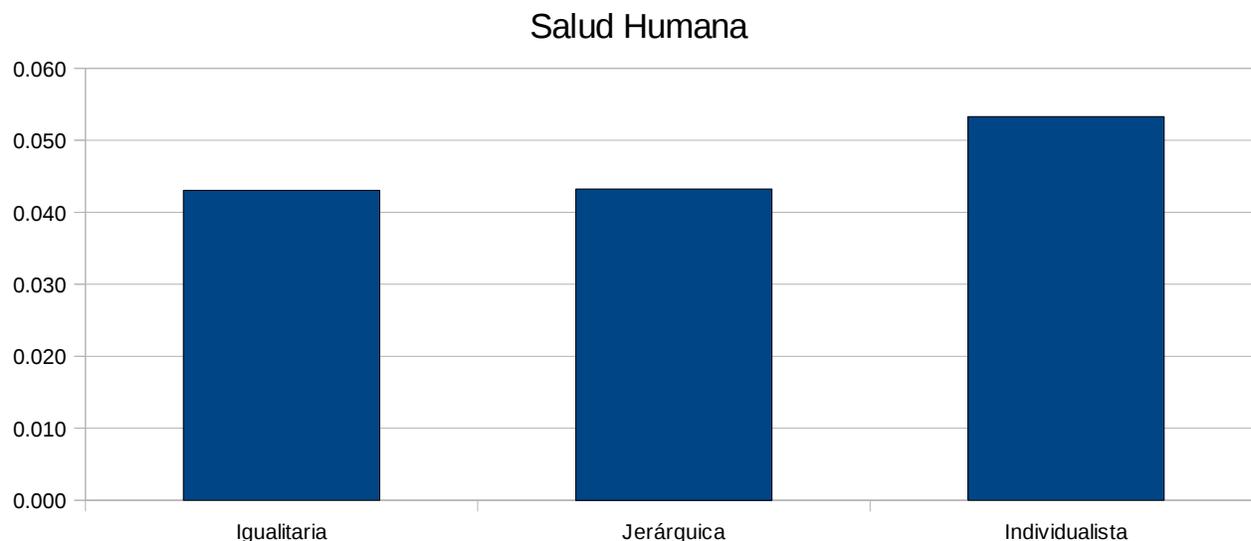


Ilustración17: Gráfica de los resultados normalizados por perspectiva en la categoría de Salud Humana

La siguiente categoría de impacto que vamos a analizar es la de Calidad del Ecosistema. En esta categoría observamos el mismo fenómeno que en la anterior donde las perspectivas Jerárquica e Igualitaria empatan (hasta el tercer dígito decimal) con un valor de 0.006 mientras que en la perspectiva individualista supera a estas últimas con un resultado de 0.007. Igualmente presentamos la gráfica de estos valores:

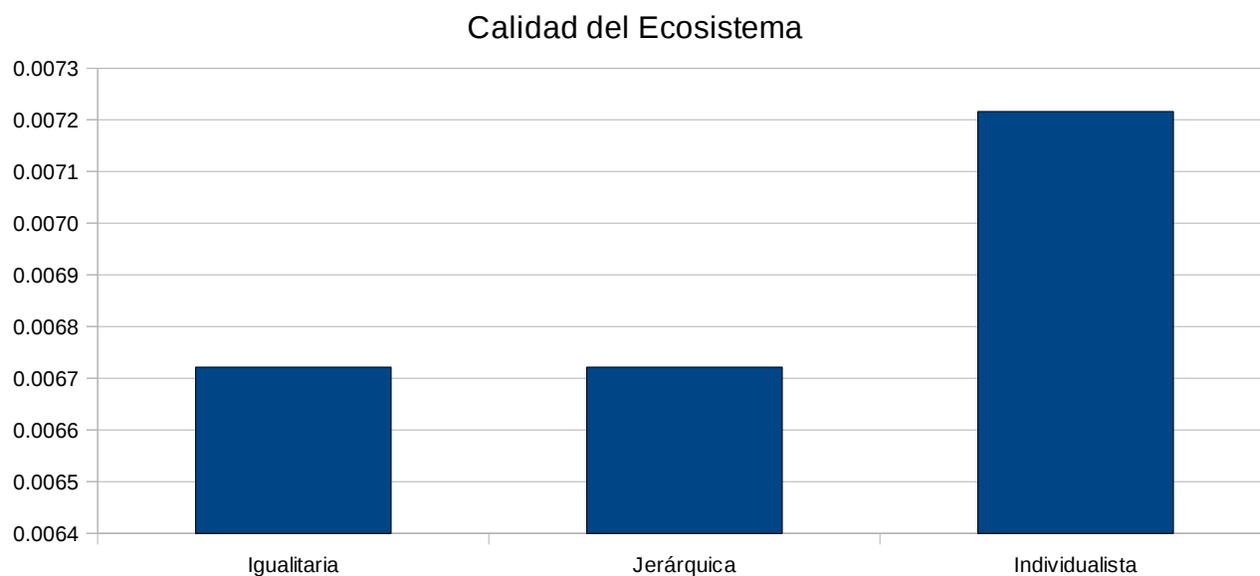


Ilustración 18: Gráfica de los resultados normalizados por perspectiva en la categoría de Calidad del Ecosistema

En la siguiente categoría, la de recursos, observaremos un fenómeno totalmente distinto al observar un valor que se dispara totalmente en la perspectiva Individualista con respecto a sus pares. Los resultados para esta categoría son: Igualitaria: 0.1 , Jerárquica: 0.08, Individualista: 2.12.

Presentamos la gráfica correspondiente:

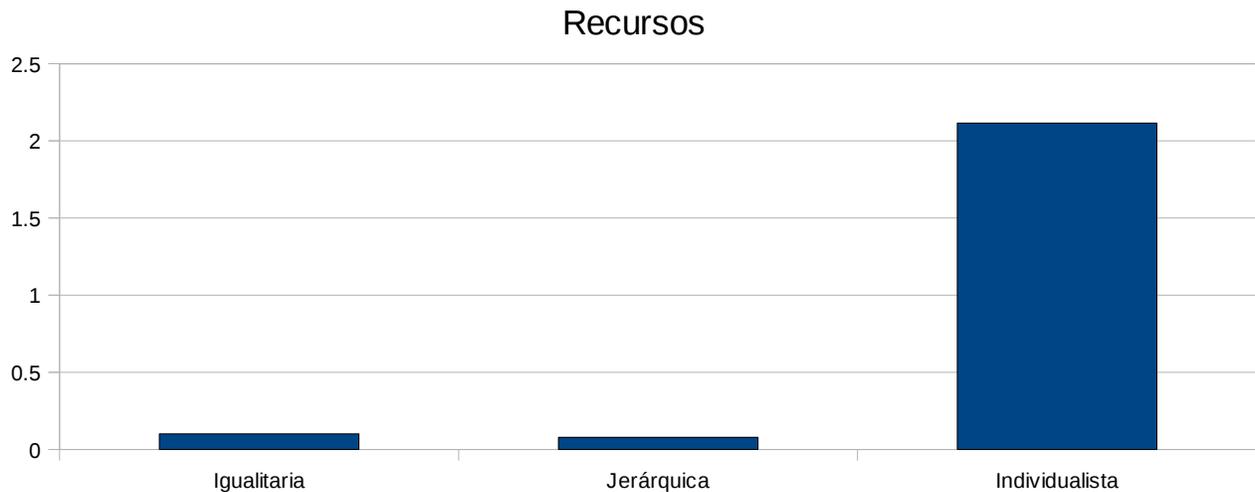


Ilustración 19: Gráfica de los resultados normalizados por perspectiva en la categoría de Recursos

Esta diferencia tan considerable se debe a la orientación que tiene la perspectiva hacia la dificultad (en el corto plazo) de extraer las materias primas. Este es un efecto cuyo cálculo implica menos variables y es menos complejo que el cálculo del daño al ecosistema por ejemplo. Por ello, esta perspectiva pondera el daño a los recursos con un valor más alto, por ser un efecto más comprobable y tangible.

Análisis por perspectivas

Otra manera de realizar una comparación entre las perspectivas es hacerlo sobre las categorías de impacto. Para este caso seguiremos usando la representación normalizada por las razones expuestas ya anteriormente.

Empezaremos con la perspectiva Jerárquica. En esta perspectiva observamos que la categoría que recibe el mayor impacto es la categoría de recursos con un valor de 0.08, seguido de la salud humana con 0.043 y por último la calidad del ecosistema con un valor de 0.0067.

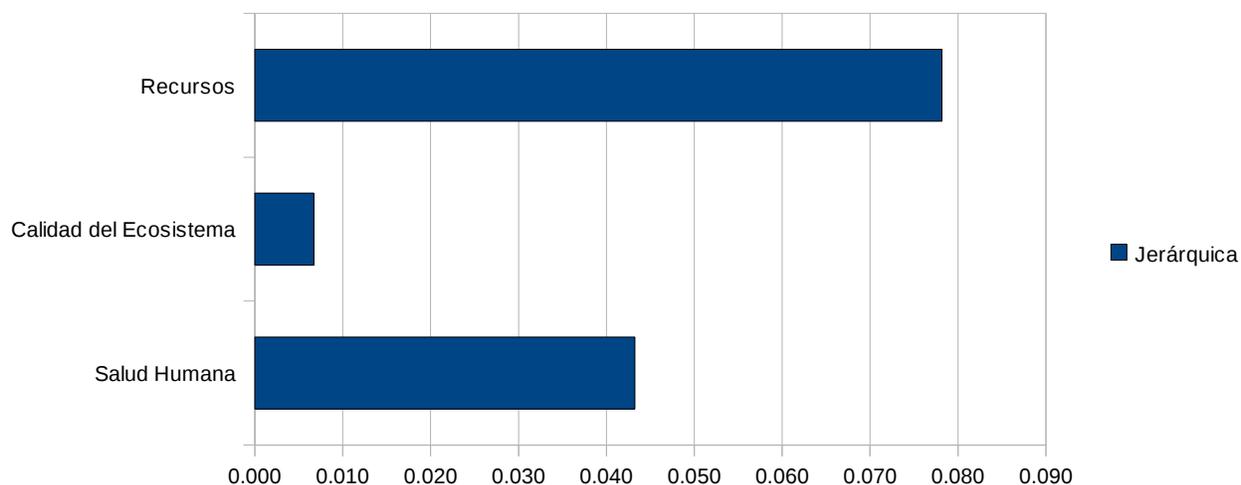


Ilustración 20: Gráfica de los resultados normalizados por categoría de impacto en la perspectiva Jerárquica

Para la perspectiva Individualista se mantiene el mismo orden que el anterior. Aquí volvemos a resaltar la orientación de la perspectiva por lo que la categoría de recursos tiene un impacto mucho mayor que el resto con un valor de 2.12.

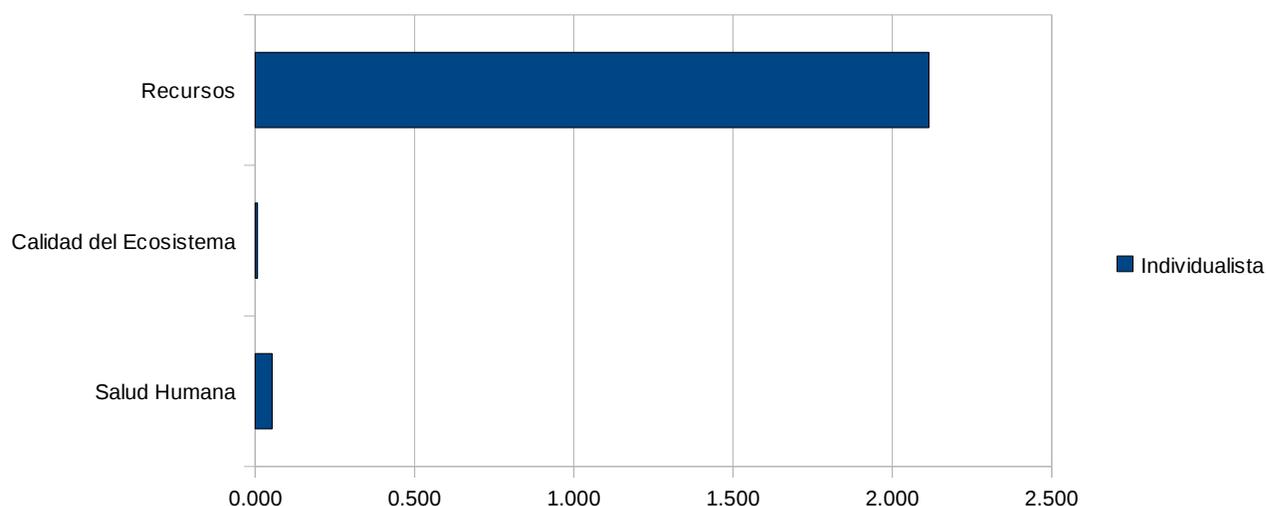


Ilustración 21: Gráfica de los resultados normalizados por categoría de impacto en la perspectiva Individualista

Por último haremos el análisis de la perspectiva Igualitaria. Cabe mencionar que el análisis detallado de esta perspectiva será hecho más adelante con toda profundidad e incluyendo todos las representaciones que también han sido explicados con anterioridad.

En esta perspectiva existe un poco más de similitud entre los datos aunque la categoría de

recursos sigue siendo la más grande. Los resultados de esta perspectiva se presentan en la siguiente tabla:

Daño de categoría	Igualitaria
Salud Humana	0.043
Calidad del Ecosistema	0.0067
Recursos	0.1

Tabla 18: Resultados normalizados por categoría de impacto de la perspectiva Igualitaria

Como se mencionó y como se ha venido observando los Recursos son la categoría con mayor impacto, seguidos de Salud Humana y por último la calidad del ecosistema. En este caso observamos resultados más consistentes unos con otros y con una variación menor. Aunque más adelante se hará la justificación correspondiente, es importante resaltar que la calidad de los resultados es una de las justificaciones para escoger esta perspectiva con el objetivo de realizar un análisis completo de las perspectivas. Para concluir con la comparación es importante agregar la gráfica de esta perspectiva:

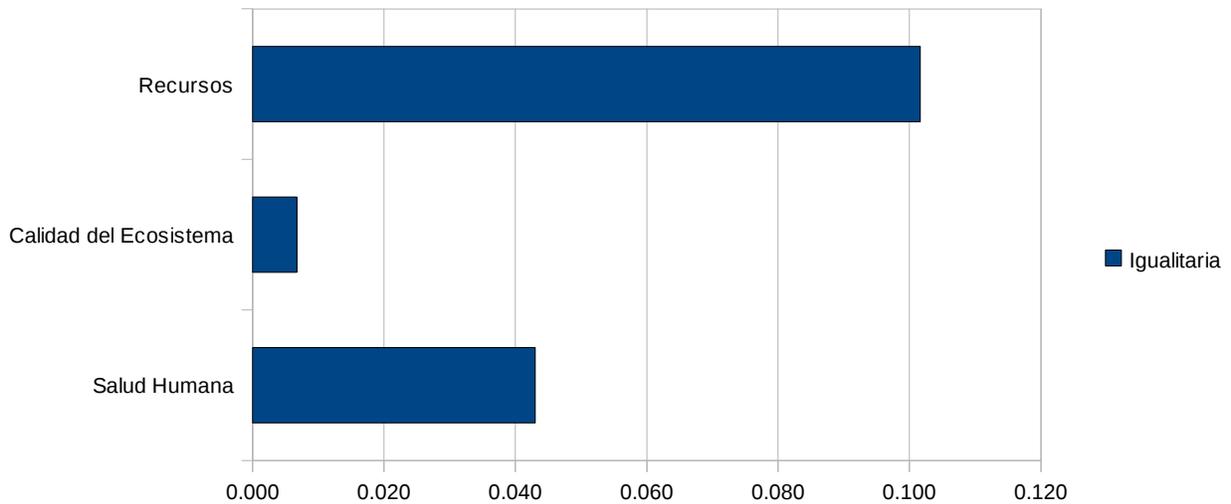


Ilustración 22: Gráfica de los resultados normalizados por categoría de impacto en la perspectiva Igualitaria

4.3 Eco-Indicador 99: Análisis de resultados

Como se mencionó en la fase de inventario, es necesario hacer el análisis para una de las perspectivas. Con esto se sugiere una metodología para interpretar estos resultados, misma que puede ser aplicada sin ningún problema a las dos perspectivas restantes.

Se ha escogido la perspectiva Igualitaria por ser la que toma en cuenta todos los aspectos posibles, está hecha en un periodo de muy largo plazo y considera que de no tomarse las medidas pertinentes los problemas pueden terminar en catástrofe. Como es sabido, en materia ambiental es recomendable escoger los peores escenarios para garantizar, ante cualquier circunstancia, la preservación del medio ambiente.

Podemos empezar a revisar y analizar las representaciones de: Normalización, Ponderación, Evaluación del Daño y Puntuación Única. Iniciaremos el análisis de la representación normalizada. Es importante recordar que estas representaciones son únicamente maneras más sencillas y gráficas de presentar los resultados para su interpretación.

En la siguiente imagen se presentan los resultados normalizados. Para cada categoría se realiza la suma de los impactos en sus respectivas unidades y posteriormente el impacto de cada componente del calentador es dividido entre ese total.

En esta gráfica podemos observar que el mayor impacto es en la categoría de recursos y en el termotanque y la base seguida del absorbedor. Esto se debe a la cantidad de materias primas que estos dos componentes del calentador requieren. La categoría de Salud Humana presenta la misma característica, siendo el termo tanque y la base junto con el absorbedor los componentes que impactan más.

Por último es importante resaltar que en el subconjunto de energía solamente se aprecia que tiene impacto en el caso de los recursos. Esto es sin duda por la cantidad de materias primas y combustibles fósiles que se emplean.

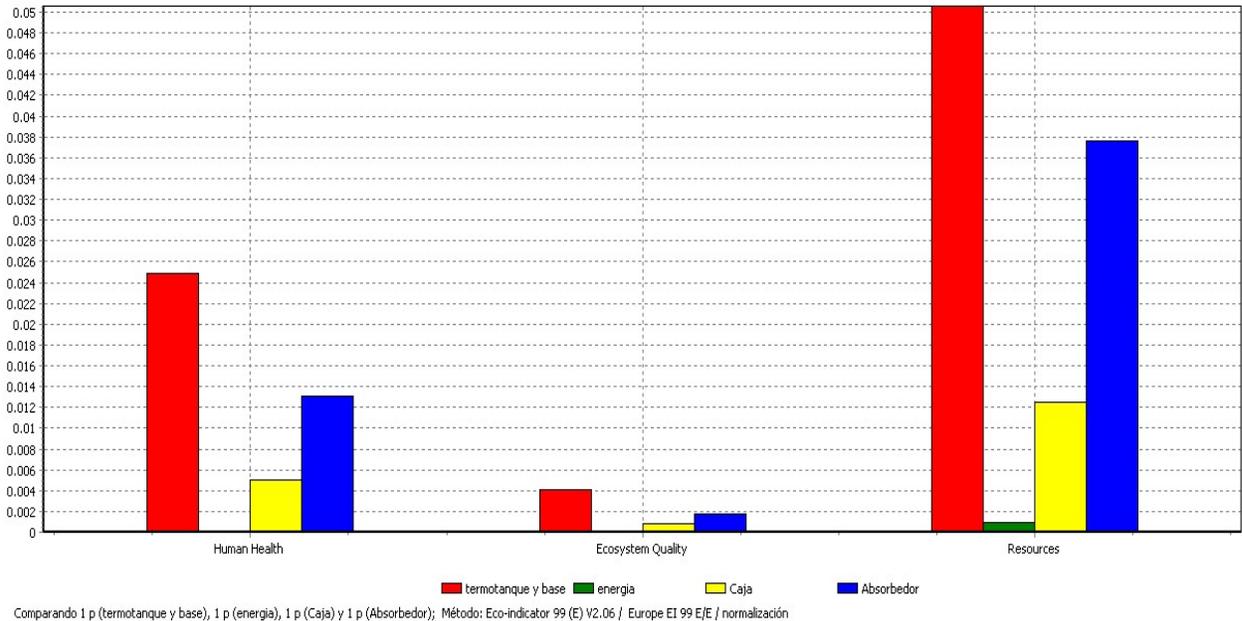


Ilustración 23: Resultados agrupados y normalizados para la perspectiva Igualitaria

Para continuar con el análisis aplicaremos la Ponderación cuyas características fueron ampliamente discutidas anteriormente. Los resultados gráficos se muestran a continuación:

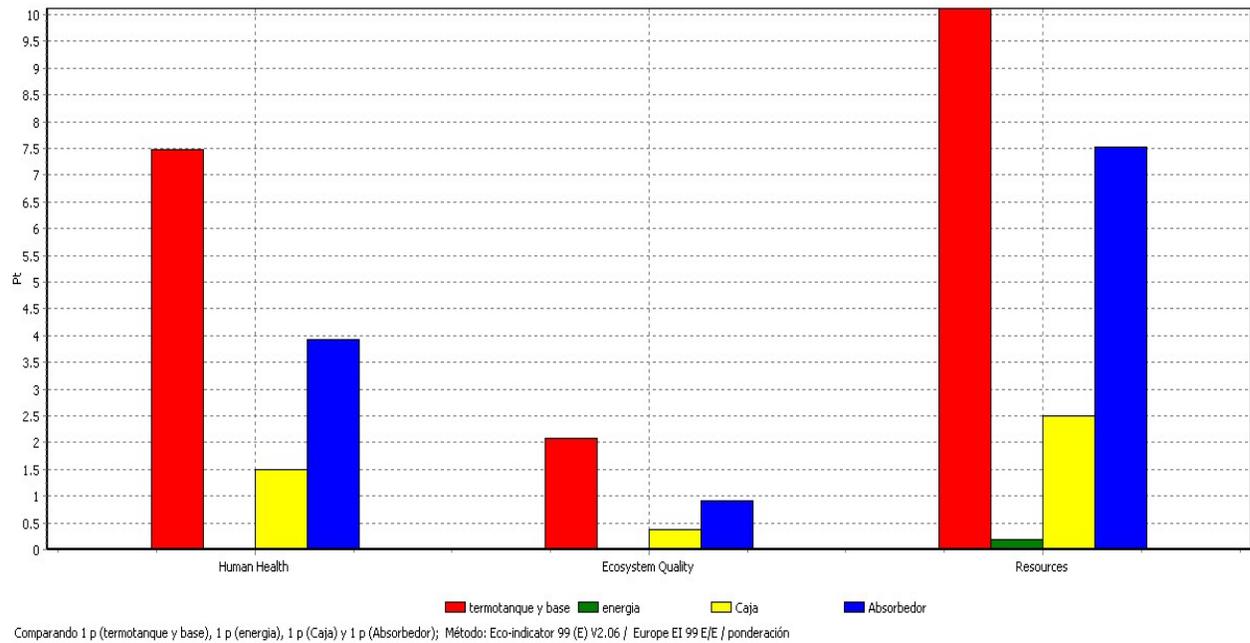


Ilustración 24: Resultados ponderados y agrupados por categoría de impacto, para la perspectiva Igualitaria

De esta gráfica podemos observar que, hecha la ponderación, la categoría de Salud Humana presenta mayor impacto al igual que la Calidad del Ecosistema. El termotanque y la base así como el absorbedor siguen siendo, para las tres categorías, los componentes que más impacto presentan. Para este caso no podemos dejar de mencionar que la Calidad del Ecosistema es la categoría que menos impacto recibe.

Continuando con el análisis, haremos las anotaciones referentes a la representación de evaluación del daño:

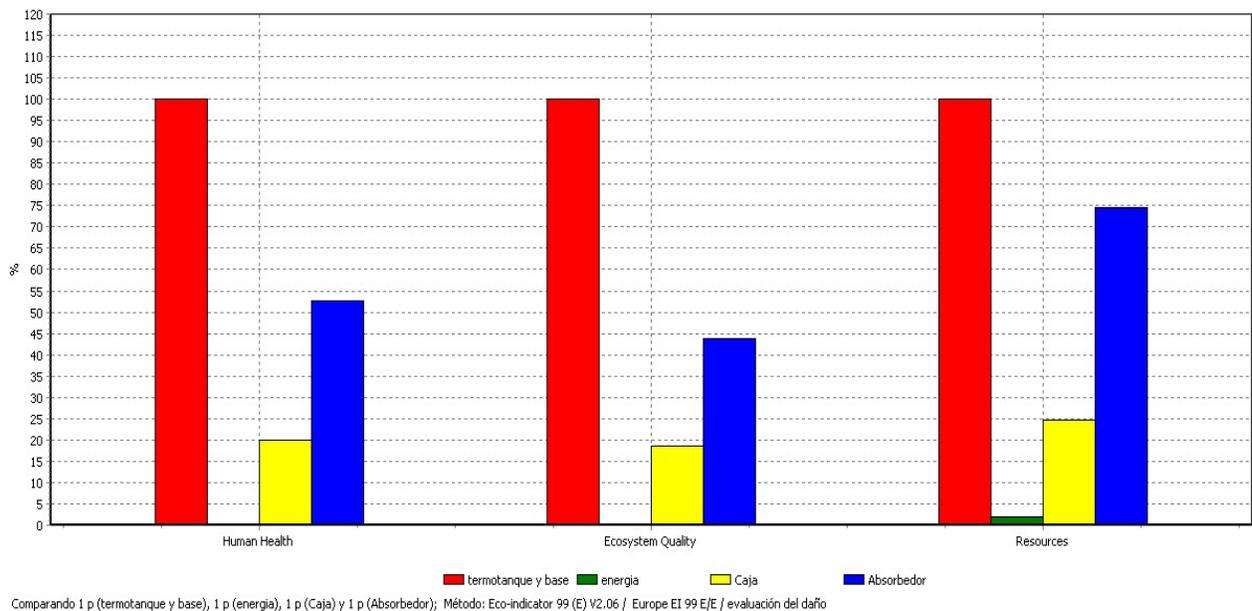


Ilustración 25: Resultados de la evaluación del daño agrupados por categoría de impacto, para la perspectiva Igualitaria

En esta representación observamos una relación más equitativa entre las tres categorías. Lo que hemos venido observando en los casos anteriores es que el termotanque y la base son los componentes que más impacto tienen sobre el resultado. En este caso se presentan en porcentajes y para las tres categorías su porcentaje es equivalente al 100%. Por otro lado el absorbedor tiene porcentajes que van desde el 75% para la categoría de recursos hasta el 45% para la categoría de calidad del ecosistema, pasando por un 55% para Salud Humana. La caja y sus componentes se mantienen en un promedio de impacto del 20% para todos los casos.

Para concluir con este análisis haremos mención de la representación de puntuación única. Esta

representación no fue mencionada anteriormente porque es característica del programa (Simapro). Los resultados se presentan como puntos (Pt) que representan una milésima parte de la carga ambiental anual de un habitante europeo promedio.

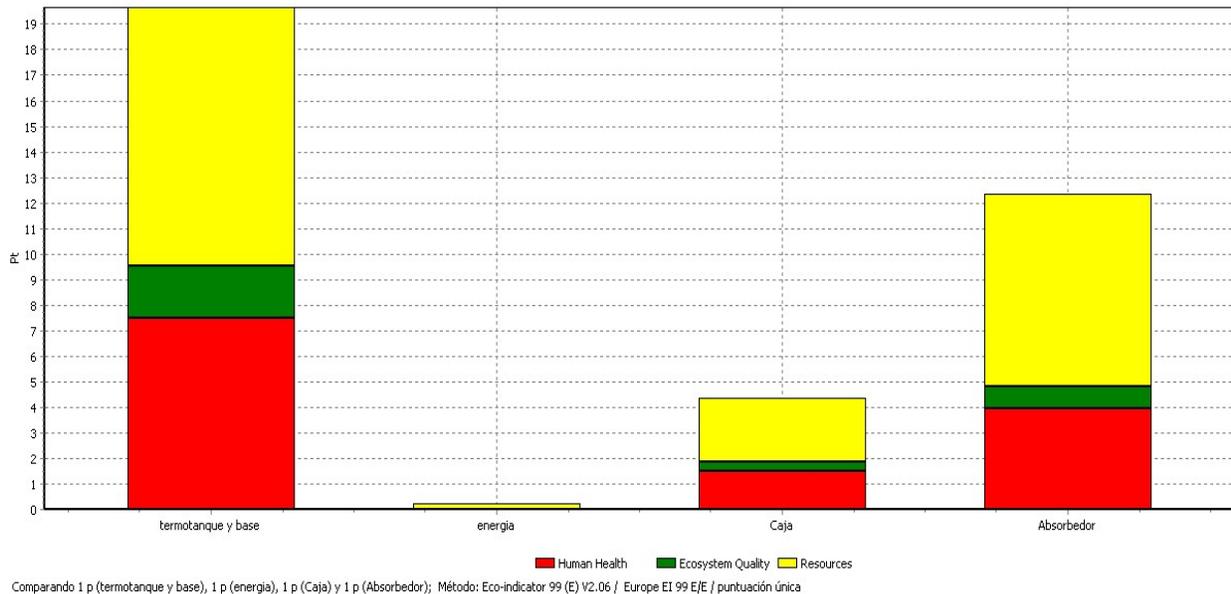


Ilustración 26: Resultados de la puntuación única agrupados por categoría de impacto, para la perspectiva Igualitaria

Como se puede observar, la orientación de los ejes y del código de colores cambian. Ahora sobre el eje de las abscisas se presentan los componentes del calentador mientras que en el eje de las ordenadas los puntos (Pt) que cada categoría aporta al impacto total. Podemos ver que el termo tanque y la base tienen un puntaje mayor a los 19 Pt, seguidos del absorbedor con poco más de 12 Pt y la caja con 4 Pt. Mencionamos que la energía presenta menos de 1 Pt y esto es consistente con lo que hemos venido presentando con otros indicadores.

Capítulo 5. Conclusiones

El hacer un estudio completo como lo es el Análisis del Ciclo de Vida nos permite percatarnos de un punto esencial en la producción, que en nuestro país apenas se empieza a entender, que es el impacto ambiental relacionado con todos los aspectos del producto, desde su fabricación hasta su disposición final, y no limitarse simplemente al impacto relacionado con su uso.

Resulta de vital importancia que se realicen este tipo de estudios para las líneas de producción que ya están funcionando, pero también en la primer etapa de diseño y sobre todo, si se pretende presentar el producto como un producto sustentable, amigable con el medio ambiente o ecológico.

Los resultados que se obtuvieron en este estudio dicen en primer lugar las emisiones equivalentes de dióxido de carbono en un escenario de cien años fueron de 396.85 [kgCO_{2eq}], si lo comparamos con el estudio conducido por Ardente en 2005, donde calculó un impacto equivalente a 721 [kgCO_{2eq}] nos podemos dar cuenta que, a pesar de que si existe una diferencia marcada, estamos hablando del mismo orden de magnitud. Las diferencias podrían ser explicadas por el nivel de automatización, mismo que requeriría de un consumo mucho mayor de energía eléctrica, en comparación al proceso, mucho más artesanal, llevado a cabo en Modulo Solar. Otro punto que puede explicar la diferencia es el hecho de que en el estudio del Dr. Ardente sí se incluye el escenario de disposición final.

En este aspecto, es importante ampliar el presente estudio para incluir de una manera más precisa el impacto que tienen los trabajadores (en comparación a los procesos automatizados), así como posibles escenarios de disposición final. Esto sin duda incrementaría la exactitud de los datos e incluso nos daría la posibilidad de aprovechar más herramientas del programa computacional como son la simulación Montecarlo para el caso de la incertidumbre o la simulación de escenarios de disposición final.

Por otro lado, con respecto a los objetivos se cumplieron ampliamente al realizar un estudio completo del análisis del ciclo de vida y posteriormente hacer el análisis con las emisiones de dióxido de carbono equivalentes. Este último resultado arrojó datos muy interesantes sobre el amortiguamiento de las emisiones.

Si hacemos el equivalente con un modelo financiero, donde las emisiones por concepto de la producción del calentador solar son una inversión inicial y la cantidad de emisiones evitadas son anualidades, obtenemos un retorno de la inversión muy atractivo para todos los casos y que va de entre 1.6 y 0.798 años. En un modelo financiero podemos concluir que este es un negocio rentable. En este punto es posible incrementar la profundidad de este estudio si se analiza el mercado de carbono a partir de las emisiones ahorradas y de los planes del Gobierno Federal de incrementar el uso de estas tecnologías.

No podemos dejar de mencionar que respecto a la hipótesis se puede concluir que es cierto que existen impactos ambientales relacionados con la extracción, manufactura, transporte y disposición final del calentador solar, pero estos impactos son mucho menores a los generados por otros sistemas como el calentador de GLP.

Respecto a lo planteado en la hipótesis sobre el origen principal del impacto ambiental, que se presumió, era el consumo de energía eléctrica, no es posible concluir en ese sentido. Como observamos en el análisis del Eco-Indicator 99, el consumo energético apenas aparecía en las gráficas. Realmente el mayor impacto esta directamente relacionado con la extracción de las materias primas.

Otro objetivo que no fue planteado pero que sin duda es importante, es sentar un precedente en metodología y aplicaciones para el estudio mucho más amplio de esta herramienta. Así mismo abogar por la inclusión de una asignatura relacionada al análisis del ciclo de vida en el área terminal de Ingeniería Industrial como parte fundamental de la formación de un ingeniero enfocado hacia la producción.

Anexos.

I. Estimaciones para el termo tanque.

Para el cálculo del peso de los materiales del termo tanque se utilizaron las medidas estándar que presenta el proveedor y las densidades publicadas de los materiales.

El cuerpo exterior del termo tanque tiene 1275.2 [mm] de largo y un diámetro de 465 [mm], está hecho de lámina galvanizada calibre 24 (0.60[mm]). Con estos datos y haciendo una simple multiplicación obtenemos el volumen de la lámina que es: 132.3×10^4 [mm³]. Utilizando la densidad estándar para aceros de 7850 [kg/m³], y multiplicando ambos resultados obtenemos una aproximación al peso de la lámina que resulta ser: 10.38 [kg].

El cuerpo interno del termo tanque tiene una capacidad de 150 litros de agua con un largo de 1003.4 [mm]. A partir de estos dos datos calculamos el radio interno del termo tanque despejando de la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen} = \Pi * r^2 * l_{\text{interior}}$$

$$150 \times 10^6 [\text{mm}^3] = \Pi * r^2 * 1003.4$$

$$r = 218.13 [\text{mm}]$$

Con este dato y sabiendo que la lámina es calibre 16 (1.5[mm]) podemos obtener de manera análoga al párrafo anterior el volumen interior del tanque que es: 0.0025 [m³] y que multiplicado por la densidad de 7850 [kg/m³] obtenemos un peso de 19.73[kg].

Por último para el cálculo del peso del aislante térmico (foam) se restaron los volúmenes del tanque interno menos el externo quedando: 0.0663 [m³]. Para este material se tiene una densidad de entre 0.8 y 2.5 libras por pie cúbico; obtendremos la media aritmética que equivale a una densidad de 1.65 [lb/ft³] y en sistema internacional equivale a 26.43 [kg/m³]. Haciendo la multiplicación de la densidad por el volumen tenemos un peso de 1.75 [kg] de foam.

Es importante mencionar que el foam o espuma es un compuesto principalmente de poliuretano con aplicaciones importantes en el aislamiento térmico y acústico.

II. Comparación entre las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción de un Mega Joule Eléctrico para América del Sur y para México.

De acuerdo con el estudio conducido por *Flores-Velazquez, Muños Ledo-Carranza, Villalba-Valle* en 2007 las emisiones relacionadas a la industria eléctrica durante 2005 de dióxido de carbono fueron de 105,637.80 [Gg]. El consumo total de electricidad ese año fue de 588.593 [PJ] (*Balance Nacional de Energía 2005*). Haciendo las siguientes operaciones:

$$\text{Emisiones por MJ} = \frac{105,637.80 \times 10^9 [\text{gCO}_2]}{588.593 \times 10^9 [\text{MJ}]}$$

$$\text{Emisiones por MJ} = 179.475 [\text{gCO}_2/\text{MJ}]$$

A partir de este resultado, y considerando que las emisiones reportadas en el software son 70.2 [gCO₂/MJ] realizamos el cálculo del factor lineal como se muestra a continuación:

$$\text{Factor de corrección} = \frac{179.475}{70.2} = 2.55$$

Aplicando este factor de corrección al programa, las emisiones totales de gases de efecto invernadero producto del consumo energético directo e indirecto, se incrementaron en 0.3 [kgCO_{2eq}]

III. Resultados completos de las emisiones atmosféricas.

No	Sustancia	Unidad	termotanque y base	energia	Caja	Absorbedor
1	Acetaldehyde	mg	0.37	x	3.85	0.36
2	Acetic acid	mg	3.95	x	30.80	1.73
3	Acetone	mg	0.35	x	3.73	0.36
4	Acrolein	µg	0.21	x	1.56	0.01
5	Aldehydes, unspecified	µg	78.04	0.00	75.19	10.25
6	Aluminum	mg	61.30	x	319.32	14.95
7	Americium-241	µBq	x	x	446.72	98.91
8	Ammonia	g	0.43	0.00	1.07	0.00
9	Antimony	µg	9.74	0.00	104.72	9.87
10	Antimony-124	µBq	x	x	6.58	1.46
11	Antimony-125	nBq	x	x	848.71	183.96
12	Argon-41	Bq	x	x	52.18	11.53
13	Arsenic	mg	1.50	0.00	18.22	10.10
14	Asbestos	ng	2.36	0.00	x	x
15	Barium	mg	0.50	x	4.05	0.22
16	Barium-140	µBq	x	x	94.10	20.66
17	Benzaldehyde	ng	72.88	x	535.61	4.26
18	Benzene	mg	286.58	0.00	86.14	18.49
19	Benzene, ethyl-	mg	14.06	0.00	21.59	1.74
20	Benzene, hexachloro-	ng	x	x	4.06	0.71
21	Benzene, pentachloro-	ng	x	x	10.86	1.90
22	Benzo(a)pyrene	mg	3.10	x	0.44	0.00
23	Beryllium	µg	5.15	x	43.25	2.62
24	Boron	mg	3.79	x	57.07	7.41
25	Bromine	mg	1.59	x	13.44	0.89
26	Butane	mg	22.17	x	232.25	12.99
27	Butene	mg	0.11	x	8.37	0.29
28	Cadmium	mg	3.92	0.00	1.52	0.36
29	Calcium	mg	6.38	x	96.55	11.86
30	Carbon-14	Bq	x	x	35.98	7.94
31	Carbon dioxide	kg	187.41	1.34	59.47	38.26
32	Carbon disulfide	mg	2.36	0.00	x	x
33	Carbon monoxide	g	582.87	2.03	124.88	16.45
34	Cerium-141	µBq	x	x	2.23	0.49
35	Cerium-144	mBq	x	x	4.75	1.05
36	Cesium-134	mBq	x	x	16.98	3.75
37	Cesium-137	mBq	x	x	32.84	7.25
38	Chlorinated fluorocarbons, soft	mg	17.67	0.01	x	x
39	Chlorine	g	12.95	0.00	1.58	x
40	Chloroform	µg	x	x	1.72	0.38
41	Chromium	mg	2.59	0.00	2.19	0.13
42	Chromium-51	µBq	x	x	84.21	18.59
43	Coal dust	mg	x	x	160.54	x
44	Cobalt	mg	0.10	x	1.15	0.15
45	Cobalt-57	nBq	x	x	41.16	9.07
46	Cobalt-58	µBq	x	x	681.16	150.57
47	Cobalt-60	mBq	x	x	1.01	0.22

48	Copper	mg	25.13	0.00	8.54	0.55
49	Curium-242	nBq	x	x	2.35	0.52
50	Curium-244	nBq	x	x	21.37	4.72
51	Curium alpha	µBq	x	x	709.79	156.87
52	Cyanide	µg	4.59	x	88.98	2.10
53	Dinitrogen monoxide	mg	56.31	0.00	310.31	89.43
54	Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	µg	1.42	0.00	0.22	0.00
55	Ethane	g	0.08	x	1.22	0.01
56	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	pg	x	x	0.00	x
57	Ethane, 1,2-dichloro-	µg	12.04	0.01	51.19	0.08
58	Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	µg	x	x	485.08	107.10
59	Ethane, chloro-	µg	6.54	0.19	x	x
60	Ethane, dichloro-	µg	x	x	65.30	14.55
61	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	mg	0.01	x	4.43	0.55
62	Ethanol	mg	0.70	x	7.48	0.72
63	Ethene	mg	4.70	2.29	251.07	3.05
64	Ethene, chloro-	µg	4.85	x	39.87	2.42
65	Ethyne	mg	0.11	x	2.04	0.21
66	Fluoranthene	mg	9.30	x	1.18	x
67	Fluoride	mg	x	x	42.58	x
68	Fluorine	mg	144.95	0.00	18.64	x
69	Formaldehyde	mg	35.68	x	121.13	3.45
70	Heat, waste	MJ	23.72	x	366.01	18.46
71	Helium	mg	x	x	46.26	9.57
72	Heptane	mg	1.06	x	18.38	2.52
73	Hexane	mg	2.23	x	38.55	5.28
74	Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	mg	5.13	x	56.75	5.27
75	Hydrocarbons, aliphatic, alkenes, unspecified	mg	2.68	x	21.82	1.17
76	Hydrocarbons, aromatic	mg	123.42	13.16	1.05	0.20
77	Hydrocarbons, chlorinated	mg	22.00	0.00	281.34	x
78	Hydrocarbons, unspecified	g	53.82	1.71	50.06	2.83
79	Hydrogen	g	3.47	0.03	1.38	x
80	Hydrogen-3, Tritium	Bq	x	x	370.56	81.90
81	Hydrogen chloride	g	0.68	0.02	3.97	0.14
82	Hydrogen cyanide	µg	889.66	0.00	x	x
83	Hydrogen fluoride	mg	47.65	0.84	728.64	23.67
84	Hydrogen sulfide	g	1.66	0.00	0.36	0.00
85	Iodine	mg	0.53	x	4.84	0.36
86	Iodine-129	mBq	x	x	127.64	28.22
87	Iodine-131	mBq	x	x	14.32	3.12
88	Iodine-133	mBq	x	x	7.94	1.76
89	Iodine-135	mBq	x	x	11.88	2.63

90	Iron	mg	17.83	x	155.87	9.30
91	Iron-59	nBq	x	x	931.80	206.01
92	Krypton-85	kBq	x	x	2199.06	485.73
93	Krypton-85m	Bq	x	x	2.65	0.57
94	Krypton-87	Bq	x	x	1.18	0.26
95	Krypton-88	Bq	x	x	103.66	22.93
96	Krypton-89	mBq	x	x	828.74	178.92
97	Lanthanum	µg	14.90	x	119.31	6.21
98	Lanthanum-140	µBq	x	x	59.42	13.10
99	Lead	mg	149.29	0.00	206.97	107.40
100	Lead-210	mBq	x	x	493.81	111.76
101	Magnesium	mg	13.21	x	104.14	5.14
102	Manganese	mg	0.20	x	7.60	0.27
103	Manganese-54	µBq	x	x	24.35	5.38
104	Mercaptans, unspecified	µg	25.10	11.02	x	x
105	Mercury	mg	1.54	0.00	0.85	0.15
106	Metals, unspecified	mg	25.95	0.61	55.50	3.28
107	Methane	g	65.26	13.83	90.66	2.00
108	Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	µg	14.68	x	348.79	54.14
109	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	µg	x	x	4.36	0.96
110	Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	µg	x	x	2.48	0.55
111	Methane, dichloro-, HCC-30	µg	147.72	0.00	31.79	5.28
112	Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	µg	x	x	3.96	0.88
113	Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	mg	x	x	1.87	0.02
114	Methane, tetrachloro-, CFC-10	µg	x	x	20.64	4.30
115	Methane, tetrafluoro-, CFC-14	mg	0.08	x	39.76	4.92
116	Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	µg	x	x	18.40	4.07
117	Methanol	mg	0.71	x	8.03	0.84
118	Molybdenum	µg	36.01	x	442.46	66.45
119	Naphthalene	mg	1.96	x	0.15	0.10
120	Neptunium-237	nBq	x	x	23.41	5.17
121	Nickel	mg	2.21	0.00	14.88	2.20
122	Niobium-95	µBq	x	x	4.31	0.95
123	Nitrogen	g	x	x	1.03	0.01
124	Nitrous dioxide	g	324.66	0.44	26.23	x
125	Nitrogen oxides	g	136.24	2.05	130.65	123.88
126	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	g	0.56	0.01	13.14	1.36
127	Noble gases, radioactive, unspecified	Bq	x	x	3.19	0.68
128	Organic substances, unspecified	g	1.50	0.16	0.71	x
129	Oxygen	ng	3.49	0.00	x	x
130	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	mg	3.91	0.00	6.69	0.71

131	Particulates	g	x	x	1.48	x
132	Particulates, < 10 um	g	11.14	0.42	x	x
133	Particulates, < 10 um (mobile)	mg	x	x	272.06	18.14
134	Particulates, < 10 um (stationary)	g	x	x	2.55	0.51
135	Particulates, > 10 um	g	2.85	x	17.31	0.03
136	Particulates, > 10 um (process)	g	x	x	5.08	0.38
137	Particulates, SPM	g	47.73	0.07	23.24	0.14
138	Pentane	g	0.07	x	138.23	0.02
139	Phenol	µg	7.95	x	55.40	1.22
140	Phenol, pentachloro-	ng	x	x	1.76	0.31
141	Phosphorus	mg	0.46	x	2.76	0.00
142	Phosphorus, total	µg	x	x	903.24	206.76
143	Platinum	µg	0.00	x	2.04	0.01
144	Plutonium-238	nBq	x	x	53.15	11.72
145	Plutonium-241	mBq	x	x	39.11	8.63
146	Plutonium-alpha	mBq	x	x	1.42	0.31
147	Polonium-210	mBq	x	x	770.33	174.76
148	Potassium	mg	4.96	x	61.16	2.64
149	Potassium-40	mBq	x	x	95.11	21.74
150	Promethium-147	mBq	x	x	12.06	2.66
151	Propane	mg	30.02	x	426.13	14.36
152	Propene	mg	1.93	1.70	8.98	0.79
153	Propionic acid	mg	0.33	x	2.04	0.04
154	Protactinium-234	mBq	x	x	14.20	3.14
155	Radioactive species, other beta emitters	µBq	x	x	3.08	0.66
156	Radioactive species, unspecified	kBq	452.65	x	3147.42	4.46
157	Radium-226	mBq	x	x	532.22	118.06
158	Radium-228	mBq	x	x	46.88	10.71
159	Radon-220	Bq	x	x	3.62	0.84
160	Radon-222	kBq	x	x	34.37	7.56
161	Ruthenium-103	nBq	x	x	243.89	53.68
162	Ruthenium-106	mBq	x	x	141.85	31.31
163	Scandium	µg	6.39	x	48.64	2.15
164	Selenium	mg	0.19	x	2.05	0.14
165	Selenium compounds	pg	33.31	0.00	x	x
166	Silicates, unspecified	mg	62.94	x	379.83	0.62
167	Silicon	mg	x	x	195.03	41.78
168	Silver	pg	961.85	0.00	x	x
169	Silver-110	µBq	x	x	23.99	5.30
170	Sodium	mg	3.82	x	37.09	3.86
171	Soot	g	218.63	0.07	16.80	0.22
172	Strontium	mg	0.62	x	4.90	0.25
173	Strontium-89	µBq	x	x	42.51	9.39
174	Strontium-90	mBq	x	x	23.42	5.17
175	Styrene	µg	4.34	0.00	x	x
176	Sulfur dioxide	kg	4.81	0.00	0.56	3.34
177	Sulfur oxides	g	554.69	0.89	143.11	6.68

178	Sulfuric acid	mg	0.86	0.00	11.99	x
179	t-Butyl methyl ether	µg	x	x	35.44	0.23
180	Technetium-99	nBq	x	x	993.39	219.24
181	Tellurium-123m	µBq	x	x	107.06	23.69
182	Thallium	µg	1.68	x	17.59	1.67
183	Thorium	µg	35.87	x	235.09	4.33
184	Thorium-228	mBq	x	x	39.70	9.07
185	Thorium-230	mBq	x	x	157.89	34.90
186	Thorium-232	mBq	x	x	25.21	5.76
187	Thorium-234	mBq	x	x	14.20	3.14
188	Tin	µg	13.87	x	101.86	4.01
189	Titanium	mg	1.92	x	14.50	0.64
190	Toluene	mg	682.70	0.00	87.84	42.17
191	Uranium	µg	16.16	x	117.18	4.53
192	Uranium-234	mBq	x	x	170.16	37.61
193	Uranium-235	mBq	x	x	8.24	1.82
194	Uranium-238	mBq	x	x	239.93	53.55
195	Uranium alpha	mBq	x	x	508.31	112.14
196	Vanadium	mg	4.58	x	52.36	8.10
197	VOC, volatile organic compounds	mg	280.83	x	107.71	300.81
198	Xenon-131m	Bq	x	x	5.42	1.18
199	Xenon-133	Bq	x	x	1580.56	349.02
200	Xenon-133m	mBq	x	x	792.98	175.14
201	Xenon-135	Bq	x	x	270.53	59.47
202	Xenon-135m	Bq	x	x	27.04	5.85
203	Xenon-137	mBq	x	x	668.27	144.90
204	Xenon-138	Bq	x	x	7.31	1.58
205	Xylene	mg	11.34	0.00	95.21	5.04
206	Zinc	mg	109.13	0.00	85.46	16.46
207	Zinc-65	µBq	x	x	104.69	23.06
208	Zirconium	µg	2.62	x	29.48	0.22
209	Zirconium-95	µBq	x	x	1.56	0.34
210	Radon-222	kBq	x	x	3160.00	699.30

Referencias

- Ansems A., Van Leeuwen S., Guinee J., Frankl P. Making Life Cycle Information and Interpretative Tools Available. B&O, 2005.
- Ardente Fulvio, Beccali Giorgio, Cellura Maurizio, Lo Brano Valerio. Life Cycle assessment of a Solar Thermal Collector: Sensitivity Analysis, Energy and Environmental Balances. Renewable Energy. 2005.
- Ardente Fulvio, Beccali Giorgio, Cellura Maurizio, Lo Brano Valerio. Life Cycle assessment of a Solar Thermal Collector. Renewable Energy. 2004.
- Armando Deffis Caso. Casa ecológica y Autosustentable. 1990.
- Burch J, Salasovich J. Cold-Climate Solar Domestic Water Heating Systems: Life-Cycle Analyses and Opportunities for Cost Reduction. National Renewable Energy Laboratory. Conference Paper, December 2005.
- Centro de Información para México, Cuba y República Dominicana. Organización de las Naciones Unidas. 2008. En Internet http://www.cinu.org.mx/temas/des_sost.htm. Fecha de consulta: 3 de mayo de 2008.
- Chicago Pneumatic Catalog. En internet: http://catalogue.cp.com/e-catalogue/index_xmlhttp.asp?target=riveters&BA=it consultado el 2 de marzo de 2010.
- Comisión Europea sobre Medio Ambiente. Cambio climático. En internet: http://ec.europa.eu/environment/climat/campaign/what/climatechange_es.htm. Fecha de Consulta 3 de mayo de 2008.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 1992. En internet: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>. Fecha de consulta 3 de mayo de 2008.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Los Diez Primeros Años. 2004.
- Crawford Robert, Treloar Graham. Net Energy Analysis of Solar and Conventional Domestic Hot Water Systems in Melbourne, Australia. Solar Energy, 2004.
- Flores-Velazquez, Muñoz Ledo-Carranza, Villalba-Valle. Inventario de emisiones en 2005 de gases de efecto invernadero por el sector energético mexicano. Ingeniería Investigación y Tecnología, 2007.
- Foster Piers, Ramaswamy Venkatachalam. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. En: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change.

- Gas Butano, toda la información. En internet: <http://www.gasbutano.org/> consultado el 9 de marzo de 2010.
- Guinée Jeroen. Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to de ISO Standards. Kluwer Academic Publishers. 2002.
- Hischer Roland, Weidema Bo. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2009.
- International Energy Agency. Renewables for Heating and Cooling, Untapped Potential. Renewable Energy Technology Deployment. 2007.
- Jesko Zanis. Classification of Solar Collectors. Engineering for rural development. 2008.
- Jönbrink Anna, Erixon Maria, Olsson Par. LCA Software Survey. SIK research Publication. 2000.
- Koroneos C., Drosos G., Roumbas G., Moussiopoulos N. Life Cycle Environmental Assessment of a Solar Heater. 8th International Conference on Environmental Science and Technology. September 2003.
- Mirasgedis S., Diakoulaki D., Assimacopoulos D. Solar Energy and the Abatement of Atmospheric Emissions. Renewable Energy. 1996.
- Rosenbloom Stephanie. At Walmart ¿, Labeling to reflect green intent. NY Times. 15 de Junio de 2009. En internet <http://www.nytimes.com/2009/07/16/business/energy-environment/16walmart.html> consultado el 20 de abril de 2010.
- Scientific Applications International Corporation. Life Cycle Principles and Practice. National Risk Management Research Laboratory. 2006.
- Secretaría de Energía. Balance Nacional de Energía 2005.
- Secretaría de Energía. Prospectiva del Mercado de Gas Licuado de Petróleo 2009-2024. México, 2009.
- Textos Científicos. En internet <http://www.textoscientificos.com/energia/calentador-solar/aplicaciones/colectores-solares-agua>. Fecha de consulta 5 de febrero 2010.
- Tsilingiridis G, Martinopoulos G., Kyriakis N. Life Cycle Environmental Impact of a Thermosyphonic Domestic Solar Hot Water System in Comparison With Electrical and Gas Water Heating.
- Unger N., Beigl P., Wassermann G. General Requirements for LCA Software Tools. Institute of

Waste Management. 2003.

- United Nations Environment Programme. Evaluation of Environmental Impacts in Life Cycle Assessment. Meeting Report, 2000.
- Weiss Werner, Bergmann Irene, Faninger Gerhard. Solar Heating Worldwide, Markets and contribution to the energy supply 2001. IEA Solar Heating & cooling programme. 2004.

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Diagrama de los componentes de un calentador solar para agua.....	12
Ilustración 2: Fases del análisis del ciclo de vida.....	15
Ilustración 3: Enfoque sistémico del Análisis del Ciclo de Vida.....	16
Ilustración 4: Esquema de las variantes del ciclo de vida.....	18
Ilustración 5: Ejemplo de un triángulo de ponderaciones para el Eco-Indicator 99.....	21
Ilustración 6: Diagrama de flujo de la producción del absorbedor	28
Ilustración 7: Absorbedor montado previo al proceso de pintado.....	29
Ilustración 8: Dobladora empleada para habilitar la lámina pinto utilizada en la caja del calentador. .	30
Ilustración 9: Diagrama de flujo del habilitado de los componentes de la caja.....	31
Ilustración 10: Remachadora neumática empleada en los procesos de cierre final.....	32
Ilustración 11: Taladro neumático utilizado en los procesos de cierre final.....	32
Ilustración 12: Diagrama de flujo del armado final del calentador solar plano.....	33
Ilustración 13: Gráfica de barras de las emisiones de dióxido de carbono equivalente para los tres escenarios.....	40
Ilustración 14: Gráfica del tiempo de recuperación de las emisiones para los distintos escenarios.....	47
Ilustración 15: Gráfica de las emisiones evitadas posteriores al periodo de recuperación.....	50
Ilustración Ilustración16: Esquema de la agrupación de los distintos impactos en las tres categorías principales.	51
Ilustración17: Gráfica de los resultados normalizados por perspectiva en la categoría de Salud Humana	52
Ilustración 18: Gráfica de los resultados normalizados por perspectiva en la categoría de Calidad del Ecosistema	52
Ilustración 19: Gráfica de los resultados normalizados por perspectiva en la categoría de Recursos.....	53
Ilustración 20: Gráfica de los resultados normalizados por categoría de impacto en la perspectiva Jerárquica.....	54
Ilustración 21: Gráfica de los resultados normalizados por categoría de impacto en la perspectiva Individualista.....	54

Ilustración 22: Gráfica de los resultados normalizados por categoría de impacto en la perspectiva Igualitaria.....	55
Ilustración 23: Resultados agrupados y normalizados para la perspectiva Igualitaria.....	57
Ilustración 24: Resultados ponderados y agrupados por categoría de impacto, para la perspectiva Igualitaria.....	57
Ilustración 25: Resultados de la evaluación del daño agrupados por categoría de impacto, para la perspectiva Igualitaria.....	58
Ilustración 26: Resultados de la puntuación única agrupados por categoría de impacto, para la perspectiva Igualitaria.....	59

Índice de Tablas.

Tabla 1: Factores de normalización y ponderación predeterminados.....	20
Tabla 2: Materias primas involucradas en la producción del absorbedor y sus características	27
Tabla 3: Equipos utilizados en la producción del absorbedor y sus características de potencia.....	27
Tabla 4: Materias primas involucradas en la caja y sus características	30
Tabla 5: Materias primas involucradas en el armado final y sus características	32
Tabla 6: Materias primas involucradas en el termotanque y la base así como sus características	34
Tabla 7: Tiempo de uso y potencia de cada equipo.....	35
Tabla 8: Consumo energético equivalente para las herramientas neumáticas.....	36
Tabla 9: Resultados de las emisiones de los gases de efecto invernadero seleccionados.....	38
Tabla 10: Factores adimensionales para calcular el potencial de calentamiento global en tres escenarios (20,100 y 500 años).....	39
Tabla 11: Emisiones equivalentes de dióxido de carbono por componente [kg CO ₂ eq].....	39
Tabla 12: Normalización. Perspectiva Individualista.....	41
Tabla 13: Normalización. Perspectiva Igualitaria.....	42
Tabla 14: Normalización. Perspectiva Jerárquica.....	42
Tabla 15: Factores de emisión de dióxido de carbono equivalente para el propano por unidad de volumen en un escenario de 100 años.....	46

Tabla 16: Tiempo de recuperación de las emisiones en distintos escenarios.....	48
Tabla 17: Emisiones evitadas a lo largo de la vida útil del calentador.	49
Tabla18: Resultados normalizados por categoría de impacto de la perspectiva Igualitaria.....	55