

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil



Trabajo de Diploma

Título:

Evaluación económica y ambiental de plantas prototipo de pequeño y mediano tamaño para la producción de cemento LC³

Diplomante: Dairon Josue Abreu Cerdá

Tutor(es): M.Sc. Yudiesky Cancio Díaz

Dr. Ing. Iván Machado López

Consultante: Dr. José Fernando Martirena Hernández

Santa Clara, junio de 2017

“Año 59 de la Revolución”

Pensamiento

*“Los amigos que tienes y cuya amistad ya has puesto a prueba
engánchalos a tu alma con ganchos de acero”.*

William Shakespeare

Dedicatoria

A mi madre por dedicarme toda su vida y esfuerzo, eres la persona más especial del mundo.

Agradecimientos

A mi familia por estar siempre presente y apoyarme en los momentos difíciles.

A mi primo Andy por ser el hermano que nunca tuve.

A mi tía Maira que Dios la tenga en la gloria.

A mis amigos por aceptarme como soy y darme momentos tan felices.

A Yudiesky por la confianza y la ayuda que me dio, sin su apoyo la realización de este trabajo hubiera sido imposible, por su guía y consejos que me hicieron mejor persona.

A Iván por su tiempo y preocupación, por ayudar a formarme como un mejor profesional y por compartir sus conocimientos conmigo.

A los amigos del cuarto 304 que hicieron de estos 5 años los mejores de mi vida.

A todos,

Muchas Gracias.

RESUMEN

La presente investigación evalúa el potencial económico y medioambiental de la construcción y puesta en marcha de plantas de producción de cemento LC³ con mediano y pequeño formato, 300 000 tpa y 50 000 tpa. Primeramente, se realiza un diseño preliminar de las plantas debido a que no existen en el mundo actual con estas características. La herramienta analítica para la evaluación económica es la determinación del punto de equilibrio como técnica de análisis económico. Para el análisis medioambiental se compara la cantidad de kilogramos de CO₂ por tonelada de cemento producida que generan estas plantas. Se demuestra que la planta de 300 000 tpa comienza a producir beneficios al 45.6 % de su capacidad con utilidades de 2 662 517, 63 USD y recupera su inversión a los 2 años. La planta de 50 000 tpa comienza a producir beneficios al 56.4 % de su capacidad con utilidades de 355 804,02 USD y recupera su inversión a los 4 años. Ambas plantas presentan una contribución a la reducción del impacto ambiental en un 38 %.

Palabras claves: cemento LC³, diseño, evaluación económica, análisis medioambiental.

ABSTRACT

The present investigation evaluates the economic and environmental potential of the construction and start-up of LC³ cement plants with medium and small format, 300 000 tpy and 50 000 tpy. Firstly, a preliminary design of the plants is carried out because they do not exist in the present world with these characteristics. The analytical tool for economic evaluation is the determination of the break point as a technique of economic analysis. For the environmental analysis the amount of kilograms of CO₂ per ton of cement produced by these plants is compared. It is shown that the 300,000 tpy plant starts producing profits at 45.6% of its capacity with profits of 2,662,517, 63 USD and recovers its investment after 2 years. The 50,000 tpy plant starts producing profits at 56.4% of its capacity with profits of 355 804.02 USD and recovers its investment at 4 years. Both plants have a contribution to the reduction of environmental impact by 38%.

Key words: LC3 cement, design, economic evaluation, environmental analysis

Índice

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO LC ³ , DISEÑO DE PLANTAS DE CEMENTO, ESTUDIO TÉCNICO DE PROYECTOS, ECONOMÍAS DE ESCALA Y EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES.....	4
1.1. El cemento de bajo carbono LC ³ frente a los cementos tradicionales	4
1.1.1. Generalidades sobre la producción actual de cemento Portland	4
1.1.2. El cemento de bajo carbono LC ³ : Alternativa tecnológica con perfil de sostenibilidad	6
1.2. Fundamentos teórico-conceptuales sobre los diseños de plantas de producción de cemento	9
1.2.1. La planificación de la distribución en planta. Objetivos.....	10
1.2.2. Factores que influyen en el diseño de las plantas de producción de cemento	11
1.3. Generalidades sobre el estudio técnico de un proyecto	14
1.3.1. Definición de ingeniería básica y su importancia para el proyecto.....	16
1.3.2. Técnicas de análisis del proceso de producción	17
1.3.3. Factores que determinan la adquisición de equipo y maquinaria.....	20
1.4. Las economías de la escala de producción	21
1.4.1. Economías de escala y microeconomía. Conceptos.....	21
1.4.2. Relación entre el tamaño de la empresa y la economía de escala.	24
1.5. Bases analítico-metodológicas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como herramienta de evaluación ambiental.....	27
1.5.1. Ventajas y limitaciones del Análisis de Ciclo de Vida.....	28
1.5.2. Etapas fundamentales que componen la metodología para el Análisis de Ciclo de Vida	29
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO	36
CAPÍTULO II: DIMENSIONAMIENTO DE HORNO Y MOLINO DE PLANTAS PROTOTIPO PARA LA PRODUCCIÓN DE LC ³ , ASÍ COMO LA METODOLOGÍA PARA SU EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL.....	37
2.1. El proceso de producción del cemento.....	37
2.2. Dimensionamiento de los hornos y molino para la producción de cemento LC ³	42
2.2.1. El horno rotatorio	42
2.2.2. Tiempo de permanencia del material en el horno	46
2.2.3. El molino de bolas.....	47
2.3. Metodología para el análisis económico y ambiental de las plantas de producción de LC ³	53
3.2.1. Evaluación ambiental	54
3.2.2. Evaluación económica.....	56

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO	57
CAPÍTULO III. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LAS PLANTAS PROTOTIPO DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO LC³: TAMAÑO PEQUEÑO (50 000 TPA) Y MEDIANO (300 000 TPA).....	59
3.1. Supuestos y condicionamientos previos del estudio económico y ambiental	59
3.2. Creación del inventario de datos	60
3.3. Evaluación económica	63
3.4. Evaluación ambiental	68
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO	70
CONCLUSIONES GENERALES	71
RECOMENDACIONES	72
BIBLIOGRAFÍA	73

INTRODUCCIÓN

En el contexto global actual, el cuidado del medio ambiente y el uso de tecnologías más limpias compiten con el incremento de la necesidad de desarrollar la infraestructura habitacional e industrial, donde los materiales de construcción desempeñan un rol fundamental.

El cemento es el principal material de construcción empleado por el hombre, pues es parte fundamental del hormigón. Usualmente la producción de cemento puede ser tomada como un indicador del crecimiento de un país. Entre los años 2000 y 2011, la producción de cemento se incrementó de 1660 a 3600 millones de toneladas. Este incremento ha sido el soporte, en años recientes, del crecimiento y desarrollo de la infraestructura de varios países con economías emergentes (Vizcaíno 2014).

Asociado a los procesos de manufactura del cemento, grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) son liberadas a la atmósfera. Se calcula que entre 0.65 – 0.90 toneladas de CO_2 son emitidas por cada tonelada de cemento fabricado, lo que hace responsable a esta industria de entre 5 – 8 % de las emisiones globales (Müller and Harnisch 2008, Flatt et al. 2012, March 2012). Para el 2050 se espera que la demanda de este aglomerante supere los 5000 millones de toneladas, lo cual contribuiría a un incremento de más del 3 % de las emisiones de CO_2 con respecto a los valores reportados en 2011. Por otra parte, la producción de cemento es catalogada como una industria energéticamente intensiva en la cual la energía representa entre el 20 – 40 % de los costos de producción totales y que según datos de 2010 consume el 85 % de la energía total empleada para la producción de minerales no metálicos, ello representa alrededor del 6 % de la energía total en el sector industrial (Vizcaíno 2014).

Las emisiones de dióxido de carbono debido a la descarbonatación no pueden evitarse, constituyendo una etapa esencial de la fabricación del cemento, sin embargo, estas se reducen utilizando materiales cementicios suplementarios como: puzolanas naturales, cenizas volantes y escorias de alto horno. Entre los de mayores posibilidades de mitigación ambiental se encuentran las arcillas calcinadas. Las arcillas son minerales que se encuentran ampliamente diseminados sobre la superficie terrestre y pueden ser activadas mediante procesos térmicos que requieren mucho menos energía que la demandada por el clínquer.

Una nueva tecnología basada en la sustitución de clínquer por metacaolín ha sido investigada en los últimos 4 años por investigadores del equipo internacional “Cemento de Bajo Carbono”. La nueva propuesta se reconoce oficialmente por la comunidad científica como LC³ ¹, cuyos resultados y avances se encuentran documentados en revistas científicas (LC3 2017).

El nuevo cemento se ha producido a escala de prueba piloto en 2013 en la fábrica de cemento Siguaney, Sancti-Spíritus, así como una segunda prueba a nivel industrial, en el Centro Técnico para el Desarrollo de Materiales de Construcción (CTDMC), en la Habana. Ambas producciones resultaron de gran éxito para las pruebas de desempeño estructural realizadas a nivel de laboratorio, demostrándose resistencias mecánicas y durabilidad superiores al cemento Portland ordinario (Machado Rivero 2016). Pero sin lugar a dudas la propiedad más importante que ofrece el cemento LC³ es la expansión de la producción al lograr sustituciones de clínquer de hasta el 50 %.

Para los países en vías de desarrollo resulta una opción tentativa utilizar este material como un sustituto para el cemento Portland pues es económicamente más barato y además reduce considerablemente las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Recientemente a través de la gestión de IPIAC NERY la demanda de plantas de producción comercial de LC³ se ha disparado. Con vistas de crear una propuesta atractiva para productores de países en vías de desarrollo para los cuales no suponga un riesgo la inversión y les permita una mayor especialización se ha propuesto el siguiente **problema científico** para la presente investigación:

¿Cómo diseñar y evaluar, económica y ambientalmente, plantas prototipo de tamaño intermedio para la producción de cemento LC³?

Objetivo General:

Evaluar económica y ambientalmente plantas prototipo de tamaño intermedio para la producción de LC³, a partir de su diseño preliminar.

Objetivos Específicos:

¹ LC³: Limestone Calcined Clay Cement, siglas en inglés.

1. Sistematizar los fundamentos teórico-conceptuales relacionados con la producción de cemento LC³, el diseño de plantas de cemento, las economías de la escala y la evaluación ambiental de sistemas productivos.
2. Determinar el dimensionamiento de los hornos y molino de las plantas prototipos de tamaño intermedio (50 000 tpa y 300 000 tpa) para producción de LC³, así como la metodología para la evaluación económica y ambiental.
3. Evaluar económica y ambientalmente las plantas prototipo de tamaño intermedio (50 000 tpa y 300 000 tpa) para la producción de LC³.

Hipótesis de investigación:

Beneficios económicos y ambientales significativos pueden ser obtenidos a partir de plantas de tamaño pequeño y mediano para la producción de cemento LC³, las cuales pueden replicarse con facilidad por su escala de operaciones intermedia.

Estructura de la tesis:

Capítulo I: Fundamentos teóricos de la producción de cemento LC³, diseño de plantas de cemento, estudio técnico de proyectos, economías de escala y evaluación de impactos ambientales.

Capítulo II: Dimensionamiento de hornos y molino de las plantas prototipos para la producción de LC³, así como la metodología para la determinación de la escala de operaciones con criterio económico y ambiental.

Capítulo III: Evaluación económica y ambiental de las plantas prototipos de tamaño intermedio para la producción de LC³.

Además, el informe del trabajo de diploma contendrá las conclusiones, las recomendaciones y la bibliografía.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO LC³, DISEÑO DE PLANTAS DE CEMENTO, ESTUDIO TÉCNICO DE PROYECTOS, ECONOMÍAS DE ESCALA Y EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES.

En el presente capítulo se sientan las bases metodológicas relacionadas con el diseño de plantas de cemento, las economías de escala y los procedimientos para la evaluación ambiental. Se crean los nexos conceptuales entre los elementos anteriores en función del objetivo de la investigación.

1.1. El cemento de bajo carbono LC³ frente a los cementos tradicionales

Las diferencias entre los cementos tradicionales y los cementos con materiales cementicios suplementarios se exponen en el presente epígrafe. Desde el punto de vista ingenieril se analizan las ventajas y desventajas del cemento LC³ con respecto al Cemento Portland Ordinario en cuanto a propiedades físicas, costo de producción y niveles de contaminación.

1.1.1. Generalidades sobre la producción actual de cemento Portland

El hormigón es el segundo material más usado por el hombre, después del agua. Se estima que por cada habitante del planeta se producen como promedio 3 toneladas de hormigón cada año (Aylard and Hawson July 2002); esto representa el 57 % de todas las producciones antropogénicas, excluyendo los combustibles fósiles y los flujos de desechos (Purnell 2013). Debido a su relativo bajo costo de producción y versatilidad, no se visualiza en el futuro cercano el remplazo del hormigón por ningún otro material.

El cemento es un material aglomerante que es el principal constituyente del hormigón. Este está formado por clínquer (80 %), caliza (15 %) y yeso (5 %). Al ser el clínquer el principal componente del cemento es el que determina sus propiedades básicas que son: resistencia, calor de hidratación, estabilidad de volumen y durabilidad. Estas propiedades se pueden variar de acuerdo con la necesidad del usuario, para ello se afecta la composición mineralógica de los componentes del clínquer que según (Machado Torres 2015) son mayoritariamente:

1. Silicato tricálcico (C₃S):
 - Fase denominada “alita”.
 - Constituye del 50 al 70 % del clínquer
 - Se hidrata y endurece rápidamente.

- Responsable, en gran parte, del inicio del fraguado.
 - Aporta resistencia a corto y largo plazo (a mayor porcentaje de C_3S , mayor resistencia).
2. Silicato dicálcico (C_2S):
- Fase denominada “belita”.
 - Constituye del 15% al 30% del clínquer.
 - Se hidrata y endurece lentamente.
 - Contribuye al incremento de la resistencia a edades mayores de 7 días.
3. Aluminato tricálcico (C_3A):
- Constituye aproximadamente del 5% al 10% del clínquer.
 - Libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento.
 - Contribuye al desarrollo de las resistencias muy tempranas y al fraguado del cemento.
 - Vulnerable a la acción de los sulfatos: forman producto expansivo (etringita).
4. Ferro aluminato tetracálcico (C_4AF):
- Constituye aproximadamente del 5% al 15% del clínquer.
 - Se hidrata con rapidez, pero contribuye muy poco a la resistencia.
 - Su formación reduce la temperatura (T) de clinkerización.
5. Sulfato de calcio:
- Yeso: $CaSO_4 \cdot 2H_2O$
 - Anhidrita: $CaSO_4$
 - Se adiciona al cemento (aproximadamente 5%), durante su molienda, para controlar el fraguado.
 - Controla la hidratación del C_3A .
 - Ayuda a controlar la contracción por secado y puede influenciar la resistencia.

La producción del clínquer o clinkerización es la etapa en la cual se desprende la mayor cantidad de CO_2 a la atmósfera debido a las altas temperaturas que se alcanzan en los hornos rotatorios.

Al igual que otros productos hechos por el hombre, la fabricación de hormigón lleva asociada una huella ecológica inherente a sus procesos de manufactura. Un estudio realizado en 2014 a 90 entidades productoras de petróleo, gas natural y cemento arrojó que desde 1854 hasta 2010 se totalizaron 914 billones de toneladas de CO_2 equivalente

emitidas a la atmósfera que constituyen el 63 % de las emisiones mundiales acumuladas de CO₂ y metano. De este total a la producción del cemento le corresponde el 1,45 %, es decir 13, 21 billones de toneladas de CO₂ equivalente (Heede 2014). Si se le compara con otros materiales de construcción como el acero y la madera, el impacto ambiental que genera es menor en términos de unidad de producción, pero los volúmenes masivos en que es fabricado, lo hacen responsable de cerca del 9% de las emisiones globales de CO₂ (Purnell 2013).

Las emisiones de CO₂ relativas al hormigón, corresponden fundamentalmente a las emisiones asociadas al cemento, su principal constituyente. La generación de este gas invernadero es la mayor contribución de la industria del cemento a la huella de carbono, que está estrechamente relacionada con la huella ecológica del hormigón pues dentro de los términos de emisiones el CO₂ ocupa el lugar más importante (Wiedmann and Barrett 2010).

En el período 2000 – 2011 la industria de cemento duplicó su producción, alcanzando los 3600 millones de toneladas (Cembureau 2010). El incremento de la demanda de los últimos años tiene su fundamento en el desarrollo y crecimiento de las llamadas “economías emergentes” que necesitan construir la infraestructura de base para la industrialización y urbanización en sus países. Solamente en 2010, países de Suramérica, África y Asia generaron el 85 % de la producción anual de cemento. Las predicciones para el 2050 del *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) (IEA-WBCSD 2009) indican que en un escenario de alta demanda el incremento de la producción alcanzará los 4400 millones de toneladas de cemento, otros pronósticos sitúan la demanda por encima de los 5000 millones (Müller and Harnisch 2008). El mencionado incremento elevará de manera consecuente los niveles de emisiones de CO₂, si se mantienen las condiciones de producción actuales.

Ante las preocupaciones existentes con respecto al cambio climático, diversos países y corporaciones reconocen la necesidad de implementar políticas que contribuyan a mitigar el impacto ambiental y crear un modelo sostenible para la producción de cemento. Una de las líneas de trabajo fundamental es la reducción del factor de clínquer mediante el empleo de materiales cementicios suplementarios.

1.1.2. El cemento de bajo carbono LC3: Alternativa tecnológica con perfil de sostenibilidad

El LC3 es un cemento ternario, Portland de alta pureza (P-35) con una mezcla de caliza y arcilla de origen caolinítico calcinada a temperaturas entre 650-800 °C. Este aglomerante alcanza una resistencia similar a la de los cementos Portland con adiciones activas (Martirena Hernández et al. 2015).

La utilización de metacaolín (MK) como aditivo en la producción de cementos constituye una de las medidas de sustentabilidad económica y ambiental de la industria cementera, es uno de los materiales cementicios suplementarios más estudiados por las ventajas en el ahorro de recursos energéticos y la disminución de las emisiones de CO₂ que provoca su utilización como sustituto de una porción de clínquer. Constituye un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a las temperaturas antes referidas; con esta temperatura se hace una transformación de su estructura cristalina que al perder el agua combinada por la acción térmica destruye la estructura cristalina del caolín (Alujas 2010).

La fórmula de cemento desarrollada permite triplicar los niveles actuales de sustitución de clínquer que logra la industria de cemento en Cuba (alrededor del 15-18% en el cemento PP-25), para producir un cemento de similar resistencia y una mayor durabilidad, que pueden producir daños en la matriz de hormigón (Martirena Hernández 2013). En la actualidad se ha logrado producir LC³ con una composición de 50 % clínquer, 30 % metacaolín, 15 % caliza y 5 % yeso (Figura 1.1) Estudios de sensibilidad realizados han permitido evaluar las reducciones de las emisiones de gases invernadero a la atmósfera. Estas varían mucho de acuerdo a la tecnología utilizada, tomando como ejemplo la más avanzada: calcinador flash para la producción de metacaolín y tecnología BAT² para la producción de clínquer, se pueden reducir las emisiones de CO₂ alrededor de un 35 % en comparación con las del Cemento Portland Ordinario y un 25 % en comparación con las del Cemento Portland Puzolánico. Los costos de producción del cemento LC3 varían entre el 10 y el 30 % en dependencia de la tecnología y los combustibles utilizados (Berriel et al. 2016).

Este cemento es producto de la colaboración internacional entre la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba y la Instituto Politécnico Federal de Lausana, Suiza y financiado por la agencia suiza para la cooperación y el desarrollo (COSUDEI). La parte cubana está representada por el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y

² BAT: Best Available Techniques, siglas en inglés (Mejores Técnicas Disponibles)

Materiales (CIDEM) que ha estado liderando este proyecto dentro de Cuba y representando al país a nivel internacional.

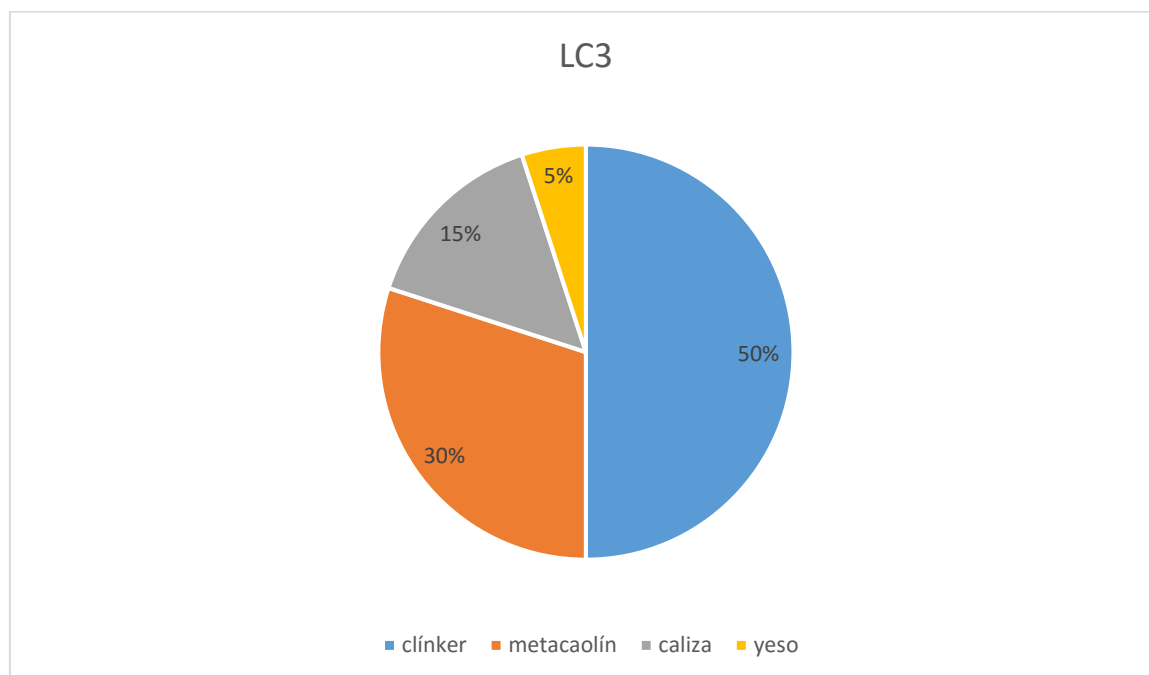


Figura 1.1: Composición del Cemento LC³. Fuente: (Scrivener and Favier 2015)

El LC³ se aprovecha de la hidratación sinérgica de clínquer, arcilla calcinada y piedra caliza triturada para alcanzar el rendimiento requerido de los cementos comerciales, incluso a factores de clínquer tan bajos como 0,40. La piedra caliza y arcilla de baja calidad usado en la mezcla LC³ garantiza que el cemento se pueda producir a un costo más bajo que incluso PPC³ (Smith-Gillespie 2010), para Cuba el cemento análogo de los PPC en el mundo es el PP-25.

Cuba jugó un papel pionero en el desarrollo de este cemento a través de ensayos industriales en los que se encontró que los cementos procuraron mejores ventajas en comparación con los cementos disponibles en el mercado cubano a pesar de los bajos factores de clínquer. En Cuba más de 100 toneladas de cemento LC³ se han producido y utilizado en la producción de materiales de construcción y las viviendas sociales.

Tecnología y Acción para el Progreso Rural (TARA) y el Instituto Indio de Tecnología de Delhi (IIT Delhi) producen alrededor de 40 toneladas de cemento en la India y

³ PPC: Pozzolanic Portland Cement, siglas en inglés (Cemento Portland Puzolánico).

demuestran que el cemento LC³ se puede producir usando tecnologías ampliamente disponibles y que pueden ser utilizados por los trabajadores en la industria de la construcción de la misma manera que los cementos existentes, sin ningún entrenamiento adicional. Los resultados de laboratorio muestran que los hormigones producidos utilizando LC³ que tiene un factor de clínquer de 0,50 da resistencias similares a los hormigones similares utilizando OPC⁴ (Smith-Gillespie 2010), para Cuba el cemento análogo de los OPC en el mundo es el P-35.

Los resultados iniciales muestran también que el cemento se puede producir económicamente en varios escenarios existentes y que puede reducir las emisiones de CO₂ procedentes de la producción de cemento. También se encontró que las materias primas necesarias para la producción de LC³ están ampliamente disponibles en varios países a nivel mundial (Smith-Gillespie 2010).

El LC³ puede ser una alternativa viable para el crecimiento de la industria del cemento en los países en vías de desarrollo pues permite la expansión de la producción, es decir que con menor cantidad de clínquer es posible producir mayor cantidad de cemento, reduce significativamente el costo de producción al consumir menor cantidad de clínquer, y disminuye las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Pruebas industriales realizadas en Cuba sobre la producción a escala industrial de este cemento con un factor de clínquer del 50% han determinado la eficacia del sistema, pues en condiciones no optimizadas se han obtenido aceptables resultados en términos de rendimiento ya sea del material como cemento, o con aplicaciones en hormigones (Vizcaíno-Andrés et al. 2015).

1.2. Fundamentos teórico-conceptuales sobre los diseños de plantas de producción de cemento

En este epígrafe se aborda la problemática de los diseños de instalaciones industriales, específicamente la distribución en planta. Para llevar a cabo un adecuado diseño ha de tenerse en cuenta cuáles son los objetivos estratégicos y tácticos que este habrá de apoyar, así como los posibles conflictos que puedan surgir entre ellos. La planificación de la distribución en planta incluye decisiones acerca de la disposición física de los centros de actividad económica dentro de una instalación.

⁴ OPC: Ordinary Portland Cement, siglas en inglés (Cemento Portland Ordinario).

1.2.1. La planificación de la distribución en planta. Objetivos

El objetivo principal de la planificación de la distribución en planta consiste en permitir que los obreros y las maquinarias trabajen con mayor eficiencia. Es necesario encontrar una ordenación de los equipos y de las áreas de trabajo que sea más económica y eficiente, al mismo tiempo que segura y satisfactoria para el personal que va a efectuar el trabajo (Konz and Zazueta 1991). Este objetivo general se alcanza a través de la consecución de hechos como:

- Disminución de la congestión.
- Supresión de áreas ocupadas innecesariamente.
- Reducción del trabajo administrativo e indirecto.
- Mejora de la supervisión y el control.
- Mayor facilidad de ajuste a los cambios de condiciones.
- Mayor y mejor utilización de la mano de obra, la maquinaria y los servicios.
- Reducción de las mantenciones y del material en proceso.
- Disminución del riesgo para el material o su calidad.
- Reducción del riesgo para la salud y aumento de la seguridad de los trabajadores.
- Elevación de la moral y la satisfacción del personal.
- Disminución de los retrasos y del tiempo de fabricación e incremento de la producción (Dileep 2001).

Los factores enumerados anteriormente constituyen ventajas concretas, pero no todas podrán ser alcanzadas al mismo tiempo. En la mayoría de los casos la mejor solución será un equilibrio en la consecución de los mismos.

Los objetivos básicos que ha de conseguir una buena distribución en planta son:

- Unidad. Al perseguir el objetivo de unidad se pretende que no haya sensación de pertenecer a unidades distintas ligadas exclusivamente a la distribución en planta.
- Circulación mínima. El movimiento de productos, personas o información se debe minimizar.
- Seguridad. La Seguridad en el movimiento y el trabajo de personas y materiales es una exigencia en cualquier diseño de distribución en planta.

- Flexibilidad. Se alude a la flexibilidad en el diseño de la distribución en planta como la necesidad de diseñar atendiendo a los cambios que ocurrirán en el corto y medio plazo en volumen y en proceso de producción (Dileep 2001).

1.2.2. Factores que influyen en el diseño de las plantas de producción de cemento

Los materiales

Dado que el objetivo fundamental del Subsistema de Operaciones es la obtención de los bienes y servicios que requiere el mercado, la distribución de los factores productivos dependerá necesariamente de las características de aquellos y de los materiales sobre los que haya que trabajar. A este respecto, son factores fundamentales a considerar el tamaño, forma, volumen, peso y características físicas y químicas de los mismos, que influyen decisivamente en los métodos de producción y en las formas de manipulación y almacenamiento. La bondad del diseño de una planta dependerá en gran medida de la facilidad que aporta en el manejo de los distintos productos y materiales con los que se trabaja.

Por último, habrán de tenerse en cuenta la secuencia y orden en el que se han de efectuar las operaciones, puesto que esto dictará la ordenación de las áreas de trabajo y de los equipos, así como la disposición relativa de unos departamentos con otros (Arbós 2012).

La maquinaria

Para lograr un diseño adecuado es indispensable tener información de los procesos a emplear, de la maquinaria, utillaje y equipos necesarios, así como de la utilización y requerimientos de los mismos. La importancia de los procesos radica en que éstos determinan directamente los equipos y máquinas a utilizar y ordenar. El estudio y mejora de métodos queda tan estrechamente ligado a la distribución en planta que, en ocasiones, es difícil discernir cuáles de las mejoras conseguidas en una redistribución se deben a ésta y cuáles a la mejora del método de trabajo ligada a la misma (incluso hay veces en que la mejora en el método se limitará a un reordenamiento o redistribución de los elementos implicados).

En lo que se refiere a la maquinaria, se habrá de considerar su tipología y el número existente de cada clase, así como el tipo y cantidad de equipos. El conocimiento de factores relativos a la maquinaria en general, tales como espacio requerido, forma, altura

y peso, cantidad y clase de operarios requeridos, riesgos para el personal, necesidad de servicios auxiliares, etc., se muestra indispensable para poder afrontar un correcto y completo estudio de diseño de una planta (Arata 2009).

La mano de obra

También la mano de obra ha de ser ordenada en el proceso de diseño, englobando tanto la directa como la de supervisión y demás servicios auxiliares. Al hacerlo, debe considerarse la seguridad de los empleados, junto con otros factores, tales como luminosidad, ventilación, temperatura, ruidos, etc. De igual forma habrá de estudiarse la cualificación y flexibilidad del personal requerido, así como el número de trabajadores necesarios en cada momento y el trabajo que habrán de realizar. De nuevo surge aquí la estrecha relación del tema que nos ocupa con el diseño del trabajo, pues es clara la importancia del estudio de movimientos para una buena distribución de los puestos de trabajo (Muther et al. 1965).

El movimiento

En relación con este factor, hay que tener presente que las manutenciones no son operaciones productivas, pues no añaden ningún valor al producto. Debido a ello, hay que intentar que sean mínimas y que su realización se combine en lo posible con otras operaciones, sin perder de vista que se persigue la eliminación de manejos innecesarios y antieconómicos (Arata 2009).

Las esperas

Uno de los objetivos que se persiguen al estudiar la distribución en planta es conseguir que la circulación de los materiales sea fluida a lo largo de la misma, evitando así el costo que suponen las esperas y demoras que tienen lugar cuando dicha circulación se detiene. Sin embargo, el material en espera no siempre supone un costo a evitar, pues, en ocasiones, puede proveer una economía superior (por ejemplo: protegiendo la producción frente a demoras de entregas programadas, mejorando el servicio a clientes, permitiendo lotes de producción de tamaño más económico, etc.), lo cual hace necesario que sean considerados los espacios necesarios para los materiales en espera (Muther et al. 1965).

Los servicios auxiliares

Los servicios auxiliares permiten y facilitan la actividad principal que se desarrolla en una planta. Entre ellos, podemos citar los relativos al personal (por ejemplo: vías de acceso, protección contra incendios, primeros auxilios, supervisión, seguridad, etc.), los relativos al material (por ejemplo: inspección y control de calidad) y los relativos a la maquinaria (por ejemplo: mantenimiento y distribución de líneas de servicios auxiliares). Estos servicios aparecen ligados a todos los factores que toman parte en la distribución estimándose que aproximadamente un tercio de cada planta o departamento suele estar dedicado a los mismos.

Con gran frecuencia, el espacio dedicado a labores no productivas es considerado un gasto innecesario, aunque los servicios de apoyo sean esenciales para la buena ejecución de la actividad principal. Por ello, es especialmente importante que el espacio ocupado por dichos servicios asegure su eficiencia y que los costos indirectos que suponen queden minimizados (Arbós 2012).

El edificio

La consideración del edificio es siempre un factor fundamental en el diseño de la distribución, pero la influencia del mismo será determinante si éste ya existe en el momento de proyectarla. En este caso, su disposición espacial y demás características (por ejemplo: número de pisos, forma de la planta, localización de ventanas y puertas, resistencia de suelos, altura de techos, emplazamiento de columnas, escaleras, montacargas, desagües, tomas de corriente, etc.) se presenta como una limitación a la propia distribución del resto de los factores, lo que no ocurre cuando el edificio es de nueva construcción (Muther et al. 1965).

Los cambios

Como se comentó anteriormente, uno de los objetivos que se persiguen con la distribución en planta es su flexibilidad. Es, por tanto, ineludible la necesidad de prever las variaciones futuras para evitar que los posibles cambios en los restantes factores que se han enumerado lleguen a transformar una distribución en planta eficiente en otra anticuada que merme beneficios potenciales. Para ello, habrá que comenzar por la identificación de los posibles cambios y su magnitud, buscando una distribución capaz de adaptarse dentro de unos límites razonables y realistas.

La flexibilidad se alcanzará, en general, manteniendo el diseño original tan libre como sea posible de características fijas, permanentes o especiales, permitiendo la adaptación a las emergencias y variaciones inesperadas de las actividades normales del proceso.

Asimismo, es fundamental tener en cuenta las posibles ampliaciones futuras de la distribución y sus distintos elementos, considerando, además, los cambios externos que pudieran afectarla y la necesidad de conseguir que, durante la redistribución, sea posible seguir realizando el proceso productivo.

Se ha expuesto hasta aquí un resumen de las principales consideraciones a tener en cuenta respecto de los factores que entran en juego en un estudio de diseño de una planta. Son notorias las conexiones que existen entre materiales, almacenamiento, movimiento y esperas, servicios y material, mano de obra, maquinaria y edificio, existiendo otros muchos ejemplos que muestran que, en numerosas ocasiones, deberán tenerse presentes a la vez más de uno de los estudiados. Lo importante es que no se obvие ninguno, dándole a cada uno su importancia relativa dentro del conjunto y buscando que en la solución final se consigan las máximas ventajas del conjunto (Arbós 2012).

1.3. Generalidades sobre el estudio técnico de un proyecto

El estudio técnico conforma la segunda etapa de los proyectos de inversión, en el que se contemplan los aspectos técnicos operativos necesarios en el uso eficiente de los recursos disponibles para la producción del servicio deseado, en este caso la fabricación de cemento, y en el cual se analizan la determinación del tamaño óptimo del lugar de producción, localización, instalaciones y organización requeridos (Baca Urbina 2006).

La importancia de este estudio se deriva de la posibilidad de llevar a cabo una valorización económica de las variables técnicas del proyecto, que permitan una apreciación exacta o aproximada de los recursos necesarios para el proyecto; además de proporcionar información de utilidad al estudio económico-financiero. Está a su vez estrechamente relacionado con el diseño de la planta pues cada vez que se diseñe se está ejecutando un nuevo proyecto, para el cual es extremadamente importante realizar un estudio técnico que determine si es económicamente factible.

Los aspectos que se relacionan con la ingeniería del proyecto son probablemente los que tienen mayor incidencia sobre la magnitud de los costos y las inversiones que

deberán efectuarse a la hora de implementar un proyecto. En el análisis de la viabilidad financiera de un proyecto, el estudio técnico cumple la función de proveer información para cuantificar el monto de las inversiones y de los costos de operación pertinentes (López et al. 2008).

Una de las conclusiones más importantes derivada en este estudio, es que se deberá definir la función de producción que optimice el empleo de los recursos disponibles en la producción del bien o servicio del proyecto. De aquí podrá obtenerse la información de las necesidades de capital, mano de obra y recursos materiales, tanto para la puesta en marcha como para la posterior operación del proyecto (Chain 2001).

De esta manera, con el estudio técnico se podrán obtener los requerimientos de equipos de fábrica para la operación y el monto de la inversión correspondiente. Del análisis de las características y especificaciones técnicas de las máquinas se precisará su disposición en planta, la que a su vez permitirá dimensionar las necesidades de espacio físico para que el desarrollo de las operaciones se efectúe de manera normal, en consideración a las normas y principios de la administración de la producción (Chain 2001).

El análisis de estos mismos antecedentes hará posible cuantificar las necesidades de mano de obra por especialización y asignarles un nivel de remuneración para el cálculo de los costos de operación. De igual manera, deberán deducirse los costos de mantenimiento y reparaciones, así como el de reposición de los equipos (López et al. 2008).

La descripción del proceso productivo posibilitará, asimismo, dar a conocer las materias primas y los restantes insumos que demandará el proceso. Por este motivo y como ya se ha mencionado, el proceso productivo se elige tanto a través del análisis técnico como económico de las alternativas existentes (Chain 2001).

El estudio técnico no se realiza en forma aislada de los demás estudios existentes. El estudio de mercado definirá ciertas variables relativas a características del producto, demanda proyectada a través del tiempo, estacionalidad en las ventas, abastecimiento de materias primas y sistemas de comercialización adecuados, entre otras materias, dicha información deberá tomarse en cuenta al seleccionar el proceso productivo. El estudio legal podrá señalar ciertas restricciones a la localización del proyecto que podrían de alguna manera condicionar el tipo de proceso productivo. El estudio financiero por

otra parte, podrá ser determinante en la selección del proceso si en él se definiera la imposibilidad de obtener los recursos económicos suficientes para la adquisición de la tecnología más adecuada. En este caso, el estudio deberá tender a calcular la rentabilidad del proyecto, haciendo uso de la tecnología que está al alcance de los recursos disponibles (López et al. 2008).

En síntesis, el objetivo del estudio técnico es llegar a determinar la función de producción óptima para la utilización eficiente y eficaz de los recursos disponibles para la producción del bien o servicio deseado. De la selección de la función óptima se derivarán las necesidades de equipos y maquinarias que, junto con la información relacionada con el proceso de producción, permitirán cuantificar el costo de operación (Chain 2001).

Según (Baca Urbina 2006) el estudio técnico tiene la siguiente estructura básica:

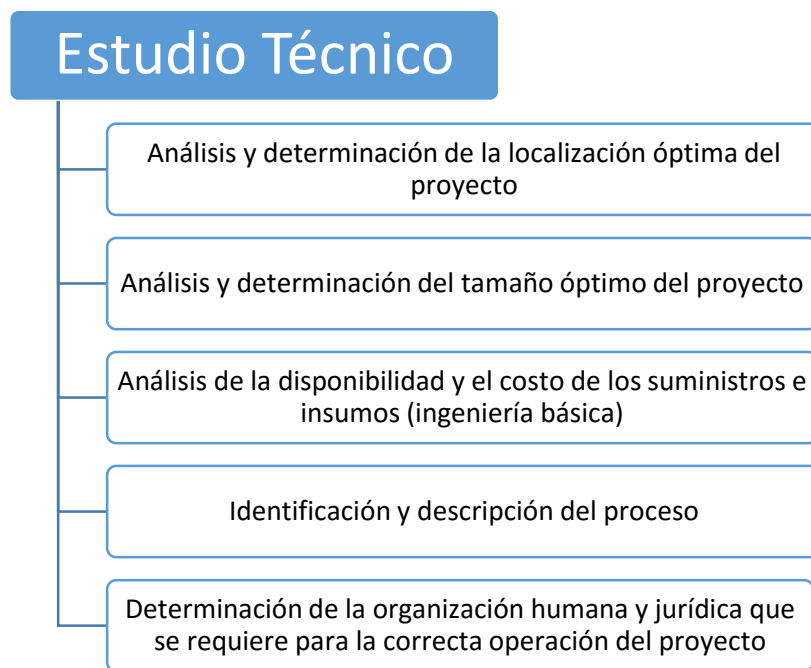


Figura 1.5. Estructura básica del estudio técnico. Fuente: (Baca Urbina 2006)

1.3.1. Definición de ingeniería básica y su importancia para el proyecto

El objetivo general del estudio de ingeniería básica del proyecto es resolver todo lo concerniente a la instalación y el funcionamiento de la planta. Desde la descripción del proceso, adquisición de equipo y maquinaria se determina la distribución óptima de la

planta, hasta definir la estructura jurídica y de organización que habrá de tener la planta productiva (Baca Urbina 2006).

El proceso de producción es el procedimiento técnico que se utiliza en el proyecto para obtener los bienes y servicios a partir de insumos, y se identifica como la transformación de una serie de materias primas para convertirla en artículos mediante una determinada función de manufactura.

En esta parte del estudio el investigador procederá a seleccionar una determinada tecnología de fabricación. Se entenderá por tal al conjunto de conocimientos técnicos, equipos y procesos que se emplean para desarrollar una determinada función. En el momento de elegir la tecnología que se empleará, hay que tomar en cuenta los resultados de la investigación de mercado, pues esto dictará las normas de calidad y la cantidad que se requieren, factores que influyen en la decisión (Cardona and Salazar 2016).

Otro aspecto importante que se debe considerar es la flexibilidad de los procesos y de los equipos para procesar varias clases de insumos, lo cual ayudará a evitar los tiempos muertos y a diversificar fácilmente la producción en un momento dado.

Otro factor primordial es la adquisición de equipo y maquinaria, factor en el que se consideran muchos aspectos para obtener la mejor opción.

1.3.2. Técnicas de análisis del proceso de producción

Para representar y analizar el proceso productivo existen varios métodos. El empleo de cualquiera de ellos depende de los objetivos del estudio. Cualquier proceso productivo, por complicado que sea, puede ser representado por medio de un diagrama para su análisis.

Diagrama de bloques: Es el método más sencillo para representar un proceso. Consiste en que cada operación unitaria ejercida sobre la materia prima se encierra en un rectángulo; cada rectángulo o bloque se une con el anterior y el posterior por medio de flechas que indican tanto la secuencia de las operaciones como la dirección del flujo. En la representación se acostumbra empezar en la parte superior derecha de la hoja. Si es necesario se pueden agregar ramales al flujo principal del proceso. En los rectángulos se anota la operación unitaria (cambio físico o químico) efectuada sobre el material y se puede complementar la información con tiempos y temperaturas (Arbós 2012).

Diagrama de flujo del proceso: Aunque el diagrama de bloques también es un diagrama de flujo, no posee tantos detalles e información como el diagrama de flujo del proceso, donde se usa una simbología internacionalmente aceptada para representar las operaciones efectuadas (Baca Urbina 2006). Dicha simbología es la siguiente:



Operación: Significa que se efectúa un cambio o transformación en algún componente del producto, ya sea por medios físicos, mecánicos o químicos, o la combinación de cualquiera de los tres.



Transporte: Es la acción de movilizar de un sitio a otro algún elemento en determinada operación o hacia algún punto de almacenamiento o demora.



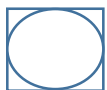
Demora: Se presenta generalmente cuando existen cuellos de botella en el proceso y hay que esperar turno para efectuar la actividad correspondiente. En otras ocasiones el propio proceso exige una demora.



Almacenamiento: Tanto de materia prima, de producto en proceso o de producto terminado.



Inspección: Es la acción de controlar que se efectúe correctamente una operación, un transporte o verificar la calidad del producto.



Operación combinada: Ocurre cuando se efectúan simultáneamente dos de las acciones mencionadas.

Este método es el más usado para representar gráficamente los procesos. Las reglas mínimas para su aplicación son:

- Empezar en la parte superior derecha de la hoja y continuar hacia abajo, y a la derecha o en ambas direcciones.
- Numerar cada una de las acciones en forma ascendente; en caso de que existan acciones agregadas al ramal principal del flujo en el curso de proceso, asignar el siguiente número secuencial a estas acciones en cuanto aparezcan. En caso de que existan maniobras repetitivas se formará un bucle o rizo y se hará una asignación supuesta de los números.

- Introducir los ramales secundarios al flujo principal por la izquierda de este, siempre que sea posible.
- Poner el nombre de la actividad a cada acción correspondiente.

Cursograma analítico: Más que un diagrama, es una técnica que consiste en hacer un análisis muy detallado del proceso, básicamente con la intención de reducir el tiempo, la distancia, o ambos parámetros dentro de un proceso que ya está en funcionamiento. A diferencia del diagrama de bloques y del diagrama de proceso, los cuales pueden ser empleados en estudios sobre instalaciones que todavía no existen, el cursograma analítico es más apropiado para estudios de redistribución de planta, esto limita su uso en proyectos de ampliación de la capacidad de instalaciones y, por supuesto, en estudios de redistribución de áreas (Cardona and Salazar 2016).

Diagrama de hilos y diagrama de recorrido: Básicamente son lo mismo, excepto por la forma en que se presentan. Ambos muestran con una gráfica la ruta que recorre la materia prima, desde que sale del almacén hasta que se convierte en producto final. Mientras el diagrama de hilos se presenta como una maqueta tridimensional y con hilos de colores se señala el recorrido de los materiales, en el diagrama de recorrido se hace exactamente lo mismo, pero solo sobre un dibujo. Algunos softwares comerciales permiten hacer estos estudios con mucha facilidad, pues se puede dibujar toda la maquinaria y equipos del proceso, y después simula el movimiento de las máquinas, permitiendo de una manera rápida y eficiente obtener una representación del proceso, no solo donde se pueda observar el recorrido de materiales, sino también que el recorrido ya esté optimizado en términos de la distancia recorrida. Por tanto, estos diagramas son más apropiados para hacer estudios de distribución y redistribución de planta (Baca Urbina 2006).

Diagrama sinóptico: Este diagrama solo utiliza los símbolos internacionales de operación y transporte, es decir, es un diagrama sintetizado de un proceso. Se utiliza para representar procesos complejos que puedan tener decenas o aun cientos de actividades. Precisamente, el diagrama mostrará de manera rápida y clara las principales actividades, omitiendo mostrar las demoras, almacenamiento e inspecciones. Si el proceso a analizar es muy sencillo, no más de 30 operaciones, es mejor utilizar un diagrama de flujo normal que intentar sintetizarlo (Arbós 2012).

Cuando se hace la evaluación de un proyecto, el uso de un determinado diagrama debe obedecer al objeto del estudio, ya que no es lo mismo hacer el estudio de una planta completa nueva que la evaluación de la ampliación de la capacidad instalada o la evaluación para lanzar al mercado un producto nuevo dentro de una planta que ya está funcionando. Los diagramas de flujo, de bloques y los iconogramas, son útiles para evaluaciones de nuevas instalaciones; el cursograma analítico y los diagramas de recorrido e hilos, son más apropiados para hacer estudios de distribuciones o redistribuciones, y no para representar los procesos, es decir, se utilizan más en estudios de ampliación de capacidad o de elaboración de nuevos productos en plantas ya existentes, en tanto que el diagrama sinóptico solo es un auxiliar para representar procesos muy complejos.

1.3.3. Factores que determinan la adquisición de equipo y maquinaria

Cuando llega el momento de decidir sobre la compra de equipo y maquinaria, se deben tomar en cuenta una serie de factores que afectan directamente la elección. La mayoría de la información que es necesario recabar será útil en la comparación de varios equipos y también es la base para realizar una serie de cálculos y determinaciones posteriores. A continuación se menciona toda la información que se debe recabar y la utilidad que tendrá en etapas posteriores (Cardona and Salazar 2016).

- I) **Proveedor:** Es útil para la presentación formal de las cotizaciones.
- II) **Precio:** Se utiliza en el cálculo de la inversión inicial.
- III) **Dimensiones:** Dato que se usa al determinar la distribución de la planta.
- IV) **Capacidad:** Es un aspecto muy importante, ya que, en parte, de él depende el número de máquinas que se adquiera. Cuando ya se conocen las capacidades disponibles hay que hacer un balance de líneas para no comprar capacidad ociosa o provocar cuellos de botella, es decir, la cantidad y capacidad de equipo adquirido debe ser tal que el material fluya en forma continua.
- V) **Flexibilidad:** Esta característica se refiere a que algunos equipos son capaces de realizar operaciones y procesos unitarios en ciertos rangos y provocan en el material cambios físicos, químicos o mecánicos en distintos niveles.
- VI) **Mano de obra necesaria:** Es útil al calcular el costo de la mano de obra directa y el nivel de capacitación que se requiere.

- VII) **Costo de mantenimiento:** Se emplea para calcular el costo anual del mantenimiento. Este dato lo proporciona el fabricante como un porcentaje del costo de adquisición.
- VIII) **Consumo de energía eléctrica, otro tipo de energía o ambas:** Sirve para calcular este tipo de costos. Se indica en una placa que traen todos los equipos, para señalar su consumo en watts/hora.
- IX) **Infraestructura necesaria:** Se refiere a que algunos equipos requieren alguna infraestructura especial (por ejemplo, alta tensión eléctrica), y es necesario conocer esto, tanto para preverlo, como porque incrementa la inversión inicial.
- X) **Equipos auxiliares:** Hay máquinas que requieren aire a presión, agua fría o caliente, y proporcionar estos equipos adicionales es algo que queda fuera del precio principal. Esto aumenta la inversión y los requerimientos de espacio.
- XI) **Costo de los fletes y de seguros:** Debe verificarse si se incluyen en el precio original o si debe pagarse por separado y a cuánto ascienden.
- XII) **Costo de instalación y puesta en marcha:** Se verifica si se incluye en el precio original y a cuánto asciende.
- XIII) **Existencia de refacciones en el país:** Hay equipos, sobre todo los de tecnología avanzada, cuyas refacciones sólo pueden obtenerse importándolas. Si hay problemas para obtener divisas o para importar, el equipo puede permanecer parado y hay que prevenir esta situación.

1.4. Las economías de la escala de producción

En este epígrafe se abordará lo referente a las economías de escala. Por qué tienen su origen en la microeconomía y cómo se le asocia al expansionismo. Sin embargo, se validará la hipótesis de que en el mundo actual la construcción de plantas de mediano y pequeño tamaño es económicamente factible y funcionará bajo el concepto de economía de escala debido a que la producción del cemento LC³ irá en aumento.

1.4.1. Economías de escala y microeconomía. Conceptos

El concepto de economía de escala tiene su origen en la microeconomía. La microeconomía se ocupa de la conducta de unidades económicas individuales. Estas unidades son los consumidores, los trabajadores, los inversores, los propietarios de tierra, las empresas: en realidad, cualquier individuo o entidad que desempeñe algún

papel en el funcionamiento de nuestra economía. La microeconomía explica cómo y por qué estas unidades toman decisiones económicas.

Otra cuestión importante es el modo en que se interrelacionan las unidades económicas y forman unidades mayores, es decir, mercados e industrias. Estudiando la conducta y la interrelación de las empresas y los consumidores, la microeconomía revela cómo funcionan y evolucionan las industrias y los mercados, por qué se diferencian unos de otros y cómo les afecta la política de los gobiernos y la situación económica general. Una gran parte de la microeconomía se ocupa de los “límites”, de la mejor manera de aprovecharlos. Más concretamente se ocupa de la “asignación de los recursos escasos” (Pindyck and Rubinfeld 1994).

En la microeconomía se determina la existencia de tres tipos de costos: los fijos, que a cualquier nivel de producción representan el mismo gasto (como el alquiler de un depósito); los variables, que a cualquier nivel de producción representan diferente gasto (como las materias primas para la fabricación de un producto), y los semifijos, que se comportan escalonadamente (como las máquinas, que, al incorporar una nueva, la producción aumenta, pero no linealmente; no es fija ni variable). Si se suman los costos se encuentra el costo total, y si a este valor se lo divide por el nivel de producción, se obtiene el costo medio (Varian et al. 2001).

La cuestión es que en la medida que el costo fijo permanece estático y el variable crece proporcionalmente a la cantidad, tiene sentido que el costo medio (el costo por unidad) se vuelva cada vez más chico al aumentar la producción. Si una planta de tornillos, por ejemplo, produjera un solo tornillo, esa unidad debería absorber el costo de la materia prima efectivamente gastada en él, pero también el de todas las máquinas, el del alquiler de la planta y el de los empleados necesarios para producirla (lo cual haría que ese tornillo resultara exorbitantemente caro). Si crece el nivel de producción, todos esos costos se reparten y baja el de cada unidad (Martínez and Vidal 2003).

El término economía de escala se aplica cuando se duplica la producción por un coste de menos del doble. Este incluye los rendimientos crecientes de escala como un caso especial, pero es más general, ya que refleja las proporciones de factores que varían cuando la empresa altera su nivel de producción (Pindyck and Rubinfeld 1994). En el caso específico de este proyecto se puede aplicar el concepto de economía de escala pues la producción de cemento funciona como una empresa nacional y la construcción

de varias plantas de mediano tamaño aumentan considerablemente la producción disminuyendo el costo por consumo de combustibles mediante la transportación de las materias primas y del producto final.

Una clasificación entre las economías de escala se hace de acuerdo con su origen: el peso relativo de los costos variables no es el único motivo por el que disminuyen los costos a medida que aumenta el nivel de producción. Las bonificaciones recibidas por la compra de grandes cantidades de materias primas, la especialización en los trabajadores y en las máquinas, la optimización en las técnicas de producción y el aprendizaje y la experiencia que el personal gana logran reducir los costos unitarios a la larga (Martínez and Vidal 2003).

- Las economías de escala internas son las que se vinculan hacia dentro de la empresa; la motivación de esta a expandirse podrá ser la sola ampliación del capital o alguna técnica nueva por experimentar.
- Las economías de escala externas, por el contrario, son las que abarcan a toda una industria, como pudo haber significado la expansión de Internet para todo el rubro de las telecomunicaciones.

En muchos casos se asocia esta idea de economía de escala con la ley de los rendimientos marginales decrecientes. Este es también un principio que muestra cómo se comporta la producción de una empresa, y afirma que de dejar constantes todos los factores de producción menos uno y agregar una unidad más de aquel, la producción aumentará. Si se repite el proceso aumentará, pero menos que la vez anterior, y así sucesivamente hasta que llegaría un punto en el que ni siquiera aumentaría. En el caso de las economías cerradas hablamos de la expansión simultánea y estructural de todos los factores de producción variables y los necesarios fijos, de modo tal que con ello se consiga un aumento en la cantidad producida (Pindyck and Rubinfeld 1994).

Solo en ciertos casos sucede que la economía de escala no se cumple, a esos se los llama diseconomía de escala. Eso podría ocurrir si, por ejemplo, una empresa quisiera duplicar su producción, pero para ello necesitará más que duplicar sus costos (tal vez por la adquisición de un nuevo local, o de una maquinaria circunstancialmente muy cara). Y desde ya, hay que considerar que el beneficio de la organización siempre está sujeto a que los productos encuentren un mercado (Martínez and Vidal 2003).

1.4.2. Relación entre el tamaño de la empresa y la economía de escala.

Asumiendo que la variable principal para establecer un criterio diferenciador del tamaño de empresa no es la cuota de mercado, sino la función de costo medio a largo plazo, asociada con diferente productividad y capacidad competitiva de cada empresa (Palacio 2002), se pueden clasificar dos tipos de empresas en competencia perfecta: aquellas grandes empresas que pueden posicionarse en el óptimo de producción industrial con ventajas naturales en costos por producir en escalas mayores, y las empresas pequeñas que producen con menores escalas y se encuentran en puntos subóptimos respecto a la industria. En un mercado competitivo, el precio se determina por interacciones entre oferta y demanda del bien producido.

A largo plazo, las empresas tratan de optimizar sus escalas de producción en el punto donde el costo medio es mínimo, pues la entrada de competidores en busca de rendimientos positivos hará que el precio baje hasta anularlos. Por lo tanto, en el largo plazo el mercado estará en equilibrio cuando el precio sea igual al costo medio, y éste, a su vez, sea igual al costo marginal (Mansfield 1962). En este nivel, todo incentivo para que nuevas empresas entren al mercado se anula, y las empresas existentes operan al costo medio mínimo de la industria.

La implicación del modelo de competencia perfecta es que en el largo plazo las empresas más pequeñas que operan en puntos subóptimos tenderán a desaparecer del mercado, ya que sus escalas de producción no les permiten operar al costo medio mínimo industrial (Palacio 2002). Contrario a ello, la evidencia empírica muestra que, en vez de desaparecer del mercado, este sector empresarial ha ido cobrando cada vez mayor importancia en la estructura industrial y social debido a diversos factores. Entre ellos destacan la gran cantidad de estas empresas, su contribución al empleo y su flexibilidad o capacidad para innovar.

Sin importar a qué se le atribuya su importancia, la cual varía de un país a otro, las microempresas siguen operando y contribuyendo a la economía en diversas formas, lo que ha motivado a reconsiderar el papel que desempeñan en el mercado (Perry et al. 2008). Una característica de este estrato empresarial es que se concentra en el mercado informal, lo cual limita su crecimiento y desarrollo (Perry et al. 2008). Una explicación sobre la permanencia puede derivarse de la teoría de los nichos estratégicos, que

argumenta que las pequeñas empresas no compiten de manera directa con las grandes debido a que se concentran en pequeños nichos de mercado.

El concepto de complementariedad dinámica plantea que las pequeñas empresas tienen mayores posibilidades de flexibilidad y cercanía con el cliente, lo que les permite evadir la competencia directa con empresas de mayor tamaño. Por el tipo de mercados deprimidos y zonas carentes de infraestructura en que tienden a concentrarse, se generan barreras de localización más que tecnológicas. De hecho, la ubicación que les permite diferenciar sus productos y los nichos de mercado tan peculiares en los que operan, donde la mayoría de sus clientes son de bajos ingresos, desincentiva la entrada de empresas de mayor tamaño. Por ello, la permanencia de estas microempresas, basadas en este particular poder de mercado, depende de que las barreras de localización no desaparezcan.

Otra explicación es su capacidad para generar economías de escala que les permitan desplazar sus curvas de costo medio a puntos más competitivos. Han sostenido que muchas empresas pequeñas que entran a los mercados en países en desarrollo poseen personal altamente calificado y producen bienes con altos contenidos de conocimientos tecnológicos cuyo motor es la innovación, y que es precisamente una tasa de innovación mayor en las pequeñas empresas con relación a las grandes la que les permite coexistir en un mismo mercado. Asumir que las microempresas tienen capacidad para generar economías de escala implica que sus funciones de producción y costos deben exhibir rendimientos crecientes, y que son los aprendizajes y capacidades empresariales los que les permiten reducir sus costos respecto a la producción acumulada. Estudios empíricos sugieren que las empresas más pequeñas tienen una más alta y variable tasa de crecimiento.

La literatura ha enfatizado que las grandes empresas disfrutan una ventaja relativa sobre las más pequeñas. La explicación se basa en distintas hipótesis que van desde el poder de mercado hasta la ventaja de las economías de escala que disfrutan. Sin embargo (Williamson 1967), argumenta que si bien es cierto que las economías de escala y otros factores relacionados pueden causar que el crecimiento del tamaño de una empresa no esté limitado, sí puede estarlo ante la presencia de rendimientos decrecientes provenientes de la ineficiencia administrativa. La visión tradicional de organización industrial plantea que costos de producción elevados se asocian con escalas de producción pequeñas que no aprovechan las ventajas derivadas del volumen de

producción. Sin embargo, trabajos empíricos sugieren que el tamaño de gran empresa no es una condición necesaria para la producción eficiente, pues finalmente la eficiencia en la administración y el aprendizaje que se logra en la producción (*learning by doing*) también son factores clave en la determinación del crecimiento de las empresas. Una manera de medir la capacidad de generar economías de escala es estimar los rendimientos a través de la función de producción (Williamson 1967). Esta medida condiciona la producción dentro del área de rendimientos crecientes, y requiere comparar la posición relativa de la curva de costos medios de las diferentes estructuras de producción entre empresas.

A menudo se dice que las empresas grandes son eficientes porque operan bajo rendimientos crecientes y pueden alcanzar economías de escala en amplios segmentos de su función de producción, lo cual les permite aproximarse a los costos medios mínimos de la industria. Sin embargo, esta posibilidad no es exclusiva de la gran escala, pues existen otras fuentes que les permiten tener rendimientos crecientes. La literatura ilustra cómo los rendimientos crecientes surgen de la especialización del capital y del trabajo, obtenidos en virtud del tamaño de la empresa y de la producción en masa de un producto estandarizado. También pueden provenir de economías de aglomeración que surgen de la concentración de empresas y organizaciones de apoyo en espacios geográficos que tienden a reducir los costos de transacción (Klaesson 2001). El hecho de que las microempresas empiecen a ser relevantes en algunos espacios regionales y sectoriales de las economías nacionales es indicador de que los rendimientos crecientes se pueden obtener a través de los aprendizajes empresariales y de la acumulación de capital humano, y permitir una mejor asignación de recursos hacia el interior de la empresa, aun en condiciones informales (Perry et al. 2008).

Según (Schumacher 1973) la economía del gigantismo y la automatización es un remanente de las condiciones y pensamiento del siglo XIX, totalmente incapaz de resolver los problemas de hoy. Advierte que el hombre-productor y el hombre-consumidor es el mismo hombre y que en su afán de lograr una mayor calidad de vida obviará la eficiencia económica causando un efecto devastador sobre la naturaleza.

La generación de una tecnología intermedia donde interviene una lógica de producción por las masas en lugar de una producción masiva, crea una tecnología con acceso para todos (Schumacher 1973) que es muy útil para los países en vías de desarrollo.

1.5. Bases analítico-metodológicas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como herramienta de evaluación ambiental

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es la investigación y evaluación de los impactos medioambientales de un producto, proceso o servicio. El ACV evalúa todas las etapas de la vida de un producto y considera que cada etapa esta interrelacionada, lo que significa que una operación conduce a la otra. Las variables de entrada para realizar un ACV pueden ser las materias primas y la energía. Las etapas del ciclo de vida pueden incluir la adquisición de las materias primas, elaboración, uso u operaciones y finalmente reciclaje y tratamiento de los desperdicios. Las salidas pueden ser impactos muchos de los cuáles deterioran el medioambiente: emisiones a la atmósfera, desechos marinos, desechos sólidos, coproductos y otras emisiones (Figura 1.2) (Lemay 2011).

El Análisis de Ciclo de Vida ayuda a:

- Identificar oportunidades para mejorar el rendimiento medioambiental de los productos en varios puntos de su ciclo de vida.
- En industrias, organizaciones gubernamentales y no gubernamentales permite la toma de decisiones para realizar planificaciones estratégicas, determinar posiciones o escenarios prioritarios, y diseñar o rediseñar un producto o proceso.
- Ayuda a la selección de indicadores relevantes del rendimiento medioambiental, incluyendo las técnicas para su medición.
- Permite desarrollar estrategias de mercadotecnia para realizar demandas medioambientales o presentar la declaración medioambiental de un producto.



Figura 1.2: Etapas del ciclo de vida, entradas y salidas para el Análisis de Ciclo de Vida.

Fuente: (Lemay 2011)

1.5.1. Ventajas y limitaciones del Análisis de Ciclo de Vida

No importa cuán minucioso y exhaustivo sea el estudio de ACV siempre tendrá ventajas y limitaciones como todo proceso.

Algunas de las ventajas que brinda el ACV son (ISO. Technical Committee ISO/TC 207 2006):

- El ACV evalúa, de manera sistemática, los aspectos e impactos medioambientales de un producto, desde la extracción de las materias primas hasta la deposición final, de acuerdo con el objetivo y el alcance establecido.
- La naturaleza relativa del ACV es debido a que su metodología funciona como una unidad funcional, es decir que no se analizan las etapas por separado, sino que dependen unas de otras.
- Según lo intencionado del estudio se realizan previsiones para proteger los intereses de los propietarios y su confidencialidad.
- La metodología del ACV está abierta a la inclusión de nuevos descubrimientos científicos.
- No existe un único método para llevar a cabo un ACV, las organizaciones tienen la oportunidad de implementar el estudio según lo normado de acuerdo con los requerimientos de la organización.

Por otro lado, una de las principales limitaciones del estudio del ACV desde su creación es que no cubre aspectos geográficos o temporales. Además, está basado normalmente en un proceso lineal y no toma en cuenta las condiciones del contexto o los antecedentes. Otra limitación es que no toma en cuenta ningún aspecto social. Desde que una gran cantidad de información es necesaria para llevar a cabo un ACV, la carencia de datos puede restringir la calidad de los resultados y por consiguiente las conclusiones. Por otra parte, el conocimiento y el consenso sobre las categorías de los impactos se encuentran en varios niveles de desarrollo (Boulenger 2011).

La solución óptima es la combinación de diferentes herramientas para cubrir los diferentes aspectos medioambientales y reducir estas limitaciones.

1.5.2. Etapas fundamentales que componen la metodología para el Análisis de Ciclo de Vida

La serie de normas ISO 14040-14044 constituyen el marco procedimental para la correcta instrumentación del ACV. Entre estos documentos, las normas principales para el ACV son: ISO 14040: Principios y Marco y la ISO 14044: Requisitos y Directrices. El ACV propuesto en la ISO 14040:1997, está compuesto por cuatro etapas o elementos básicos: definición de objetivos y alcance, análisis del inventario, evaluación de impacto e interpretación. Estas fases no son simplemente secuenciales sino una técnica iterativa que permite ir incrementando el nivel de detalle en sucesivas iteraciones, sobre todo asociado a las limitaciones que el investigador va confrontando con relación a la adquisición de datos de entrada al análisis. De ahí que muchas veces sea necesario reconsiderar la unidad funcional con la que se está operando. Seguidamente se explica el contenido esencial de cada etapa.

1. Definición de objetivos y alcance de estudio

Este constituye el primer paso para la realización del ACV, por lo cual es esencial. Es importante tener un propósito específico para que las más relevantes metodologías y bases de datos sean elegidas. Entre las importantes decisiones que se deben realizar mientras dure esta etapa están la definición exacta de los productos y los procesos que serán investigados. Los siguientes pasos deben ser seguidos (Boulenger 2011):

- “Definición del propósito del ACV”: definición de la unidad funcional.
- “Definición del alcance del estudio”: organigrama de los productos/sistemas estudiados, estimación de las variables de entrada y de salida, definición de los límites del sistema, consideración del período del ciclo de vida. Esta fase define qué actividades e impactos están incluidos o excluidos y por qué.
- “Definición de la cantidad de datos requeridos”: especificaciones en lo referente a los datos, recolección de datos, datos de incertidumbre.

Para realizar un riguroso ACV los profesionales deben diseñar la fase de evaluación del impacto antes de realizar el inventario de los datos recolectados, pues él dictará las categorías y los elementos que serán necesarios, y permitirá a los profesionales recolectar los datos apropiados y de mayor relevancia.

Esta etapa debe ser resultado de las discusiones llevadas a cabo entre los proyectistas, inversionistas y profesionales (Cardim de Carvalho Filho 2001).

2. Desarrollo del inventario del ciclo de vida (ICV)

Esta fase comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los efectos ambientales adversos asociados a la unidad funcional. De una forma genérica estos efectos ambientales se denominan "carga ambiental". Esta se define como la salida o entrada de materia o energía de un sistema causando un efecto ambiental negativo, con esta definición se incluyen tanto las emisiones de gases contaminantes, como los efluentes de aguas, residuos sólidos, consumo de recursos naturales, ruidos, radiaciones, olores, etc. (Machado Rivero 2016).

En la terminología propia del método ACV se distinguen dos tipos de datos:

- Los datos de primer plano, que son aquellos derivados directamente del producto y procesos analizados, los cuales dependen directamente de las cantidades de materias primas utilizadas, combustible, energía eléctrica. Son datos inherentes al sistema objeto de estudio, por lo cual les imprimen gran particularidad a los datos del ICV (Machado Rivero 2016).
- Datos de referencia, que son datos tomados directamente de bases de datos publicadas por instituciones reconocidas con prestigio en el análisis medioambiental de productos y procesos, así como de la literatura científica publicada. La característica esencial de este tipo de dato es su carácter genérico, lo cual permite su ulterior utilización por investigadores en trabajos futuros relacionados con evaluación de impactos ambientales. Por ejemplo, casi todo proceso productivo requiere combustible, pero el efecto ambiental derivado de la prospección petrolera en plataforma, es información generalmente desconocida por los usuarios del combustible en otras partes de la cadena productiva. Sin embargo, dicho impacto debe ser modelado en el estudio, toda vez que se utilice combustible en el proceso productivo (Machado Rivero 2016).

Esta también debe contar con el diagrama de flujo sobre el proceso, tomando como base el sistema de producción de la unidad funcional, agregando inmediatamente, los procesos adyacentes correspondientes, entre los que se encuentran: los procesos auxiliares, el transporte y el suministro de energía.

3. Evaluación del impacto

La evaluación del impacto del ciclo de vida se define como la fase destinada a comprender y evaluar la magnitud e importancia de los impactos usando los resultados del inventario del ciclo de vida. En general, este proceso involucra el inventario de datos con categorías de impacto ambiental específicas y sus indicadores, de ese modo se pueden comprender esos impactos (ISO. Technical Committee ISO/TC 207 2006).

La evaluación del impacto incluye el proceso iterativo de revisión de los objetivos y el alcance del estudio para determinar si estos objetivos siguen siendo válidos o deben cambiarse si la evaluación indica que ellos no pueden ser mantenidos (Boulenger 2011).

Existen elementos que son considerados obligatorios para la evaluación del impacto:

- Clasificación: Es un paso cualitativo mediante el cual las entradas y salidas se asignan a diferentes categorías de impacto basadas en el tipo de impacto esperado sobre el ambiente, es decir se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado. Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos (Machado Rivero 2016).
- Caracterización: Es un paso cuantitativo en el que se evalúa la contribución relativa de cada entrada y salida en su categoría de impacto asignado y se totalizan las contribuciones dentro de cada categoría. Consiste en la modelización, mediante los factores de caracterización de los datos de inventario para cada una de dichas categorías de impacto (Machado Rivero 2016).

También existen una serie de elementos opcionales que pueden ser utilizados dependiendo del objetivo y alcance del estudio de ACV:

- Normalización: Se entiende por normalización la relación de la magnitud cuantificada para una categoría de impacto respecto a un valor de referencia ya sea a escala geográfica y/o temporal. Muestra en qué medida un indicador de resultado categoría de impacto tiene un relativamente alto o bajo en comparación con una referencia.
- Agrupación: clasificación y posible catalogación de los indicadores.

- Ponderación: Consiste en establecer unos factores que otorgan una importancia relativa a las distintas categorías de impacto para después sumarlas y obtener un resultado ponderado en forma de un único índice ambiental global del sistema. Es la medida más polémica y más difícil en la evaluación del impacto del ciclo de vida, solo se utiliza para la toma de decisiones internas.
- Análisis de calidad de datos: ayudará a entender la fiabilidad de los resultados del AICV. Se considerará obligatorio en análisis comparativos.

Esto significa que, de acuerdo con ISO, cada ACV al menos debe incluir la clasificación y caracterización. Si estos pasos no están incluidos, uno sólo puede referirse al estudio como un inventario del ciclo de vida (ICV).

En esta fase se seleccionan las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de estimación. Esta elección depende en gran medida de la audiencia dirigida. Las categorías de impacto son los efectos sobre el medio ambiente que causan los aspectos medioambientales del sistema producto en estudio. Estos efectos serán seleccionados y definidos teniendo en cuenta el potencial impacto que pueda generar el sistema o producto en estudio, de hecho, estos son los objetivos y el alcance del ACV. Estas categorías se agrupan según parámetros asociados a los flujos de entradas y salidas del sistema (Machado Rivero 2016).

Se han desarrollado numerosos métodos de evaluación de impacto estándar, entre los que pueden destacarse (Machado Rivero 2016):

- Ecoindicador 95: Es un método basado en la “distancia al objetivo”, esto no establece objetivos claros para definir niveles objetivos sostenibles. De ahí surge la necesidad de crear el Ecoindicador 99 para superar las deficiencias de este método.
- Ecopoints 97: Fue creado por Swiss Ministry of the Environment (BUWAL) en 1990, contempla seis categorías de impacto: emisiones al aire, vertidos en aguas superficiales, en subterráneas, vertidos al suelo, uso de recursos y residuos. Se basa en la “distancia al objetivo”. Evalúa el impacto final y no dispone de paso de clasificación, sino que evalúa los impactos de manera individual.
- Ecoindicador 99: Fue creado por Pré Consultants. Define el término medioambiente, según tres tipos de daños: a la salud humana, al ecosistema y a los recursos, y consta de once categorías de impactos: carcinógenos, respiración

de orgánicos, respiración de inorgánicos, cambio climático, radiación, capa de ozono, ecotoxicidad, acidificación/eutrofización, uso del suelo, minerales y combustibles fósiles; y las categorías de daños son: salud humana, calidad del ecosistema y recursos. La ventaja del método es su facilidad de interpretación.

- EDIP/UMIP 96: Fue creado por Environmental Design of Industrial Products. Comenzó a desarrollarse en Dinamarca en el año 1996. Define diez categorías de impacto: cambio climático, acidificación, residuos, uso de recursos, entre otros.
- EPS 2000: Está enfocada en cuantificar el daño causado, evaluando la restauración de dicho daño desde un punto de vista económico. Incluye la caracterización y agregación, y considera cinco categorías de impacto: salud humana, capacidad de producción del ecosistema, recursos abióticos, biodiversidad y valores culturales, incluye el ruido como una categoría de impacto.
- Impact 2002+: Creado por el Instituto Politécnico Federal de Lausana, Suiza. Resulta de una combinación entre las tecnologías IMPACT 2002, Ecoindicador 99, CML 2001 e IPCC. Contiene catorce categorías de impacto: toxicidad humana, efectos respiratorios, destrucción de la capa de ozono, ecotoxicidad, acidificación del suelo y acuática, cambio climático, entre otras.
- CML 2001: Creado por Center of Environmental Science. En este se propone una lista de categorías de impacto clasificados en tres grupos según su obligatoriedad o no de incluirlas en los ACV: categorías de impactos obligatorias, categorías de impacto adicionales y otras categorías. Define 9 categorías de impacto: agotamiento de recursos abióticos, cambio climático, destrucción de la capa de ozono, toxicidad humana, acidificación, eutrofización, uso de recursos, entre otras. No incluye explícitamente el ruido, uso de la tierra, y partículas finas.
- IPCC: Creado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, la categoría de impacto que define es el cambio climático. Este método que comenzó en 1988 recoge los factores de caracterización para el potencial de calentamiento global directo debido a las emisiones al aire.
- TRACI: Creado por Environmental Protection Agency (EPAUS). Fue desarrollado en 1995, supone una herramienta informática para la evaluación de las doce categorías que constituye el método: destrucción de la capa de ozono, cambio climático, smog fotoquímico, acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, uso del suelo, entre otros.

- ReCiPe 2008: Creado por Pré Consultants. Se desarrolló para combinar las ventajas de los métodos CML 2001 y Eco indicador 99, la ventaja del método es su solidez científica, define 15 categorías de impacto ambiental, entre ellos la destrucción de la capa de ozono, toxicidad humana, radiación, formación de partículas, acidificación del suelo, eutrofización, entre otras. No incluye el ruido, y tiene una forma muy limitada de tratar con agua.

Estos son desarrollados por diferentes grupos de investigación en todo el mundo y no hay consenso todavía sobre cuál es el "mejor método" en realidad. Como resultado la mayoría de los profesionales de ACV parecen elegir un método sobre la base de la reputación, o peor aún, el método por defecto en el software que utilizan.

Existen multitud de categorías de impacto ambiental, y la selección de unas u otras en el ACV que se esté llevando a cabo dependerá del objetivo del estudio, público objetivo y nivel de exactitud de los resultados requeridos. Entre las categorías de impacto que más se utilizan en estos métodos se encuentran (Boulenger 2011):

- Agotamiento de recursos abióticos: Disminución de la disponibilidad de recursos naturales, se incluye recursos abióticos y energía.
- Calentamiento Global: Fenómeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos. Su factor de caracterización es Potencial de Calentamiento Global (PCG).
- Consumo de recursos energéticos: Energía consumida en la obtención de materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida del elemento analizado. Su factor de caracterización es: Cantidad Consumida.
- Reducción de la capa de ozono: Efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones ultravioletas solares de la capa de ozono atmosférica. Su factor de caracterización es: Potencial de Agotamiento de la Capa de ozono (PAO).
- Eutrofización: Crecimiento excesivo de la población de algas originado por el enriquecimiento artificial de las aguas de ríos y embalses como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes que provoca un alto consumo de oxígeno del agua. Su factor de caracterización es: Potencial de Eutrofización (PE).
- Acidificación: Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra en forma de ácidos, de los

óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera. Su factor de caracterización es: Potencial de Acidificación (PA).

- Consumo de materias primas: Consumo de materiales extraídos de la naturaleza. Su factor de caracterización es: Cantidad Consumida.
- Formación de Oxidantes Fotoquímicos: Formación de precursores que dan lugar a la contaminación fotoquímica. La luz solar incide sobre dichos precursores, provocando la formación de una serie de compuestos conocidos como oxidantes fotoquímicos. Su factor de caracterización es: Potencial de Formación de oxidantes fotoquímicos (PFOF).

Las categorías de daños más usadas en estos métodos son (Machado Rivero 2016):

- A la salud humana: En esta categoría se incluye el número y la duración de las enfermedades, y los años de vidas perdidos debido a la muerte prematura por causas ambientales. Los efectos aquí incluidos son: cambio climático, disminución de la capa de ozono, efectos cancerígenos y respiratorios y radiación ionizante.
- A la calidad del medio ambiente: En esta categoría se incluye el efecto sobre la diversidad de especies, especialmente en las plantas vasculares y los organismos sencillos. Entre los efectos incluidos están: la eco toxicidad, la acidificación, la eutrofización y el uso del suelo.
- A los recursos: En esta categoría se incluye la necesidad extra de energía requerida en el futuro para extraer mineral de baja calidad y recursos fósiles. La disminución de los recursos brutos, como arena y gravilla se incluyen dentro del uso del suelo.

4. Interpretación de los resultados

La etapa de interpretación va desde el análisis del inventario hasta la evaluación del impacto y los relaciona a ambos. Se recomienda seguir los siguientes pasos (Boulenger 2011):

- Identificación de los resultados más importantes.
- Evaluación de los resultados a partir de la realización de un análisis de sensibilidad e incertidumbre.
- Elaboración de las conclusiones, recomendaciones y el reporte final.

Esta etapa es la oportunidad para que los profesionales que desarrollaron el ACV tengan una reflexión en cuánto a los resultados y las decisiones que pudieron haber tomado

durante el proceso, y chequear nuevamente la definición de los objetivos y el alcance. El principal objetivo de esta etapa es verificar o no si los resultados responden a las preguntas elaboradas en la etapa de definición de objetivos y alcance del estudio (ISO. Technical Committee ISO/TC 207 2006).

Esta etapa permite determinar en qué fase del ciclo de vida del producto se generan las principales cargas ambientales y por tanto qué puntos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse. En los casos de comparación de distintos productos se podrá determinar cuál presenta un mejor comportamiento ambiental (Boulenger 2011).

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

1. El desarrollo del LC³, así como la potencial introducción en el mercado de este producto deviene para Cuba y el mundo la posibilidad de generar un material de alta demanda en la economía a un precio presumiblemente más bajo y con una contribución ecológica de ancho margen con respecto al uso de cementos tradicionales.
2. La adecuada realización del estudio técnico del proyecto conlleva a la optimización del mismo ambiental, económica y técnicamente.
3. Las empresas de mediano y pequeño tamaño administradas a nivel nacional pueden funcionar bajo el concepto de economía de escala si se toma en cuenta que la producción es mayor y la ubicación en sitios estratégicos reduce los gastos por transporte.
4. El uso del Análisis de Ciclo de Vida como herramienta de evaluación ambiental posibilita la obtención de resultados confiables durante la evaluación de cualquier proceso o proyecto.

CAPÍTULO II: DIMENSIONAMIENTO DE HORNOS Y MOLINO DE PLANTAS PROTOTIPO PARA LA PRODUCCIÓN DE LC³, ASÍ COMO LA METODOLOGÍA PARA SU EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL.

En el presente capítulo se realizará el diseño de los principales equipos que componen una planta de cemento, prestando especial atención a los relacionados con la calcinación de la arcilla y la producción del clínquer, es decir los hornos; y a los equipos de molienda que proporcionan el producto final: el cemento.

Posteriormente se expondrá el cuerpo metodológico empleado para la evaluación ambiental y económica de la planta. Los resultados obtenidos se presentarán en el tercer capítulo.

2.1. El proceso de producción del cemento

Existen cuatro procesos fundamentales para la fabricación del cemento: seco, semiseco, semihúmedo y húmedo. En este epígrafe se describirá como ocurre el proceso seco, que es el más económico y utilizado a nivel mundial. La química básica del proceso de fabricación del cemento empieza con la descomposición del carbonato de calcio (CaCO_3) a unos 900 °C dando óxido de calcio (CaO) y liberando dióxido de carbono gaseoso (CO_2), este proceso se conoce como calcinación o descarbonatación. Posteriormente ocurre la clínquerización en el que el óxido de calcio reacciona a altas temperaturas con sílice, alúmina y óxido de hierro para formar los silicatos, aluminatos y ferritos que componen el clínquer. Anterior a esto ocurren varias etapas como la extracción de las materias primas y su dosificación. Por último, el clínquer se muele conjuntamente con yeso y otras adiciones para producir el cemento, estas adiciones varían en dependencia de las propiedades que el productor pretenda conseguir.

El proceso de producción del cemento Portland es complejo y requiere de un gran consumo de combustibles y energía, en las figuras 2.1 y 2.2 se explican de manera esquemática el proceso de producción del cemento.

En estas figuras se aprecia de manera general el proceso de producción del cemento y mediante cuántas vías se puede obtener el aglomerante. Para poder detallar más el proceso, este se puede dividir en cuatro etapas fundamentales:

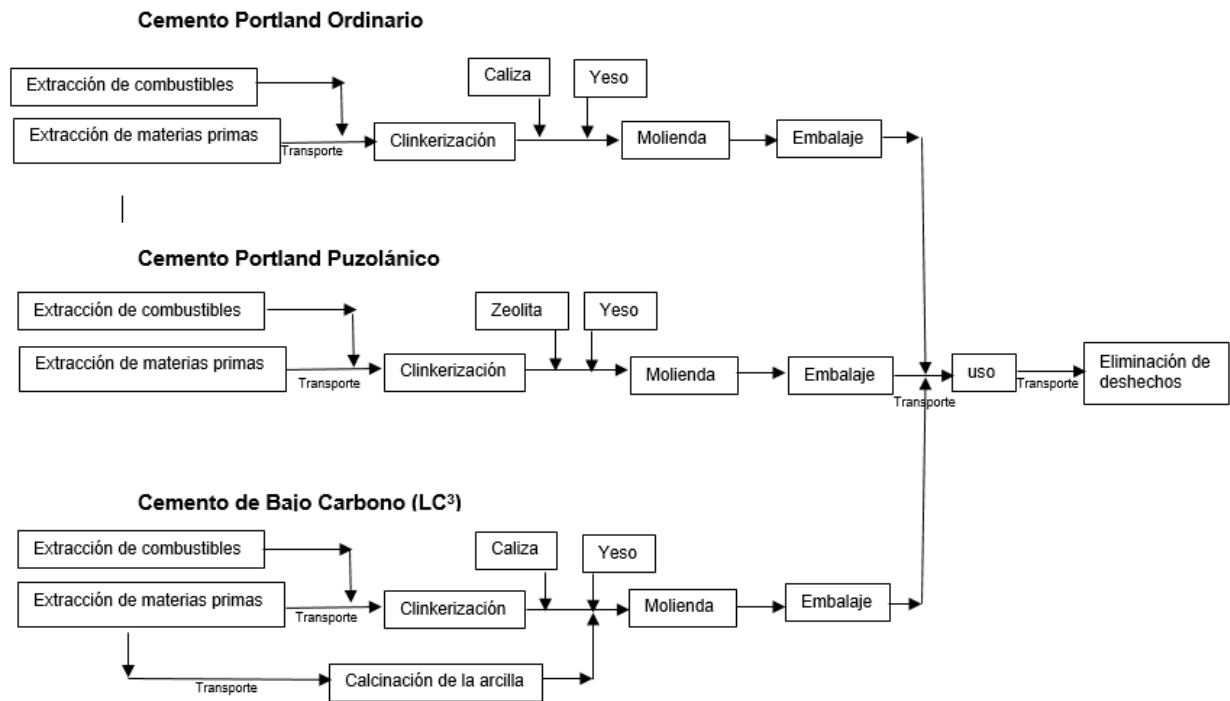


Figura 2.1: Diagrama de flujo del proceso de producción de cada uno de los cementos mostrados. Fuente: (Berriel et al. 2016).

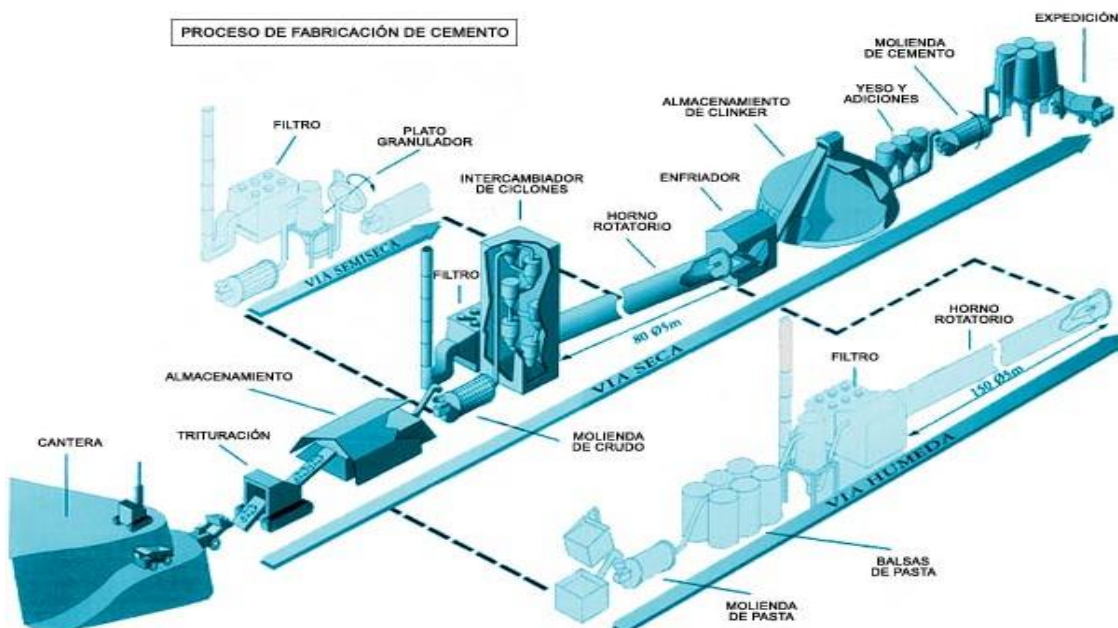


Figura 2.2: Esquema general del proceso de producción del cemento por las tres vías (seca, húmeda y semi-seca). Fuente: (Rouge and River 2013)

1. Extracción, preparación y molienda de las materias primas.

El proceso de fabricación del cemento se inicia con los estudios y evaluación minera de las materias primas (calizas y arcillas) necesarias para conseguir la composición deseada de óxidos metálicos para la producción de clínquer (Ambiental et al. 2003).

La obtención de la proporción adecuada de los distintos óxidos se realiza mediante la dosificación de los minerales de partida:

- Caliza y marga para el aporte de CaO .
- Arcilla y pizarra para el aporte del resto de los óxidos.

Estas materias primas esenciales deben encontrarse por lo general próximas a la planta. El material resultante de la extracción es transportado en camiones. Este es sometido a una primera trituración, bien en cantera o a su llegada a la fábrica de cemento donde se descarga para su almacenamiento.

La trituración de la roca, se realiza en dos etapas, inicialmente se procesa en una chancadora primaria, del tipo cono que puede reducirla de un tamaño máximo de 1,5 m hasta los 25 cm. El material se deposita en un parque de almacenamiento. Seguidamente, luego de verificar su composición química, pasa a la trituración secundaria, reduciéndose su tamaño a 2 mm aproximadamente (Ambiental et al. 2003).

El material triturado se lleva a la planta por cintas transportadoras, depositándose en un parque de materias primas o silos. A partir de aquí se efectúa el proceso de homogeneización (Ambiental et al. 2003).

2. Dosificación y homogeneizado de la mezcla cruda.

La composición química del clínquer se expresa mediante el contenido de óxidos, sin embargo, es conocido que la cal, sílice, alúmina, óxido férrico, etc., no se encuentran libres en el cemento, sino formando distintos compuestos. La calidad del clínquer define la mayoría de las propiedades del cemento obtenido, mientras que las adiciones introducidas solamente modifican dichas propiedades. La calidad del clínquer depende de su composición química y mineral, las cuales dependen a su vez de la minuciosidad con que se prepara la mezcla de materias primas, de las condiciones de la cocción, y hasta de las características del proceso de enfriamiento (Ambiental et al. 2003).

3. Clinquerización.

El proceso de cocción de las materias primas ocurre en el horno giratorio dentro del cual según la temperatura que se va alcanzando, así como con los procesos que van ocurriendo, se puede dividir en 6 partes o zonas.

Desecación (hasta los 200 °C):

Los hornos giratorios funcionan bajo el principio de la contracorriente, desde que las materias primas entran en él, se enfrentan con todos los gases calientes que salen, provocando de esta manera su desecación inicial (Betancourt 2014).

Calentamiento (200-700 °C):

Con el incremento de la temperatura, en las materias primas se queman las impurezas orgánicas y como hecho fundamental pierden el agua cristalina (400-500 °C) que presentan muchos minerales, en especial las arcillas. Se forma el anhídrido caolínico (Betancourt 2014).

Calcinación (700-1100 °C):

En esta etapa ocurren dos procesos importantes:

- a. Disociación de los carbonatos.

Los carbonatos presentes en las materias primas, tanto de calcio como de magnesio, sufren disociación en este intervalo de temperatura, formándose una gran cantidad de cal en estado libre (CaO). Esta disociación es un fenómeno de carácter endotérmico que transcurre con gran consumo de calor (1780 kJ/kg de CaCO_3) (Betancourt 2014).

- b. Descomposición de los minerales arcillosos.

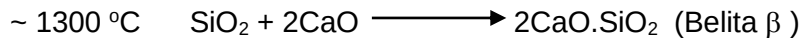
En esta misma sección del horno ocurre la descomposición de los minerales arcillosos ya deshidratados, en sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido férrico (Fe_2O_3) (Betancourt 2014).

Formación de aluminatos y ferritos (1100-1250 °C):

Una vez libres los óxidos fundamentales reaccionan entre sí, y en estado sólido forman el aluminato tricálcico (C_3A), el ferritoaluminato tricálcico (C_4AF) y belita (C_2S).

Clinkerización o sinterización (1300-1450-1300 °C):

Al incrementarse la temperatura hasta alrededor de 1450 °C, el aluminato tricálcico y el ferrito-aluminato tetracálcico se funden, formando el denominado “lecho fundido”, donde se disuelven el silicato dicálcico (belita) y la cal. En esas condiciones reaccionan dichos compuestos, formando el silicato tricálcico (alita), el principal de los minerales componentes del clínquer. El proceso ocurre casi hasta la total fijación del CaO, lo cual hace que el clínquer contenga normalmente menos de un uno por ciento de cal libre (Betancourt 2014).



Especial significado tiene la formación de la alita durante el proceso de sinterización, y es ello precisamente lo que distingue al proceso de formación del clínquer de cemento Portland de la formación de otros aglomerantes como la cal hidráulica, el cemento romano, etc.

Al enfriarse lentamente el clínquer, el C₃S se desdobra en C₂S y CaO, lo cual supone la pérdida de cualidades del cemento, una de las razones por las cuales se somete a un enfriamiento rápido. La disminución de la temperatura de 1450 a 1300 °C provoca la cristalización del aluminato tricálcico, del ferrito-aluminato tetracálcico y de la periclasa, entre otros, que se encuentran en la masa fundida (Betancourt 2014).

Enfriamiento:

Durante el enfriamiento ocurren dos etapas principales:

- a. Antes de salir del horno (1300-1000 °C).

Es aquí donde se forma por completo la estructura del clínquer, integrada por la alita y la belita como minerales fundamentales y el resto de los componentes como sustancia intermedia (Betancourt 2014).

- b. Luego de salir del horno (1000-200 °C).

Luego de la salida del horno, el material se enfría en dispositivos especiales diseñados al efecto (enfriadores). Posteriormente el clínquer se almacena en silos durante un tiempo de aproximadamente dos semanas (Betancourt 2014).

4. Molienda del clínquer (obtención del cemento).

Luego del enfriamiento del clínquer en los silos, se procede a la molienda (molturación) del mismo utilizando, por lo general, el molino de bolas. La molturación puede realizarse mediante el sistema de circuito abierto o de circuito cerrado. En el primero de ellos la

alimentación del clínquer se regula para lograr la finura deseada en el cemento. En un sistema de circuito cerrado las partículas gruesas de clínquer van siendo separadas del cemento ya fino, remoliéndose nuevamente en esa cámara (Betancourt 2014).

La molienda del clínquer se realiza de manera conjunta con una cierta proporción de yeso, el cual tiene la función de regular el tiempo de fraguado del cemento producido. La proporción de esta adición de yeso debe ser calculada minuciosamente para obtener resultados eficientes. El proceso de molturación consume elevadas cantidades de electricidad (Betancourt 2014).

Después de que ocurre el proceso de producción del cemento anteriormente descrito, este producto está listo para la comercialización y uso, ya sea a granel o en sacos.

2.2. Dimensionamiento de los hornos y molino para la producción de cemento LC³

Es de vital importancia tener en cuenta, que para llevar a la realidad esta planta de cemento, se deben escoger con cuidado los materiales con que se va a construir el edificio, la mano de obra que usará los equipos disponibles, el movimiento continuo del producto dentro de la fábrica para que se trabaje con la mayor eficiencia posible. Pero sin lugar a dudas lo más importante es la determinación adecuada de la maquinaria destinada a la producción del cemento. Un diseño óptimo de los hornos rotatorios y los molinos de bolas (equipos principales) puede disminuir considerablemente el costo de montaje de la planta.

2.2.1. El horno rotatorio

El horno rotatorio fue introducido por primera vez en la industria del cemento a finales del siglo XIX por Frederik Ransome, y hoy en día la obtención del clínquer tiene lugar, casi exclusivamente, con este tipo de horno (Ssatarin and Kisselhoff 1969).

Con el paso del tiempo el horno rotatorio ha ido evolucionando. Los primeros largos hornos de vía húmeda que descansaban sobre 8 apoyos fueron sustituidos por los hornos de vía seca equipados con precalcinador que descansan sobre 3 apoyos. En la actualidad existen hornos rotatorios que reposan hasta en 2 apoyos reduciendo significativamente su longitud.

El horno rotatorio consiste en un tubo cilíndrico apoyado sobre estaciones de rodadura, que tiene una pendiente del orden del 3,5% con respecto a la horizontal y que gira a

velocidades de rotación comprendidas entre 1,8 y 3,5 revoluciones por minuto (rpm) (FLSmdith 2017).

Para el dimensionamiento del horno rotatorio, primeramente, se determina la pendiente para lo cual no hay ninguna regla válida. Su valor oscila entre el 2 - 6%. La mayoría de los hornos están instalados con pendientes entre el 2 - 4% con relación a la horizontal. Inicialmente, los hornos presentaban elevadas pendientes y reducida velocidad angular de unas 0.5 - 0.75 rpm. Las pendientes pequeñas requieren velocidades más altas. Esto ofrece la ventaja de favorecer la mezcla del material y origina un intercambio de calor más intenso. También, si la inclinación es pequeña se alcanza un grado de llenado más alto (FLSmdith 2017). Como fruto de la experiencia de explotación de hornos rotatorios se ha obtenido que las pendientes de los hornos que se indican a continuación corresponden a los grados de llenado logrados como óptimos (tabla 2.1) (Duda 1977).

Tabla 2.1: Relación entre la pendiente del horno y el grado de llenado. Fuente: (Duda 1977).

4,5	9
4	10
3,5	11
3	12
2,5	13

Para el presente diseño se establece una pendiente de 3.5% con un grado de llenado de 11% según la tabla 2.1. Además, las revoluciones por minuto (r.p.m.) del horno rotatorio estarán en el orden de las 2.5 r.p.m.

El cálculo del diámetro interior del horno se realiza a partir de la ley de transporte de material en el interior de un tubo rotatorio inclinado, que viene dada por la ecuación:

$$Q = 1,48 * n * Di^3 * \Phi * \rho a * tag(\beta) \text{ (Duda 1977)}$$

Donde:

Q: capacidad de transporte por hora (kg/h)

n: velocidad de rotación del horno (r.p.m.)

D_i : diámetro interior del horno (m)

Φ : grado de llenado del horno

ρ_a : densidad del material

β : movimiento del material resultante (grados °), definido por la ecuación:

$$\tan \beta = \frac{\text{sen } v}{\tan \theta}$$

v : inclinación del horno (grados °)

θ : ángulo de deslizamiento del material (grados °)

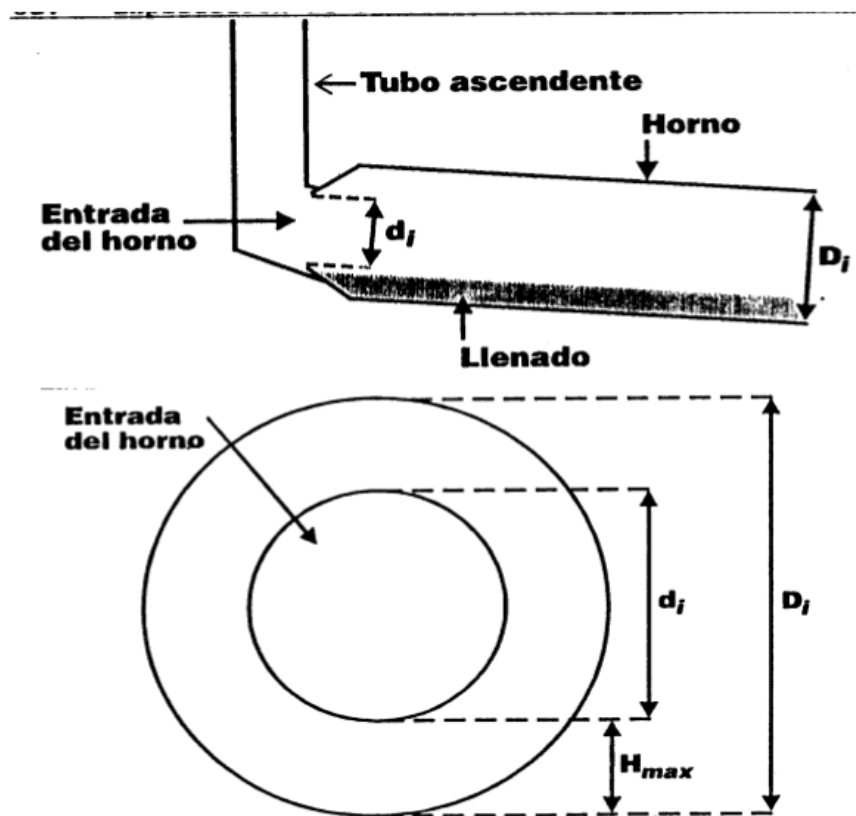


Figura 2.3: Explicación de símbolos sobre la entrada del horno. Fuente: (Duda 1977).

- Para la planta de 300 000 toneladas al año, producción de clínquer.

300 000 t/año equivalen a 20,9 t/hora en jornadas de trabajo de 24 horas.

$$20\,900 = 1,48 * 2,5 * D_i^3 * 11 * 1 * 2,751$$

$$\tan \beta = \frac{\sin 2}{\tan 40} = 2,751^\circ$$

$$Di = 5,8 \text{ m}$$

Los hornos de vía seca que reposan sobre 2 apoyos tienen una relación L/D de 10 a 13, en este caso se escoge un valor medio 12. Por tanto, el largo del horno para un diámetro de 5,8 m es de 69,6 m.

- **Para la planta de 50 000 toneladas al año, producción de clínquer.**

50 000 t/año equivalen a 3,2 t/hora en jornadas de trabajo de 24 horas.

$$3\,200 = 1,48 * 2,5 * Di^3 * 11 * 1 * 2,751$$

$$\tan \beta = \frac{\sin 2}{\tan 40} = 2,751^\circ$$

$$Di = 3,1 \text{ m}$$

Los hornos de vía seca que reposan sobre 2 apoyos tienen una relación L/D de 10 a 13, en este caso se escoge un valor medio 12. Por tanto, el largo del horno para un diámetro de 3,1 m es de 37,2 m.

- **Para la planta de 300 000 toneladas al año, producción de arcilla calcinada.**

300 000 t/año equivalen a 12,5 t/hora en jornadas de trabajo de 24 horas.

$$12\,500 = 1,48 * 2,5 * Di^3 * 11 * 1 * 2,751$$

$$\tan \beta = \frac{\sin 2}{\tan 40} = 2,751^\circ$$

$$Di = 4,8 \text{ m}$$

Los hornos de vía seca que reposan sobre 2 apoyos tienen una relación L/D de 10 a 13, en este caso se escoge un valor medio 12. Por tanto, el largo del horno para un diámetro de 4,8 m es de 57,6 m.

- **Para la planta de 50 000 toneladas al año, producción de arcilla calcinada.**

50 000 t/año equivalen a 2,1 t/hora en jornadas de trabajo de 24 horas.

$$2\,100 = 1,48 * 2,5 * Di^3 * 11 * 1 * 2,751$$

$$\operatorname{tag} \beta = \frac{\operatorname{sen} 2}{\operatorname{tag} 40} = 2,751^\circ$$

$$Di = 2,7 \text{ m}$$

Los hornos de vía seca que reposan sobre 2 apoyos tienen una relación L/D de 10 a 13, en este caso se escoge un valor medio 12. Por tanto, el largo del horno para un diámetro de 2,7 m es de 32,4 m.

2.2.2. Tiempo de permanencia del material en el horno

$$t = \frac{23 * L}{Di * n * v} \text{ (Duda 1977)}$$

Donde:

t: tiempo de permanencia (minutos).

L: longitud del horno rotatorio (m).

Di: diámetro interior del horno rotatorio (m).

n: velocidad de rotación del horno por minuto (r.p.m.).

v: porcentaje de inclinación del horno (%).

- **Para la planta de 300 000 toneladas al año, producción de clínquer.**

$$t = \frac{23 * 69,6}{5,8 * 2,5 * 3,5}$$

$$t = 31,6 \text{ minutos}$$

- **Para la planta de 50 000 toneladas al año, producción de clínquer.**

$$t = \frac{23 * 37,2}{3,1 * 2,5 * 3,5}$$

$$t = 31,6 \text{ minutos}$$

- **Para la planta de 300 000 toneladas al año, producción de arcilla calcinada.**

$$t = \frac{23 * 57,6}{4,8 * 2,5 * 3,5}$$

$$t = 31,5 \text{ minutos}$$

- Para la planta de 50 000 toneladas al año, producción de arcilla calcinada.

$$t = \frac{23 * 32,4}{2,7 * 2,5 * 3,5}$$

$$t = 31,5 \text{ minutos}$$

Tabla 2.2: Resumen de los resultados del diseño de los hornos rotatorios. Fuente: Elaboración propia.

	Planta de 300 000 tpa		Planta de 50 000 tpa	
	Diámetro	Largo	Diámetro	Largo
Producción de clínquer	5,8 m	69,6 m	3,1 m	37,2 m
Producción de arcilla calcinada	4,8 m	57,6 m	2,7 m	32, 4 m

2.2.3. El molino de bolas

Casi el 75 % del total de la energía invertida en la producción de cemento corresponde a la molienda. La molienda es una operación de reducción de tamaño de rocas y minerales de manera similar a la trituración. Los productos obtenidos por molienda son más pequeños y de forma más regular que los surgidos de trituración. Los molinos de bolas son cilindros de acero rotatorios en donde se realiza el desmenuzamiento del material por el movimiento de los cuerpos moledores. La molienda se realiza por choque y rozamiento entre los cuerpos moledores y las paredes blindadas del molino (Pérez Gálvez and Lima Quesada 1998).

Existe una serie de elementos importantes que influyen en la molienda de los materiales (FLSmdith 2017).

- Velocidad Crítica.
- Relaciones entre los elementos variables de los molinos.
- Tamaño máximo de los elementos moledores.
- Volumen de carga.
- Potencia.
- Tipos de Molienda: húmeda y seca.

El tipo de molienda empleada en el proceso de producción del cemento es del tipo seco. Para conseguir el dimensionamiento del molino de bolas hay que interrelacionar las cifras de la longitud y el diámetro con consideraciones y exigencias técnicas acerca de la molienda. De estas hay dos de carácter básico.

1. Si se mantiene constante la longitud del molino la ampliación del diámetro da lugar a: mayor rendimiento energético, menor espacio construido por unidad de capacidad, menor cantidad de partículas muy finas en el producto, mayor cantidad ocasional de granos gruesos en el producto (Duda 1977).
2. Si se mantiene constante el diámetro del molino y se alarga el tubo entonces se origina: menor cantidad ocasional de granos sobredimensionados, más granos muy finos en el producto molido, menor rendimiento energético, la posibilidad de dividir el molino en varias cámaras (Duda 1977).

Según estudios recientes se ha comprobado que con un molino de dos cámaras se cumple en gran medida los dos criterios anteriores. Para un molino de dos cámaras se establece una relación largo/diámetro (L/D) = 3 (Duda 1977). Como en una planta de cemento la productividad está dada por el horno es necesario que el molino cumpla con esta, por lo que se diseñará un molino que cumpla con la producción establecida de 300 000 y 50 000 toneladas al año.

Para el dimensionamiento de los molinos se trabajará con la fórmula del caudal de los molinos de bolas deducida por Towarow (Duda 1977):

$$Q = q * \frac{a*b*c}{1000} * 6,7 * V * \sqrt{D} * \sqrt{\frac{G}{V}} \text{ (Duda 1977)}$$

Donde:

Q: Caudal del molino en toneladas métricas por hora

q: caudal específico del molino, en kg de material de alimentación por kWh de consumo de energía, con un 10 % de residuo al tamiz de 4900 mallas/cm², ese caudal específico se acepta con 40 kg/kWh.

a: coeficiente de Molturabilidad (tabla 2.2).

b: factor de corrección para molienda fina (tabla 2.3).

c: factor de corrección por el tipo de molino (tabla 2.4).

V: volumen del recinto de molienda, en m³.

D: diámetro interior del recinto de molienda, en m.

G: peso de los cuerpos moledores.

Tabla 2.3: Coeficiente de molturabilidad. Fuente: (Duda 1977).

Material	Coeficiente a
Clínquer de horno rotatorio	1
Clínquer de horno vertical automático	1,15-1,25
Escorias de horno alto granuladas	0,55-1,10
Creta	3,7
Arcilla	3,00-3,50
Marga	1,4
Caliza	1,2
Arena silícea	0,6-0,7
Carbón	0,8-1,6

Tabla 2.4: Coeficiente de corrección b. Fuente: (Duda 1977).

% de residuo al tamiz de 4900 mallas/cm ²	Factor de corrección b
2	0,59
3	0,65
4	0,71
5	0,77
6	0,82
7	0,85
8	0,91
9	0,95
10	1
11	1,04
12	1,09

13	1,13
14	1,17
15	1,21
16	1,26
17	1,3
18	1,34
19	1,38
20	1,42

Tabla 2.5: Factor de corrección c. Fuente: (Duda 1977).

Circuito del molino	Tipo de molino	Factor de corrección c
Circuito abierto	Molino de varias cámaras (3-4 cámaras)	1
	Molino de dos cámaras	0,9
Circuito cerrado	Molino con separador de aire	1,3-1,5

- **Para la planta de 300 000 toneladas al año.**

La planta de 300 000 toneladas al año produce 1000 toneladas de LC³ diarias que serían 41,67 t/h. Para ello se asume un diámetro de 3 m con un largo de 9 m.

Cálculo del volumen del recinto de molienda:

$$V = \sum \frac{\pi * D^2}{4} * L \text{ cámara}$$

Como es un molino de dos cámaras, el diafragma separador de cámaras tiene un espesor de 0,5 m, por lo que la longitud útil de molienda es de 8,5 m. el tamaño del grano máximo es de 25 mm.

$$L \text{ cámara } 1 = 0,25 * 8,5 = 2,125 \text{ m}$$

$$L \text{ cámara } 2 = 0,5 * 8,5 = 4,25 \text{ m}$$

$$V = \frac{\pi * 3^2}{4} * 2,125 + \frac{\pi * 3^2}{4} * 4,25$$

$$V = 45,06 \text{ m}^3$$

Cálculo del peso de los cuerpos molidores:

$$G = gm * \psi * \frac{\pi * D^2 * L}{4}$$

Donde:

G: peso de los cuerpos moledores (t).

gm: peso específico aparente del montón (7,8-7,9 t/m³).

ψ: grado de llenado de las bolas en el apilamiento (25 %-45 %).

D: diámetro del molino (m).

L: largo del molino (m).

$$G = 7,9 * 0,35 * \frac{\pi * 3^2 * 9}{4}$$

$$G = 175,9 \text{ t}$$

Cálculo del coeficiente a:

El cemento LC³ tiene una composición de 50 % clínquer, 30 % metacaolín, 15 % caliza y 5 % yeso; para cada uno de estos materiales se busca su coeficiente de molturabilidad (tabla 2.2) y se multiplica por el porcentaje correspondiente. El yeso se desprecia por tener un porcentaje bajo.

$$a = 0,5 * 1 + 0,3 * 3 + 0,15 * 1,20$$

$$a = 1,58$$

El factor de corrección b=0,82 (tabla 2.3) pues el más adecuado para la producción de cemento (Duda 1977).

El factor de corrección c=0,9 (tabla 2.4) para un molino de 2 cámaras.

Cálculo del caudal del molino:

$$Q = 40 * \frac{1,58 * 0,82 * 0,9}{1000} * 6,7 * 45,06 * \sqrt{3} * \sqrt{\frac{175,9}{45,06}}$$

$$Q = 48,5 \text{ t/h} > 41,67 \text{ t/h}$$

El molino con diámetro de 3 m y largo de 9 m cumple con la productividad de la planta.

- **Para la planta de 50 000 toneladas al año.**

La planta de 50 000 toneladas al año produce 150 toneladas de LC³ diarias que serían 6,25 t/h. Para ello se asume un diámetro de 2 m con un largo de 6 m.

Cálculo del volumen del recinto de molienda:

$$V = \sum \frac{\pi * D^2}{4} * L \text{ cámara}$$

Como es un molino de dos cámaras, el diafragma separador de cámaras tiene un espesor de 0,5 m, por lo que la longitud útil de molienda es de 5,5 m. el tamaño del grano máximo es de 25 mm.

$$L \text{ cámara 1} = 0,25 * 5,5 = 1,375 \text{ m}$$

$$L \text{ cámara 2} = 0,5 * 5,5 = 2,75 \text{ m}$$

$$V = \frac{\pi * 2^2}{4} * 1,375 + \frac{\pi * 2^2}{4} * 2,75$$

$$V = 12,96 \text{ m}^3$$

Cálculo del peso de los cuerpos moledores:

$$G = gm * \psi * \frac{\pi * D^2 * L}{4}$$

Donde:

G: peso de los cuerpos moledores (t).

gm: peso específico aparente del montón (7,8-7,9 t/m³).

ψ: grado de llenado de las bolas en el apilamiento (25 %-45 %).

D: diámetro del molino (m).

L: largo del molino (m).

$$G = 7,9 * 0,35 * \frac{\pi * 2^2 * 6}{4}$$

$$G = 52,12 \text{ t}$$

Cálculo del coeficiente a:

El cemento LC³ tiene una composición de 50 % clínquer, 30 % metacaolín, 15 % caliza y 5 % yeso; para cada uno de estos materiales se busca su coeficiente de molturabilidad (tabla 2.2) y se multiplica por el porcentaje correspondiente. El yeso se desprecia por tener un porcentaje bajo.

$$a = 0,5 * 1 + 0,3 * 3 + 0,15 * 1,20$$

$$a = 1,58$$

El factor de corrección b=0,82 (tabla 2.3) pues el más adecuado para la producción de cemento (Duda 1977).

El factor de corrección c=0,9 (tabla 2.4) para un molino de 2 cámaras.

Cálculo del caudal del molino:

$$Q = 40 * \frac{1,58 * 0,82 * 0,9}{1000} * 6,7 * 12,96 * \sqrt{2} * \sqrt{\frac{52,12}{12,96}}$$

$$Q = 10,72 \text{ t/h} > 6,25 \text{ t/h}$$

El molino con diámetro de 2 m y largo de 6 m cumple con la productividad de la planta.

Tabla 2.6: Resumen de los resultados del dimensionamiento de los molinos. Fuente: Elaboración propia.

Planta de 300 000 toneladas por año		Planta de 50 000 toneladas por año	
Diámetro	Largo	Diámetro	Largo
3 m	9 m	2 m	6 m

2.3. Metodología para el análisis económico y ambiental de las plantas de producción de LC³

En el presente epígrafe se expone el diseño de la metodología a seguir para conducir el análisis económico y ambiental de las plantas de producción de LC³ que son objeto de

estudio de la presente investigación. El diagrama que se ofrece en la Figura 2.4 representa el proceso a seguir, donde puede apreciarse la sinergia que se produce entre la evaluación económica y la ambiental, puesto que el inventario de datos que se realiza en los primeros pasos del ACV, sirven de entrada para el análisis económico de las plantas. Dicha metodología podría ser utilizada de referencia en estudios futuros bajo diferentes consideraciones del tamaño de la planta de LC³, puesto que en este trabajo solo se realizan los análisis concernientes a las plantas prototipo que son objetos de interés del proyecto LC³ en el momento que se desarrolla la investigación.

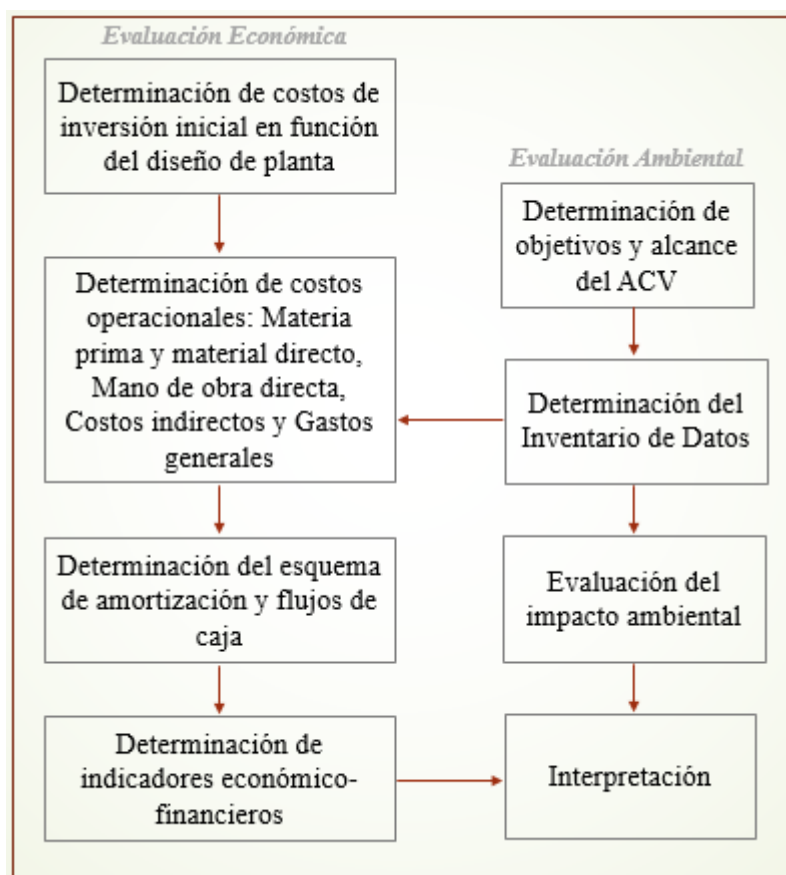


Figura 2.4. Metodología general para la evaluación económica y ambiental de las plantas de producción de LC3. Fuente: Elaboración propia

2.3.1. Evaluación ambiental

La evaluación ambiental debe comenzar con las especificaciones de objetivos y alcance que son formulados en el ACV⁵ como técnica, que incluyen la determinación de la unidad funcional (UF) con la cual se operará. En el caso de las plantas bajo estudio, su capacidad productiva se convierte en la UF. Ello sirve de patrón de partida para la

⁵ Fue explicado detalladamente en el Capítulo I.

creación del inventario de datos (ID), ya que este último se produce con relación a la UF, dando lugar al próximo paso que es precisamente la creación del ID. Todos los supuestos necesarios para la evaluación se deben establecer en este paso primario del proceso ya que de él se deriva la consistencia de los análisis posteriores.

El ID es una de las tareas técnicas más relevantes porque él constituye los cimientos del análisis económico y ambiental. Se deben cuantificar todas las materias primas que intervienen en la producción del cemento LC³, ajustado a las diferentes capacidades productivas especificadas para cada tamaño de planta (caliza, yeso, arcilla caolinítica, combustible, energía eléctrica, entre otros). Con relación a la mano de obra, el número de obreros involucrados en la producción también es necesario precisarlo dentro del ID para que posteriormente sirva de entrada al análisis económico, puesto que ellos constituyen componentes del costo de producción.

Los precios unitarios de los materiales y la energía a consumir en el proceso total de producción de LC³ constituyen parte del inventario de datos, puesto que ellos se combinan con las cantidades físicas de los recursos para posteriormente convertirse en costos de producción. Los precios de los factores productivos en el mercado, esto es, aquellos precios que paga el productor a los suministradores de las materias primas, así como a la fuerza de trabajo en forma de salario, devienen en costos de manufactura para el producto en cuestión.

Con la información del ID que corresponde a las materias primas (incluida la energía), se procede a la determinación del impacto ambiental. Se modela el proceso de producción de cemento a las escalas productivas especificadas, utilizando las facilidades computacionales del software SimaPro, es decir, se le asignan al software las cantidades físicas de los materiales para que se genere el balance de masa y energía que más tarde posibilita la asignación de impactos ambientales. El capítulo I de esta tesis detalló el mecanismo analítico del ACV, el cual se debe seguir en este paso de la metodología propuesta.

Las interpretaciones del análisis ambiental pueden realizarse de diversas maneras. En este caso se propone utilizar la categoría de impacto ambiental “Potencial de Calentamiento Global”, que a su vez es responsable de la contribución al cambio climático. Esta categoría se mide a través de la cantidad de CO₂ equivalente emitida a la atmósfera como consecuencia de la producción en cuestión. Para ello se debe utilizar el

método del IPCC, el cual lo tiene incorporado el SimaPro. A partir de este resultado, el cual pasa a ser considerado como factor de impacto ambiental anual de la planta, se pueden analizar comparativamente las diferentes variantes tecnológicas en estudio (o sea, las plantas de diferentes capacidades productivas).

2.3.2. Evaluación económica

La evaluación económica de las plantas comienza con la determinación de los costos de inversión inicial, los cuales están determinados en lo fundamental por el tamaño de la planta. Aquí intervienen todos los costos de los equipos involucrados en la producción de LC3: horno, molino, bandas transportadoras, equipos del proceso de envasado y empaquetado, entre otros. Es uno de los pasos más complejos en este estudio, puesto que la información económica relativa a costos de maquinarias es de uso muy limitado en el sector del cemento. Se debe utilizar la información publicada en artículos científicos reconocidos internacionalmente, así como aquella información factual proveniente de posibles proveedores de dichas maquinarias. Para los fines de esta investigación se utilizarán los datos económicos de costo de planta (para el caso de los calcinadores), proporcionados por la Empresa IPIAC-NERY (Portugal y España).

En un paso posterior se determinan los costos operacionales de producción (también denominados costos operativos), los cuales están directamente relacionados con el nivel de actividad. Para desarrollar esta tarea técnica dentro de la evaluación económica, es preciso distinguir entre diferentes elementos del costo económico, es decir, tomar en consideración la clasificación de los costos. La clasificación más utilizada distingue entre costos fijos y costos variables. Los costos fijos son aquellos que no varían con relación al volumen del producto, es decir, permanecen constantes por períodos determinados. El ejemplo más típico es la depreciación (o costo de depreciación), que es el costo asociado a la inversión en maquinarias, equipos y, en general, todos los activos. Por ejemplo, si se compra una máquina por valor de 1000 pesos, una vida útil de 10 años, siguiendo el método de depreciación por línea recta, sería $1000/10=100$, es decir, la depreciación anual asciende a 100 pesos. Dicho valor es fijo para cada período productivo de duración un año. Al proceso de cargar la inversión inicial o costo de capital a los períodos contables o económicos, es decir, distribuirlos en el tiempo para no cargarlo a un mismo año, se le denomina amortización. Se puede amortizar siguiendo el método de depreciación acumulada, el método de la suma de los números dígitos, por

lo que no existe un método único. Generalmente se emplea el método de depreciación lineal.

Los costos variables son aquellos que dependen directa y proporcionalmente del volumen de producción. Las materias primas generan costos variables, aunque se suele distinguir entre materias primas directas y materias primas indirectas (que se traducen en costos directos e indirectos). Las técnicas generales del análisis económico requieren de esta distinción para determinar umbrales de rentabilidad y otras medidas de desempeño económico y financiero, por lo que es preciso hacer un uso exhaustivo de estas clasificaciones.

La mano de obra es un componente que suele ser variable, aunque se distingue entre mano de obra directa e indirecta. Es un componente fundamental del costo de producción y por lo general se maneja por tarifa, esto es, salario por hora trabajada. Los trabajadores que laboran en áreas administrativas y otros no vinculados directamente al proceso de producción fundamental, generan costos de mano de obra indirecta.

Los gastos generales son costos no inmediatos a la producción fundamental, generalmente se asocian a la distribución y venta, a gastos administrativos, servicios financieros, entre otros.

Existe un procedimiento práctico y bastante trivial de calcular costos, que es la multiplicación del precio de adquisición (o compra) de un insumo por la cantidad utilizada. Aunque en la práctica dichos procedimientos se convierten en procesos de cálculo más complejos, a los fines de la presente investigación no se profundizará en los detalles técnico-económicos y contables del costo de producción.

Una vez determinados los costos, el precio de venta y los esquemas de amortización, se procede a calcular indicadores económicos. Si se realiza un flujo de caja proforma, se pueden determinar indicadores financieros. En la presente tesis se pretende determinar el punto de equilibrio como técnica de análisis económico, para determinar la mejor alternativa de tamaño de fábrica de cemento LC³. Este tipo de análisis forma parte de la fase de interpretación.

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

- La utilización del proceso seco para la producción del cemento permite reducir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera y el tiempo de producción. Sin

embargo, la tecnología requerida puede ser costosa sino se tienen en cuenta los criterios de la economía de escala y la potencial introducción del LC³ para reducir los contenidos de clínquer.

- Los hornos giratorios definen la productividad de la planta de cemento por lo que se pueden nombrar como máquina principal o limitante. Los molinos de bolas tienen que cumplir con esta productividad.
- La utilización de la planta de cemento como planta moledora, es decir que adquiere el clínquer externamente y produce arcilla calcinada, ofrece ventajas en cuanto al tamaño de construcción y la cantidad de gases contaminantes emitidos a la atmósfera.
- La metodología propuesta en el presente capítulo integra los elementos básicos de evaluación de impacto ambiental con las técnicas básicas de análisis económico, lo que sirve de herramienta procedimental para alcanzar la evaluación de las plantas de cemento prototipo antes referidas.

CAPÍTULO III. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LAS PLANTAS PROTOTIPO DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO LC³: TAMAÑO PEQUEÑO (50 000 TPA) Y MEDIANO (300 000 TPA).

En el presente capítulo se evalúan dos plantas de producción de cemento LC³ de tamaño pequeño (50 000 toneladas anuales) y mediano (300 000 toneladas anuales), desde el punto de vista económico y ambiental. Tomando como referencia resultados investigativos previamente obtenidos por el equipo internacional del proyecto Cemento de bajo carbono, información factual de la fábrica de cemento Siguaney, así como información diversa del entorno internacional en lo que respecta a costos de inversión, se construye el análisis económico en términos de la moneda USD, que es el patrón internacional de divisa. Los datos económicos se expresan en esta moneda debido a que este trabajo está orientado a satisfacer una demanda investigativa del proyecto LC³, el cual a petición de algunos productores internacionales se ha dado a la tarea de fundamentar la factibilidad de producir cemento LC³ en plantas prototipo de baja escala productiva.

3.1. Supuestos y condicionamientos previos del estudio económico y ambiental

En los epígrafes subsiguientes se aplicará la metodología descrita en el capítulo segundo de esta tesis, en función de los objetivos perseguidos. Para una adecuada comprensión de los cálculos y análisis realizados, en el presente epígrafe se exponen algunas consideraciones previas asociadas al estudio o supuestos de partida. Los supuestos definen el alcance y la precisión del método que se aplica y contribuyen al esclarecimiento de los resultados.

Ante todo, se debe explicar que el trabajo investigativo desarrollado no es conclusivo, más bien es el primer intento de ofrecer la modelación técnica de una planta prototipo de cemento LC³, de ahí que la información económica y ambiental de que se dispone es aún incipiente. Los trabajos realizados y publicados por ((Sánchez et al. 2015), (Sánchez et al. 2016a), (Sánchez et al. 2016b), (Cancio et al. 2017)), constituyen la base analítica de los avances investigativos que hoy se manifiestan en el terreno económico y ecológico con relación al LC³.

En este trabajo se asume la eficiencia de producción del clínquer que posee la Fábrica de cemento Carlos Marx, de Cienfuegos (inversión de HOLCIM), que se basa en proceso por vía seca, tecnología moderna, y sus condiciones productivas se consideran competitivas. Ello posibilita acercar el análisis a los requerimientos internacionales del

mismo. En estudios posteriores se debería pasar a la fase de evaluar la fábrica en su integralidad (que produzca clínquer y arcilla calcinada); en este momento se considera que la fábrica sea moledora y ella misma produzca el metacaolín, lo que implica comprar el clínquer a un suministrador con las características competitivas de la fábrica de Cienfuegos.

La experiencia de obtener metacaolín es nueva para Cuba. Por primera vez se obtuvo la calcinación de arcilla caolinítica en el año 2013 cuando ocurrió la primera prueba industrial de cemento LC³. La arcilla se calcinó en un antiguo horno de producción de clínquer por proceso húmedo, el cual fue adaptado para tales propósitos. Sin embargo, se hizo necesario obtener información de productores líderes en calcinación de arcillas, con experiencia probada en el proceso, para atemperar los costos de inversión a las condiciones que exige este estudio.

La primera información que se obtuvo por el equipo LC³ con relación a los costos de una planta de metacaolín fueron los proporcionados por ARGECO, Detemer Technologies, datos que figuran para una pequeña planta de producción de metacaolín que comenzó sus actividades en 2006 en Francia. Esta planta, con un costo aproximado de 7 millones de USD, vida útil de 25 años, posee una capacidad anual de producción de 80 000 t de metacaolín (Véase (Sánchez et al. 2016b) y (Cancio et al. 2017)).

IPIAC-NERY, una empresa radicada en Portugal con representación en España, ha desarrollado la técnica especializada para calcinar arcilla caolinítica en hornos rotatorios. Desarrolló un sistema de enfriamiento por agua que permite cambiar la coloración rojiza del material calcinado, convirtiendo al cemento en un material con un color similar a los cementos tradicionales. Los datos económicos de inversión en calcinadores de IPIAC-NERY, los cuales serán explicados más adelante, fueron empleados como referente en este estudio de plantas prototipo (Véase (IPIAC-NERY 2017a), (IPIAC-NERY 2017b)).

Los costos de las materias primas están sometidos a una distancia económica umbral de 100 kilómetros desde los yacimientos de las materias primas fundamentales a la fábrica de cemento.

3.2. Creación del inventario de datos

Los datos que se consolidan en este epígrafe, como lo explica la metodología en el capítulo II, sirven de entrada a la evaluación económica y ambiental. La unidad funcional

con que se operará serán las toneladas de producto LC³ que se ha declarado para cada planta prototipo: 50 000 t y 300 000 t, respectivamente.

En la tabla 3.1 se reflejan las cantidades de materias primas involucradas en la producción de la arcilla calcinada (metacaolín), para una producción estándar de 1 tonelada.

Tabla 3.1. Materias primas para la producción de metacaolín. Fuente: Basado en las pruebas industriales del LC³

Materias primas	UM	Cantidad
Caolín	Kg	1314
Agua	m ³	3.14
Ladrillos refractarios	kg	1.13
Combustible	kg	76
Energía eléctrica	kWh	52

El crudo cubano figura en las fichas de costo de la industria del cemento en Cuba con un valor de 515.44 CUC por tonelada, dato que se maneja para todos los cálculos de producción del cemento, en particular la fábrica de cemento Siguaney. Sin embargo, este costo no resulta atemperado a las condiciones del mercado internacional. Tomando en cuenta los precios internacionales del petróleo, se puede considerar como dato de entrada un precio de 120 USD por tonelada de combustible.

La tabla 3.2 sintetiza los materiales y energía que se requieren para producir una cantidad estándar de 1 tonelada de cemento LC³.

Tabla 3.2. Materias primas para la producción estándar de una tonelada de LC³. Fuente: Basado en las pruebas industriales del LC³ en Cuba

Materias primas	UM	Cantidad
Caliza	Kg	150
Clínquer	Kg	480
Metacaolín	Kg	300
Yeso	Kg	70
Bolas de molienda	Kg	0.10
Lubricantes	Kg	0.39
Energía eléctrica	kWh	40.16

Las materias primas requeridas para la obtención del clínquer no se declaran puesto que se asumirá que las plantas serán moledoras y productoras de la arcilla calcinada, pero adquirirán el clínquer de una planta eficiente a un precio competitivo.

De acuerdo con la información suministrada por IPIAC-NERY S.A., una planta de 100 000 toneladas anuales de arcilla calcinada tiene un costo total 4 945 900 euros; así como la planta de 50 000 toneladas anuales de arcilla calcinada tiene un costo de inversión de 3 971 420 euros.

Tabla 3.3. Desglose de costos de inversión para calcinadores (expresado en Euros. Fuente: (IPIAC-NERY, 2017a)(IPIAC-NERY, 2017b).

Descripción	Cap. 100 000 tpa⁶	Cap. 50 000 tpa
Equipo: Preparación de materia prima	321 500.00	257 200.00
Equipo: Zona de calcinación	2 510 000.00	1 932 700.00
Equipo: Zona de molienda y almacenamiento	1 664 400.00	1 331 520.00
Equipo: Sistema de supervisión	100.00	100.00
Servicios: Asistencia de montaje y arranque de los equipos	250 000.00	250 000.00
Servicios: Planos de la fábrica e ingeniería	100 000.00	100 000.00
Costo total	4 945 900.00	3 971 420.00

Como puede apreciarse, la planta capaz de producir 100 000 tpa de arcilla calcinada puede utilizarse de referencia para el análisis de la planta prototipo de capacidad 300 000 toneladas de LC³ por año. Sin embargo, la planta calcinadora de 50 000 tpa produce más de la cantidad de metacaolín requerido para la planta de LC³ de capacidad 50 000 tpa. Tomando en cuenta la limitación de datos, y salvando la posible inconsistencia teórico-práctica, para los fines de este trabajo se utilizó la convención de estimar, a partir de los costos de inversión de la planta más pequeña proporcionada por IPIAC-NERY, los costos de inversión en calcinador para la planta de LC³ de 50 000 tpa. Las soluciones tecnológicas proporcionadas por IPIAC-NERY resultan más competitivas en precio que las proporcionadas por Demeter Technologies. De manera que, normalizando los costos de inversión por capacidad productiva, arroja un costo de 1 323 806.00 euros para una capacidad de 50 000 tpa.

⁶ Se refiere a la capacidad de la planta para producir arcilla calcinada.

Para el análisis económico se requieren como entradas los precios de las materias primas. Tomando en cuenta la información de precios de la industria cubana del cemento, se procede a convertir a USD utilizando la convención de que un CUC es equivalente a 1 USD, aunque en rigor económico-financiero sería discutible.

La tabla 3.4 muestra un resumen de los precios utilizados para el estudio.

Tabla 3.4. Sistema de precios para materias primas fundamentales. Fuente: Información factual de la industria del cemento en Cuba

Materias primas	UM	Precio en MT	De ello: CUC
Caliza	kg	3.48	1.69
Clínquer	kg	49.41	49.41
Metacaolín	kg	31.37	30.04
Yeso	kg	31.37	10.19
Bolas de molienda	kg	1 440.02	1 256.00
Lubricantes	kg	2 900.00	2 900.00
Energía eléctrica	kWh	215.00	215.00

El precio del clínquer es el proporcionado por la fábrica de cemento Carlos Marx, de Cienfuegos, que es una fábrica competitiva en el mercado internacional. En el caso del metacaolín, se utilizaron los resultados obtenidos por (Sánchez et al. 2016b) a partir de las condiciones cubanas. Se trabaja actualmente en el equipo LC³, en la conformación de una ficha de costo de metacaolín, y a su vez de LC³, con base en precios internacionales y casos particulares de Portugal y España, por intereses manifestados por la compañía IPIAC-NERY S.A.

3.3. Evaluación económica

En el presente apartado se realiza la evaluación económica de las plantas prototipo de 50 000 tpa y 300 000 tpa, utilizando como base el inventario de datos anteriormente declarado y explicado.

En la tabla 3.5 se consolidan los costos económicos de la planta de 50 000 tpa. En una primera sección se reflejan los costos variables, que están asociados al costo directo de materias primas y materiales. En la segunda sección se exponen los costos fijos. La mano de obra está considerada en esta sección, puesto que, dado un tamaño determinado de planta, el número de obreros se mantiene relativamente estable. Por consiguiente, los costos de mano de obra no varían, para dicho tamaño de operaciones.

Tabla 3.5. Estado de costos de producción para la planta de 50 000 tpa de LC³. Fuente: Elaboración propia

Materias primas y materiales	Costo en MT	De ello: CUC	Costo en USD
Caliza	26 100.00	12 675.00	13 212.00
Clínquer	1 185 840.00	1 185 840.00	1 185 840.00
Metacaolín	470 550.00	450 600.00	451 398.00
Yeso	109 795.00	35 665.00	38 630.20
Bolas de molienda	7 342.05	6 403.81	6 441.34
Lubricantes	56 186.27	56 186.27	56 186.27
Energía eléctrica	431 720.00	431 720.00	431 720.00
Subtotal: Costo Directo de Materiales	2 287 533.31	2 179 090.07	2 183 427.80
Costos de mano de obra, gastos generales y costos fijos			
Otros gastos directos	234 564.49		9 382.58
Gastos de fuerza de trabajo	317 556.57		317 556.57
Gastos indirectos de producción	1 276 119.09		51 044.76
Gastos generales y de administración	300 600.00		12 024.00
Gastos de distribución y venta	349 800.00		13 992.00
Otros gastos	95 400.00		3 816.00
Costo de capital fijo (Depreciación)			52 952.27
Subtotal: Costos fijos			460 768.18
Costo Total			2 644 195.98

Análogamente, se procede a determinar los costos totales para la planta de LC³ con capacidad de 300 000 toneladas por año, los cuales se reportan en la tabla 3.6.

Para amortizar el costo de inversión inicial de las plantas se utilizó el método de depreciación por línea recta, es decir, el proceso de dividir el costo de inversión entre el número de años de vida útil (en este caso, 25 años), para determinar los gastos de depreciación que corresponden a cada año.

Cálculo de la depreciación para la planta de 300 000 tpa:

$$\text{Depreciación anual} = \frac{4\,945\,900.00}{25} = \text{EUR } 197\,836.00$$

Cálculo de la depreciación para la planta de 50 000 tpa:

$$\text{Depreciación anual} = \frac{1\,323\,806.67}{25} = \text{EUR } 52\,952.26$$

Tabla 3.6. Estado de costos de producción para la planta de 300 000 tpa de LC³. Fuente: Elaboración propia

Materias primas y materiales	Costo en MT	De ello: CUC	Costo en USD
Caliza	156 600.00	76 050.00	79 272.00
Clínquer	7 115 040.00	7 115 040.00	7 115 040.00
Metacaolín	2 823 300.00	2 703 600.00	2 708 388.00
Yeso	658 770.00	213 990.00	231 781.20
Bolas de molienda	44 052.28	38 422.84	38 648.02
Lubricantes	337 117.61	337 117.61	337 117.61
Energía eléctrica	2 590 320.00	2 590 320.00	2 590 320.00
Subtotal: Costo Directo de Materiales	13 725 199.88	13 074 540.45	13 100 566.83
Costos de mano de obra, gastos generales y costos fijos			
Otros gastos directos	1 172 822.44		46 912.90
Gastos de fuerza de trabajo	1 587 782.83		1 587 782.83
Gastos indirectos de producción	6 380 595.47		255 223.82
Gastos generales y de administración	1 503 000.00		60 120.00
Gastos de distribución y venta	1 749 000.00		69 960.00
Otros gastos	477 000.00		19 080.00
Costo de capital fijo (Depreciación)			197 836.00
Subtotal: Costos fijos			2 236 915.55
Costo Total			15 337 482.37

La técnica económica utilizada para comparar ambas plantas prototipo es el Punto de Equilibrio, también conocido como Umbral de Rentabilidad. Es una herramienta sencilla, pero a la vez robusta, utilizada con mucha frecuencia en los manuales sobre economía de plantas de cemento. Véase, por ejemplo, el libro *Small Scale Production of Portland Cement*, producido por la división de Hábitat de Naciones Unidas (UN-HABITAT 1993).

El punto de equilibrio, como concepto general, es el umbral de producción a partir del cual el negocio o actividad económica que se ejecuta comienza a ofrecer rentabilidad económica, es decir, a generar beneficios o ganancias. En la economía de plantas de

cemento con frecuencia se expresa como un porcentaje de la capacidad anual. Mientras más pronto se alcance este umbral, mejor es para la empresa o negocio.

Para efectuar consistentemente la comparabilidad entre las dos plantas en estudio, se normalizan los costos económicos con base en la capacidad productiva anual, de manera que queden expresados en unidad monetaria por tonelada de cemento (USD/t).

La fórmula del umbral de rentabilidad es la siguiente:

$$\text{Punto de Equilibrio (\%)} = \frac{CF}{PV - CV} \times 100$$

Donde:

CF: Costo Fijo

CV: Costo Variable

PV: Precio de venta

Todas estas magnitudes económicas se expresan por tonelada de cemento para normalizar la comparabilidad.

Asumiendo un precio de venta del cemento LC³ de 60 USD, se determina el umbral de rentabilidad de las dos plantas, cuyo resultado se sintetiza en las figuras 3.1 y 3.2.

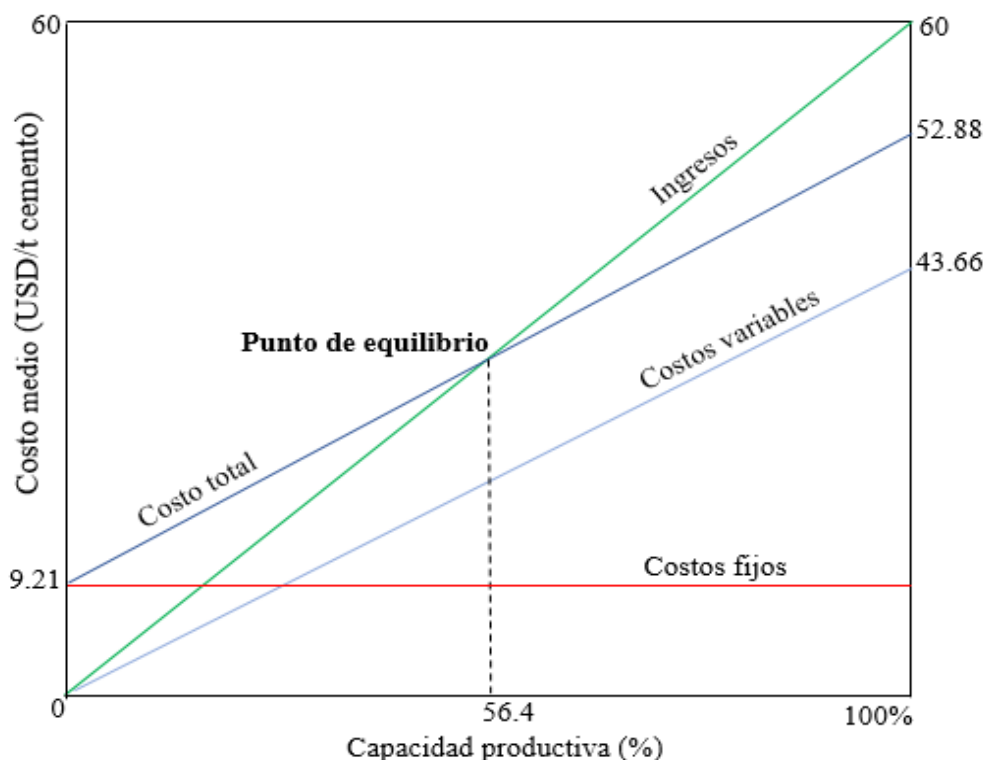


Figura 3.1. Representación gráfica del umbral de rentabilidad para la planta de 50 000 tpa
Fuente: Elaboración propia

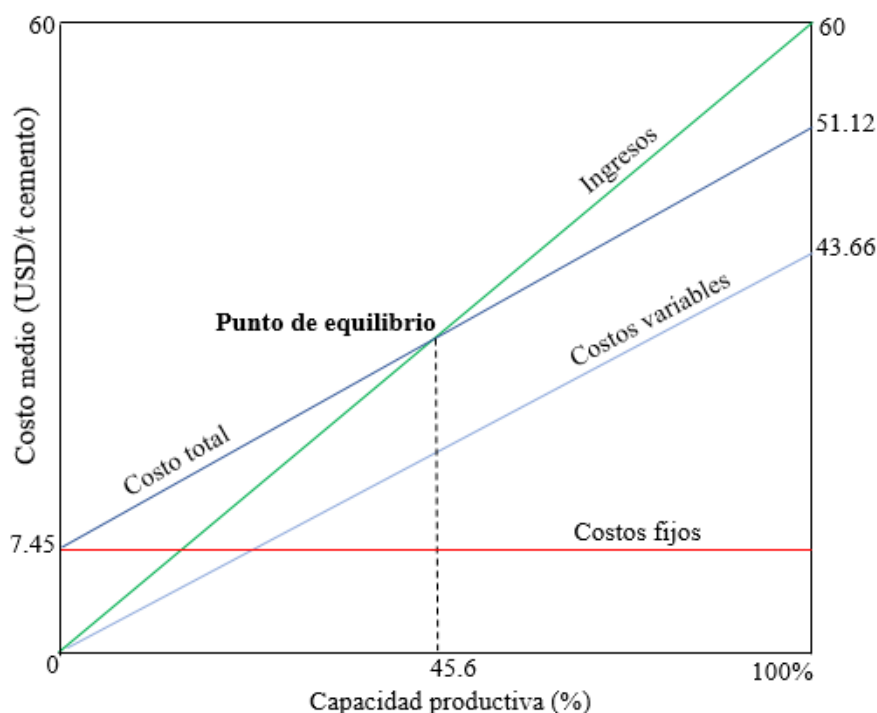


Figura 3.1. Representación gráfica del umbral de rentabilidad para la planta de 300 000 tpa
Fuente: Elaboración propia

De dicho análisis puede interpretarse que la planta de capacidad 300 000 tpa alcanza el umbral de rentabilidad más pronto que la planta de 50 000 tpa, lo cual significa que comienza a obtener beneficios más rápidamente. La primera debe operar como mínimo al 45.6% de su capacidad y la segunda al 56.4%. También puede inferirse que las diferencias no son tan drásticas entre ambas plantas. Si se les compara con plantas grandes de producción de cemento, con puntos de equilibrio por encima del 70%, puede concluirse que ambos tamaños de planta estándar analizados en esta investigación se consideran factibles de ser implementados.

En la tabla 3.7 se ofrece un resumen del análisis de sensibilidad realizado al punto de equilibrio ante variaciones en el precio de venta del cemento LC³, pudiéndose observar que el umbral de rentabilidad es altamente sensible a los cambios en el precio del cemento. Si se analiza por estratos de cambio de precio, en el primer estrato (de 60 USD a 70 USD) es donde más reacciona el punto de equilibrio. En los próximos estratos (de 70 a 80 y de 80 a 90) la aceleración del cambio sobre el umbral de rentabilidad, disminuye. Los aumentos de precio parecen favorecer más a la planta de 50 000 tpa que a la planta de 300 000 tpa (obsérvese la variación absoluta del punto de equilibrio a medida que aumenta el precio). Sin embargo, como tendencia, la planta mediana consigue márgenes de ganancia a niveles de operación menores que la planta pequeña.

Tabla 3.7. Sensibilidad del umbral de rentabilidad ante cambios en el precio de venta del cemento LC³. Fuente: Elaboración propia

Precio de venta	Planta de 50 000 tpa	Planta de 300 000 tpa
60	56.42	45.66
70	34.99	28.32
80	25.36	20.52
90	19.89	16.9

Un Balance de Resultados sintetizado se puede apreciar en la tabla 3.8, visualizándose las ganancias potenciales de ambas plantas de cemento. Este se realiza con el escenario más pesimista posible, es decir, con un precio de la tonelada de cemento igual a 60 USD. Es de esperar que estas ganancias se multipliquen significativamente en la medida que el producto alcance mejores precios en el mercado.

Tabla 3.8. Estado de Resultados simplificado. Fuente: Elaboración propia

Elemento	Planta de 50 000 tpa	Planta de 300 000 tpa
Ingresos	3 000 000.00	18 000 000.00
Costos	2 644 195.98	15 337 482.37
Utilidades	355 804.02	2 662 517.63

Se puede inferir, sin recurrir a flujos de cajas descontados, que la inversión de la planta de 50 000 tpa se recupera en 4 años de operación, mientras la planta de 300 000 tpa recupera su inversión en 2 años, lo cual está directamente asociado al mayor volumen de ganancias.

3.4. Evaluación ambiental

Para la evaluación ambiental se deben utilizar las cantidades físicas de los materiales especificados en el inventario de datos y modelar los tipos de cemento en SimaPro a partir de los principios del ACV. Debido a que existen trabajos previos desarrollados por el equipo de investigadores del proyecto LC³, en esta tesis se utilizan los factores de impacto ambiental publicados en los trabajos de (Sánchez et al. 2016b) y (Cancio et al. 2017), tal como reflejan en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Factores de impacto ambiental de cementos alternativos (kg CO₂ equivalente por t de cemento). Fuente: Citadas en el párrafo anterior.

Cemento	Proceso húmedo	Proceso seco
P35	1 017	890
PP25	879	765
LC ³ _R*		562
LCR_F**		550

*LC³ producido calcinando la arcilla a partir de calcinadores recuperados por medio de hornos de clínquer de proceso húmedo.

**LC³ producido calcinando la arcilla por medio de la tecnología flash

Las plantas que se evalúan en esta investigación se suponen ser puestas en operación por medio de tecnología de proceso seco (para la producción de clínquer) y la calcinación se supone ser por medio de la tecnología flash.

En la tabla 3.9 se muestra el impacto ambiental de las dos plantas de cemento evaluadas, utilizando como escenario de referencia el cemento Portland ordinario, que es el cemento predominantemente utilizado a nivel mundial.

Se puede apreciar que, anualmente, es posible aminorar las emisiones de dióxido de carbono equivalente, en un total de 17 000 toneladas para el caso de la planta de 50 000 t, así como 102 000 toneladas para el caso de la planta de 300 000 t. En ambos casos representa una contribución a la reducción del impacto ambiental en un 38%, pero obviamente, dicho porcentaje representa más en valor absoluto para la planta mediana que para la pequeña.

Tabla 3.9. Impacto ambiental de las plantas de LC³ evaluadas (t de CO₂ equivalentes). Fuente: Elaboración propia

Cemento	Planta de 50 000 t	Planta de 300 000 t
Cemento Portland Ordinario	44 500	267 000
Cemento LC ³	27 500	165 000
Variación absoluta	17 000	102 000

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO

- Los datos utilizados en el estudio se basan en la experiencia cubana, al trasladarlos al plano internacional pueden sufrir variaciones que afecten los resultados obtenidos.
- La planta media de 300 000 tpa comienza a obtener beneficios más rápidamente que la planta pequeña de 50 000 toneladas. La primera debe operar al 45,6 % de su capacidad, mínimamente, tiene utilidades de 2 662 517,63 USD y recupera la inversión en 2 años; mientras que la segunda debe operar al 56,4 %, tiene utilidades de 355 804,02 USD y recupera la inversión en 4 años.
- Los aumentos de precio favorecen más a la planta de 50 000 tpa que a la planta de 300 000 tpa. Sin embargo, como tendencia, la planta mediana consigue márgenes de ganancia a niveles de operación menores que la planta pequeña.
- Ambas plantas presentan una contribución al impacto ambiental del 38 %. Sin embargo, esta cifra es más significativa en la planta media que en la pequeña pues la primera reduce 102 000 t de CO₂ equivalentes y la segunda 17 000 t de CO₂ equivalente.

CONCLUSIONES GENERALES

- La producción de cemento LC³ en plantas de mediano y pequeño tamaño administradas a nivel nacional puede funcionar bajo el concepto de economía de escala, pues la ubicación estratégica de las mismas reduce los gastos por concepto de transportación y tamaño; y aumenta las ganancias debido a que permite la replicabilidad del negocio.
- Los hornos giratorios definen la productividad de la planta de cemento por lo que se pueden nombrar como máquina principal o limitante. Los molinos de bolas tienen que cumplir con esta productividad.
- La planta media de 300 000 tpa comienza a obtener beneficios más rápidamente que la planta pequeña de 50 000 toneladas. La primera debe operar al 45,6 % de su capacidad, tiene utilidades de 2 662 517,63 USD y recupera la inversión en 2 años; mientras que la segunda debe operar al 56,4 %, tiene utilidades de 355 804,02 USD y recupera la inversión en 4 años.
- Ambas plantas presentan una contribución al impacto ambiental del 38 %. Sin embargo, esta cifra es más significativa en la planta media que en la pequeña pues la primera reduce 102 000 t de CO₂ equivalentes y la segunda 17 000 t de CO₂ equivalente.

RECOMENDACIONES

- Es necesario realizar las gestiones necesarias para el uso de bibliografía más actual en el diseño de los equipos principales de la planta (horno rotatorio y molino de bolas), que permita que estos se comporten dentro del concepto de tecnología BAT y sean competitivos a nivel internacional.
- Realizar el estudio bajo condiciones reales de producción y en un lugar específico para tener un inventario de datos lo más eficiente posible, sin supuestos que relativicen los resultados.
- Realizar el estudio para la planta integral (producción de clínquer y arcilla calcinada) ya que este fue realizado para la planta moledora.

BIBLIOGRAFÍA

(March 2012). WBCD - CSI, Guidelines for Emissions Monitoring and Reporting in the Cement Industry. Emissions Monitoring and Reporting_Version 2.0. www.wbcscement.org: 40

Alujas, A. (2010). "Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente." Facultad de Construcciones.

Ambiental, E. D. G. d. C. y. E., et al. (2003). Guía de mejores técnicas disponibles en España de fabricación de cemento, Ministerio de Medio Ambiente, Centro de Publicaciones.

Arata, A. (2009). Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. Aplicación de la Plataforma R-MES, RIL editores.

Arbós, L. C. (2012). La producción. Procesos. Relación entre productos y procesos: Organización de la producción y dirección de operaciones, Ediciones Díaz de Santos.

Aylard, R. and L. Hawson (july 2002). Our agenda for action. www.wbcscd.org.

Baca Urbina, G. (2006). "Evaluación de proyectos." McGraw-Hill.

Berriel, S. S., et al. (2016). "Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba." Journal of Cleaner Production **124**: 361-369.

Betancourt, S. (2014). Cemento Portland Ordinario, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Conferencia de la asignatura "Materiales y Productos de la Construcción"

Boulenger, M. (2011). Life Cycle Assessment of concrete structures using public databases: comparison of a fictitious bridge and tunnel.

Cancio, Y., et al. (2017). " Limestone calcined clay cement as a low carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies." Dev. Eng. APPROVED.

Cardim de Carvalho Filho, A. (2001). Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento-Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento, Universitat Politècnica de Catalunya.

Cardona, C. R. and M. D. P. R. Salazar (2016). Fundamentos de administración, Ecoe ediciones.

Cembureau (2010). Activity report. D/2011/5457/May. www.cembureau.eu.

Chain, N. S. (2001). Evaluación de proyectos de inversión en la empresa, Prentice Hall.

- Dileep, S. (2001). "Instalaciones de Manufactura." Thomson Editores, México.
- Duda, W. H. (1977). Manual tecnológico del Cemento, Reverte.
- Flatt, R. J., et al. (2012). "Concrete: An eco material that needs to be improved." Journal of the European Ceramic Society.
- FLSmidth (2017). from <http://www.flsmidth.com/>.
- Heede, R. (2014). "Tracing anthropogenic carbon dioxide and methane emissions to fossil fuel and cement producers, 1854–2010." Climatic Change **122**(1-2): 229-241.
- IEA-WBCSD (2009). Cement roadmaps targets. www.iea.org.
- IPIAC-NERY (2017a). Proyecto de suministro de los equipos para una instalación de fabricación de arcilla calcinada con una producción de 100 000 t por año. España.
- IPIAC-NERY (2017b). Proyecto de suministro de los equipos para una instalación de fabricación de arcilla calcinada con una producción de 300 000 t por año. España.
- ISO. Technical Committee ISO/TC 207, E. m. S. S., Life cycle assessment (2006). Environmental Management: Life Cycle Assessment: Principles and Framework, ISO.
- Klaesson, J. (2001). "Monopolistic competition, increasing returns, agglomeration, and transport costs." The annals of regional science **35**(3): 375-394.
- Konz, S. and L. C. É. Zazueta (1991). Diseño de instalaciones industriales, Limusa.
- LC3 (2017). from <https://www.lc3.ch/>.
- Lemay, L. (2011). "Life cycle assessment of concrete buildings." Concrete Sustainability Report.
- López, P., et al. (2008). "Estudio Técnico." Recuperado El 13.
- Machado Rivero, L. (2016). Evaluación de la eco-eficiencia del hormigón producido en la UEB-Prefabricados de Remedios a partir de la utilización del cemento de bajo carbono, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- Machado Torres, M. (2015). Comportamiento del bio-producto CBQ-VTC como aditivo plastificante en pastas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Mansfield, E. (1962). "Entry, Gibrat's law, innovation, and the growth of firms." The American economic review: 1023-1051.

Martínez, P. J. and V. J. Vidal (2003). Economía Mundial, McGraw-Hill.

Martirena Hernández, J. (2013). "Cemento ternario en base a arcilla calcinada, carbonato y clínquer."

Martirena Hernández, J., et al. (2015). "LC3 Manual de Calidad."

Müller, N. and J. Harnisch (2008). A blueprint for a climate friendly cement industry. www.panda.org/climatesavers, WWF. Lafarge Conservation Partnership.

Muther, R., et al. (1965). Distribución en planta, Hispano Europea.

Palacio, J. I. (2002). "Política industrial activa para microempresas en el funcionamiento de los mercados: Una perspectiva española." A. Mungaray, JI Palacio y C. Ruiz Durán (coords.), Potencial de la vinculación universitaria para una política microempresarial: Una perspectiva española, México, MA Porrúa-UABC-UCLM.[Links].

Pérez Gálvez, A. and D. Lima Quesada (1998). Diseño preliminar de un molino de bolas para la fabricación de cemento puzolánico, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Perry, G. E., et al. (2008). Informalidad: escape y exclusión, Banco Mundial con Mayol Ediciones.

Pindyck, R. S. and D. L. Rubinfeld (1994). Microeconomía, São Paulo: Makron Books.

Purnell, P. (2013). "The carbon footprint of reinforced concrete." Advances in Cement Research **25**(6): 362-368.

Rouge, C. and R. River (2013).

Sánchez, S., et al. (2015). Assessment of Sustainability of Low Carbon Cement in Cuba. Cement Pilot Production and Prospective Case, in: Calcined Clays for Sustainable Concrete.: 189-194.

Sánchez, S., et al. (2016a). Low carbon cement: a sustainable way to meet growing demand in Cuba. Sustainable Built Environment Regional Conference ETH Zurich. A. Schluter, Habert, G. (Eds.). Zurich: 420-424.

Sánchez, S., et al. (2016b). "Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba." J. Clean. Prod.: 124, 361–369.

Scrivener, K. and A. Favier (2015). Calcined clays for sustainable concrete, Springer.

Schumacher, E. F. (1973). Small is beautiful, Crane Memorial Library.

Smith-Gillespie, A. (2010). Low Carbon Technology Cooperation. A framework for EU-China Dialogue, Third Generation Environmentalism Ltd (E3G).

Smith-Gillespie, A. (2010). "Low Carbon Technology Cooperation. A framework for UE-China Dialogue. Thir Generation ENvaironmentalism Ltd (E3G)."

Ssatarin, W. J. and A. Kisselhoff (1969). "New method for the design calculation of rotary cement kilns." Materiales de Construcción **19**(136): 5-15.

UN-HABITAT (1993). Small Scale Production of Portland Cement., United Nations, Nairobi.

Varian, H. R., et al. (2001). Microeconomía intermedia: un enfoque actual, Antoni Bosch.

Vizcaíno-Andrés, L., et al. (2015). "Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement." Materiales de Construcción **65**(317): 045.

Vizcaíno, L. (2014). Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer–arcilla calcinada-caliza, Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas.

Wiedmann, T. and J. Barrett (2010). "A review of the ecological footprint indicator—perceptions and methods." Sustainability **2**(6): 1645-1693.

Williamson, O. E. (1967). "Hierarchical control and optimum firm size." Journal of political economy **75**(2): 123-138.