

2022-11

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE COGENERACIÓN DE CICLO INFERIOR, EN UNA EMPRESA DE PRODUCTOS CERÁMICOS

PEREIRA CÁRCAMO, ROBERTO SEBASTIÁN

<https://hdl.handle.net/11673/55225>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



“Diseño y Evaluación de un Sistema de Cogeneración de Ciclo Inferior, en una empresa de productos cerámicos”

ROBERTO SEBASTIÁN PEREIRA CÁRCAMO

PEDRO IVÁN PITRIQUEO TORRES

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: ROBERTO LEIVA ILLANES

PROFESOR CORREFERENTE: RODRIGO BARRAZA VICENCIO

NOVIEMBRE 2022

Agradecimientos

Pedro:

Mis más profundos agradecimientos a quienes estuvieron entregando su apoyo y entusiasmo para la realización del presente trabajo de título, a mí compañero Roberto Pereira a quien destaco como el pilar fundamental para la organización y gestión de la tesis, a mi hermano Marco Pitriqueo quien apporto en el área económica del proyecto ORC, además al profesor Roberto Leiva quien nos guio con la adecuada base teórica y de procedimientos.

Este Trabajo de Titulo trae consigo la culminación de una etapa académica importante, pero no solo en el ámbito de los conocimientos sino también en el quehacer cotidiano y profesional, esperando con ello ser un aporte en el desarrollo del país.

Para finalizar espero que uno de los objetivos de nuestro Trabajo de Título sea un aliciente para que en nuestro país se continúe invirtiendo en proyectos de energías renovables y de eficiencia energética, que, aunque requieren de una importante inversión inicial, a largo plazo los beneficios se pagan con creces.

Roberto:

Primero que todo a Dios, forjador de este inmenso desafío y confidente de las ciencias necesarias para mover esta galaxia.

Luego e inmediatamente al lado de Dios, mi madre Ana quien fue la forjadora de este diamante en bruto, poseedora innata de las principales herramientas de vida, entregadas sin nada a cambio a mi persona. De todo corazón y desde lo más profundo de mi alma, ¡GRACIAS POR TU AMOR, TERNURA, FUERZA Y CONFIANZA INCONDICIONAL!

A la alfarera principal de mi vida, mujer aguerrida y especialmente diferente a cualquier otra, quien, con sus manos cargadas de amor, lealtad y ciegamente confiada, ha creído en mí, Fernanda, sin duda alguna, sin tu amor incondicional, el sabor de esta victoria hubiera sido amarga y solitaria, de colores grises y desalineados. Gracias por tu fuerza, cariños y gritos de aliento, cuando a veces se veía todo perdido en el horizonte.

A ti Javi-hermana, sangre de mi sangre, desde la distancia, siempre apoyándome con una palabra o preocupación, Gracias.

A mis padres putativos, Fernando y Patricia, igualmente a la distancia, siempre hubo una palabra de sabiduría, amor y tranquilidad, frente al inmenso temporal. Gracias por todo.

A mi colega y amigo Pedro, complemento de este anhelado desafío, quien con el finalizo. Gracias cumpa.

A mis hijas perrunas, incondicionalmente entregando amor... Miel y Chica. Gracias.

A mis amigos a la distancia, del barrio, de música, de carretes. Gracias por su preocupación y amistad incondicional, un abrazo a todos.

A la música, por adornar con sus melodías, todo momento...

Dedicatoria

Pedro:

Dedico el presente TT a todos quienes en su oportunidad brindaron su ayuda y compartieron su experiencia y conocimientos durante el transcurso de la carrera, a compañeros, colegas y familiares que de una u otra manera aportaron para que este TT llegara a buen puerto.

Roberto:

Los años dedicados a este trabajo, el esfuerzo y la perseverancia incluida también, van dirigidos a mi compañera de vida Fernanda, quien ha ocupado un lugar protagónico dentro de mi vida, a mi madre, y a todos los que, en algún minuto del desarrollo de este trabajo, aportaron no solo con su conocimiento técnico, sino con una palabra de aliento y sabiduría...

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Agradecimientos.....	1
Dedicatoria.....	3
I. Resumen Ejecutivo.....	9
II. Abstract	10
III. Introducción.....	11
IV. Objetivos.....	12
V. Abreviaciones.....	13
CAPITULO 1: INTRODUCCION AL PROCESO Y BALANCE ENERGETICO.....	14
1.1. Introducción al Capitulo.....	14
1.2. Reseña Empresa: Cerámica Santiago.....	15
1.3. Proceso Productivo en la elaboración de productos cerámicos.....	17
1.3.1. La Arcilla	18
1.3.2. Maduración	19
1.3.3. Pre elaboración	20
1.3.4. Depósito de materia prima procesada.....	21
1.3.5. Elaboración.....	22
1.3.6. Moldeado (vacío, extrusión y corte).....	23
1.3.7. Secado.....	24
1.3.8. Cocción.....	25
1.3.9. Almacenaje (Bodegas, patio y paletizado)	26
1.4. Proceso de cocción de ladrillos en un horno	27
1.4.1. Clasificación de los hornos:.....	28
1. Intermitentes	28
2. Semicontínuos.....	28
3. Continuos	28
1.5. Breve descripción de la oportunidad de mejora	31
1.6. Volumen de Control.....	31
1.7. Primera Ley de la Termodinámica: “Conservación de la Energía”	32
1. Potencia Calorífica pérdida por gases de la combustión:	33
2. Potencia Calorífica por extracción a secadero:.....	35
3. Potencia Calorífica por enfriamiento:.....	35

4.	Potencia Calorífica por cocción de ladrillos.....	36
5.	Potencia Calorífica de los combustibles.....	39
1.8.	Combustibles utilizados	39
1.8.1	GLP (Gas licuado de petróleo).....	39
1.8.2.	Biomasa (Aserrín)	39
6.	Potencia Calorífica de pérdidas en el horno	40
1.9.	Diagrama Sankey del horno de cocción.....	45
CAPITULO 2: FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL PROYECTO.....		50
2.1.	Introducción al Capítulo.....	50
2.2.	Ciclo de Rankine	51
2.2.1	Componentes de un sistema funcionando con un Ciclo de Rankine.....	52
2.2.2	Eficiencia del Ciclo ORC	54
2.3	Selección General.....	55
2.3.1	Selección del equipo ORC.....	55
2.3.2	Diseño del intercambiador de calor en la chimenea para el equipo ORC	58
2.3.3	Selección del sistema de enfriamiento del condensador	61
2.3.4	Selección de conjunto suministro de agua para intercambiador de calor y torre de enfriamiento respecto al ORC	63
2.4	Situación actual versus futuro, en relación al consumo de electricidad en Planta Cerámica Santiago.....	63
2.5	Generalidades con respecto al equipo ORC.....	66
2.6	Ventajas del Equipo ORC	67
CAPITULO 3: FACTIBILIDAD ECONOMICA DEL PROYECTO.....		69
3.1	Introducción al Capítulo.....	69
3.2	Inversión Inicial.....	69
3.3	Costo equipo ORC	70
3.4	Costo de conjunto Torre de Enfriamiento	70
3.5	Costo conjunto intercambiador de calor.....	71
3.6	Costo total de las instalaciones del equipo ORC.....	71
3.7	Ingreso debido a la generación de electricidad por el proyecto	72
3.8	Costo por consumo de electricidad por el proyecto	72
3.9	Costo por Mantenimiento.....	73
3.10	Depreciación.....	74

3.11	Criterios de evaluación económica	74
3.12	Criterios para evaluar la TIR	75
3.13	Tasa de descuento.....	76
3.14	Tasa libre de riesgo	78
3.15	Cálculo de la tasa de descuento.....	79
3.16	Impuesto a las utilidades	80
3.17	Flujo de caja y definición de sus ítems	80
3.18	Flujo de caja	81
3.19	Calculo del VAN, TIR y Payback.....	83
3.20	Análisis de Sensibilidad para el VAN y la TIR	85
3.21	Análisis bidimensional	86
CAPITULO 4: IMPACTO EN EL PROCESO PRODUCTIVO		88
4.1.	Introducción al Capitulo.....	88
4.2.	Introducción a los conceptos de productividad y producción	88
1.	Productividad Total.....	89
2.	Productividad Parcial.....	89
4.3.	Calculo de productividad total	91
1.	Mano de obra	91
2.	Materiales	91
3.	Energía.....	92
4.	Capital.....	93
5.	Gastos Generales	94
4.4.	Productividad Parcial Insumo Electricidad	96
VI.	CONCLUSIONES.....	98
VII.	RECOMENDACIONES	99
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS.....		103
Anexo A.	Detalle cotización intercambiador de calor, bomba y piping de sistema.	103
Anexo B.	Detalle cotización torre de enfriamiento, bomba y piping.	104
Anexo C.	Detalle cotización montaje electromecánico de sistema.	105
Anexo D.	Detalle cotización equipo ORC.....	106
Anexo E.	Propiedades del aire a 1 atm de presión.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura n°1	Ubicación de Planta Industrial Batuco, Cerámica Santiago. [2].....	16
Figura n°2	Diagrama del proceso para elaborar productos cerámicos.....	17
Figura n°3	Arcilla.....	18
Figura n°4	Sector de acopio de Arcilla.	19
Figura n°5	Sector de inicio de proceso.....	20
Figura n°6	Sector de acopio arcilla procesada.	21
Figura n°7	Arcilla procesada, en proceso de elaboración.	22
Figura n°8	Proceso de moldeado de productos.	23
Figura n°9	Vagonetas cargadas con productos en un secadero.....	24
Figura n°10	Vista interior de un horno tipo túnel.	25
Figura n°11	Patio donde se almacenan los productos terminados.	26
Figura n°12	Bosquejo ilustrativo que muestra túnel continuo de cocción de ladrillos.	27
Figura n°13	Curva de temperatura teórica (en color negro), y real (en color verde) del horno de cocción, proporcionada por Cerámica Santiago.....	30
Figura n°14	Bosquejo que muestra volumen de control seleccionado para comenzar a analizar.	31
Figura n°15	Pellets.	39
Figura n°16	Corte muestra materialidad horno túnel.	41
Figura n°17	Volumen de control (CASO BASE).	42
Figura n°18	Diagrama Sankey del proceso (CASO BASE).	45
Figura n°19	Volumen de control (CASO CON PROYECTO).....	46
Figura n°20	Diagrama Sankey del proceso (CASO CON PROYECTO).	49
Figura n°21	Diagrama del sistema ORC.....	52
Figura n°22	Equipo Modelo LT1 empresa española Rank.	55
Figura n°23	Extracto de catálogo Fabricante Rank, España.	56
Figura n°24	Ficha técnica intercambiador de calor de la chimenea.....	59
Figura n°25	Configuración de los tubos del intercambiador de calor de la chimenea.....	60
Figura n°26	Extracto de catálogo Fabricante SINAX, Argentina. Selección torre enfriamiento.	62
.....	62
Figura n°27	Extracto catálogo Fabricante SINAX, Argentina.....	62

Figura n°28	Precio medio de mercado sistema eléctrico nacional (PMM SEN).	64
Figura n°29	Tasa interna de retorno. [16]	75
Figura n°30	Tasa libre de riesgo.	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla n°1	Valores conductividad y resistencias de materialidad horno túnel.	41
Tabla n°2	Dimensiones del horno túnel.	42
Tabla n°3	Resumen de potencias asociadas al horno caso base.	44
Tabla n°4	Resumen potencias asociadas al horno “caso futuro” y “caso base”.	48
Tabla n°5	Parámetros selección equipo ORC.	57
Tabla n°6	Costo equipo ORC (valor conversión euro \$ 927).	70
Tabla n°7	Costo accesorios torre de enfriamiento.	70
Tabla n°8	Costos accesorios intercambiador de calor.	71
Tabla n°9	Costo total instalaciones.	71
Tabla n°10	Costo total del proyecto.	72
Tabla n°11	Tabla Tasa libre de riesgo real.	79
Tabla n°12	Flujo de Caja.	81
Tabla n°13	Flujo de caja acumulado para cálculo del Payback.	84
Tabla n°14	Análisis de sensibilidad Caso base.	85
Tabla n°15	Análisis bidimensional.	86
Tabla n°16	Precio general de materiales de la arcilla.	91
Tabla n°17	Precio de combustibles.[24]	93
Tabla n°18	Resumen capital.	93
Tabla n°19	Gastos generales.	94
Tabla n°20	Características del ladrillo Santiago TE 11. [25]	95

I. Resumen Ejecutivo

El presente trabajo viene a desarrollar la evaluación de la implementación de un equipo “Organic Rankine Cycle” que trabaja en base a un ciclo termodinámico de Rankine aplicado al proceso de cocción de productos cerámicos, en este caso ladrillos en un horno de cocción del tipo túnel continuo. Dado lo anterior, se han desarrollado cuatro capítulos los cuales abarcan desde la recopilación de información de los procesos que posee la empresa actualmente y que lleva a cabo, para el posterior análisis técnico/económico en función de esta nueva implementación. En el último capítulo, se evalúan escenarios con respecto al nivel de productividad con que la empresa convive actualmente.

Los motivos que llevaron a decidir evaluar este tema en particular, son los siguientes: desde el punto de vista específico, el proceso de cocción de ladrillos cuenta con una cantidad de energía disponible, en forma de calor que actualmente se está desechando y que podría servir para generar energía eléctrica o para calentar agua, así destinar cualquiera de las dos posibilidades en beneficio de la empresa. Ahora, de forma general, el poco auge que aún persiste a nivel país por abordar los procesos de cogeneración y trigeneración de la energía desde el punto de vista de la eficiencia y posterior mejora de variados procesos industriales.

Se concluye que para el capítulo de factibilidad técnica es viable la implementación del sistema ORC, no así para el caso del capítulo de factibilidad económica, este mismo arroja indicadores negativos los cuales muestran inviabilidad del proyecto. Se observa que solo el impacto desde el punto de vista de la producción ha mostrado que a pesar de que el indicador de productividad parcial como concepto de electricidad del proceso de cocción mejoro cerca de 1%, la mejora a la productividad total se mantiene sin cambios.

II. Abstract

The present work develops the evaluation of the implementation of an "Organic Rankine Cycle" equipment that works on the basis of a thermodynamic Rankine cycle applied to the firing process of ceramic products, in this case bricks in a continuous tunnel kiln. Given the foregoing, four chapters have been developed, which cover from the information gathering on the processes that the company currently has and conducts, to the subsequent technical/economic analysis based on this new implementation. In the last chapter, scenarios are evaluated in regard to the level of productivity which the company has and currently coexists. The reasons that led the decision to evaluate this particular subject are the following: from the specific point of view, the brick firing process has an amount of available energy in the form of heat that is currently being wasted and could be used to generate electricity or to heat water, thus both possibilities could be allocated for the benefit of the company. Now, in general terms, it remains a lack of interest in the country in the cogeneration and trigeneration of energy from efficiency and subsequent improvement point of view of various industrial processes.

It is concluded that the implementation of the ORC system is feasible for the technical feasibility chapter, but not for the economic feasibility chapter, which yielded negative indicators that show the project's unfeasibility. It is observed that only the impact from the production point of view has shown that although the partial productivity indicator as a concept of electricity from the firing process improved by about 1%, the improvement in total productivity remains unchanged.

III. Introducción

Actualmente la planta de productos cerámicos, en el proceso de cocción en el horno, inyecta mediante quemadores, una cantidad de energía en forma de calor principalmente para lograr la cocción de los productos, existe una cantidad de calor residual que no se utiliza, desechada por medio de los gases de combustión, por lo tanto la disponibilidad de ocupar esta cantidad de calor, implica para esto, evaluar la implementación de un equipo ORC, basado en un ciclo orgánico de Rankine para la producción de energía eléctrica, mediante el proceso de cogeneración aplicado a la cocción de ladrillos en un túnel continuo, donde se entiende por cogeneración la producción simultánea de calor y electricidad a partir de uno o varios recursos energéticos.

IV. Objetivos

- Evaluar las condiciones de operación del proceso de cocción de ladrillos en el túnel ladrillero, junto con los procesos que influyen en su funcionamiento.
- Analizar el proceso de cocción de los ladrillos en orden a establecer la distribución de los flujos de energía dentro del proceso.
- Presentar una solución a nivel conceptual que permita aprovechar el calor residual, que se está desechando por medio de los gases de combustión.
- Realizar una evaluación técnica/económica de la solución planteada.
- Evaluar el impacto en el proceso productivo, de la solución propuesta, por medio del cálculo de la productividad.

V. Abreviaciones

- 1) GEI: Gases de Efecto Invernadero
- 2) CNE: Comisión Nacional de Energía
- 3) CDEC: Centro de despacho económico de carga
- 4) SIC: Sistema interconectado central
- 5) SING: Sistema interconectado del norte grande
- 6) CAPM: (Capital Asset Pricing Model) Modelo de variación de activos financieros
- 7) IPSA: Índice selectivo de precio de acciones
- 8) RRHH: Recursos humanos
- 9) ORC: (Organic Rankine Cycle) Ciclo orgánico de Rankine
- 10) GLP: Gas Licuado de Petróleo
- 11) ERNC: Energías Renovables No Convencionales

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN AL PROCESO Y BALANCE ENERGÉTICO

1.1. Introducción al Capítulo

La generación de energía y de que fuentes proviene, ha sido en Chile un tema a resolver durante años. Principalmente la matriz energética, ha estado compuesta por combustibles fósiles, y recién hace un par de años atrás, esta misma se vio apoyada por fuentes de energía renovables no convencionales (tales como: eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, etc.)

Dado el auge de las ERNC, como país hemos volcado un tanto la mirada hacia estas mismas, tratando de forma paulatina, incorporarlas al debate energético y su eventual implementación.

Es importante también destacar que, parte de este apoyo a la matriz energética ha sido mediante nuevas tecnologías en cuanto a equipamiento, en donde los equipos que funcionan con un ciclo orgánico de rankine en sus diferentes configuraciones de temperatura de trabajo, vienen a ofrecer una alternativa de cogeneración real y adaptable a variadas industrias de nuestro país.

1.2. Reseña Empresa: Cerámica Santiago

Cerámica Santiago, empresa que fabrica tejas y productos cerámicos finos derivados de la arcilla, destinados a la construcción de viviendas, remonta el inicio de sus operaciones en el año 1917, con su primera planta industrial ubicada en la comuna de Traiguén, Región de la Araucanía.

El reconocimiento de los clientes frente al progreso de la planta Traiguén no se dejó esperar. Ya en 1977, es preferida por la excelente calidad de sus productos, la belleza estética de ellos y sus precios competitivos, además, sus instalaciones entregaban el 70% de sus artículos a empresas constructoras de Santiago y la Región Metropolitana, no obstante, los 600 kilómetros que separan a ambos puntos geográficos. Hoy, la fábrica de Traiguén sigue funcionando con eficiencia, con una capacidad de producción de 400.000 unidades por mes.

A inicios de la década del 80, Cerámica Santiago comienza a crecer y a fines de 1981 entra en operaciones la planta de Batuco, con una capacidad inicial de 400.000 ladrillos/mes. Para incrementar su capacidad productiva y dar respuesta a las necesidades del mercado, en 1986 es ampliada, alcanzando una producción de 1.200.000 ladrillos/mes.

En 1991, Cerámica Santiago, realiza nuevas inversiones destinadas a mejorar la productividad de dicha planta llegando a producir 2.400.000 ladrillos/mes. Cerámica Santiago adquiere, en 1994, la planta de Quilicura, cuya capacidad actual es de 1.600.000 ladrillos/mes.

El 5 de mayo de 1999, su Excelencia el Presidente de la República don Eduardo Frei, inaugura en Batuco una nueva planta con una capacidad de 15.000 toneladas/mes. La 2ª línea de producción de esta nueva planta, incrementa la capacidad de 28.000 toneladas/mes (aproximadamente 11.000.000 ladrillos/mes) queda operativa el 30 de septiembre de 1999.

En la actualidad, Cerámica Santiago (Figura N°1, se puede observar ubicación de esta) es la empresa líder en la producción y comercialización de productos cerámicos prensados al vacío, con una participación de mercado nacional de un 60% y es reconocida por la calidad de sus productos, el abastecimiento constante y el servicio en la venta, lo que la ha llevado a mantener relaciones comerciales de largo plazo con sus clientes. [1]



Figura n°1 Ubicación de Planta Industrial Batuco, Cerámica Santiago. [2]

1.3. Proceso Productivo en la elaboración de productos cerámicos

La Figura N°2 muestra de manera general, un diagrama de proceso productivo para productos cerámicos. [3]

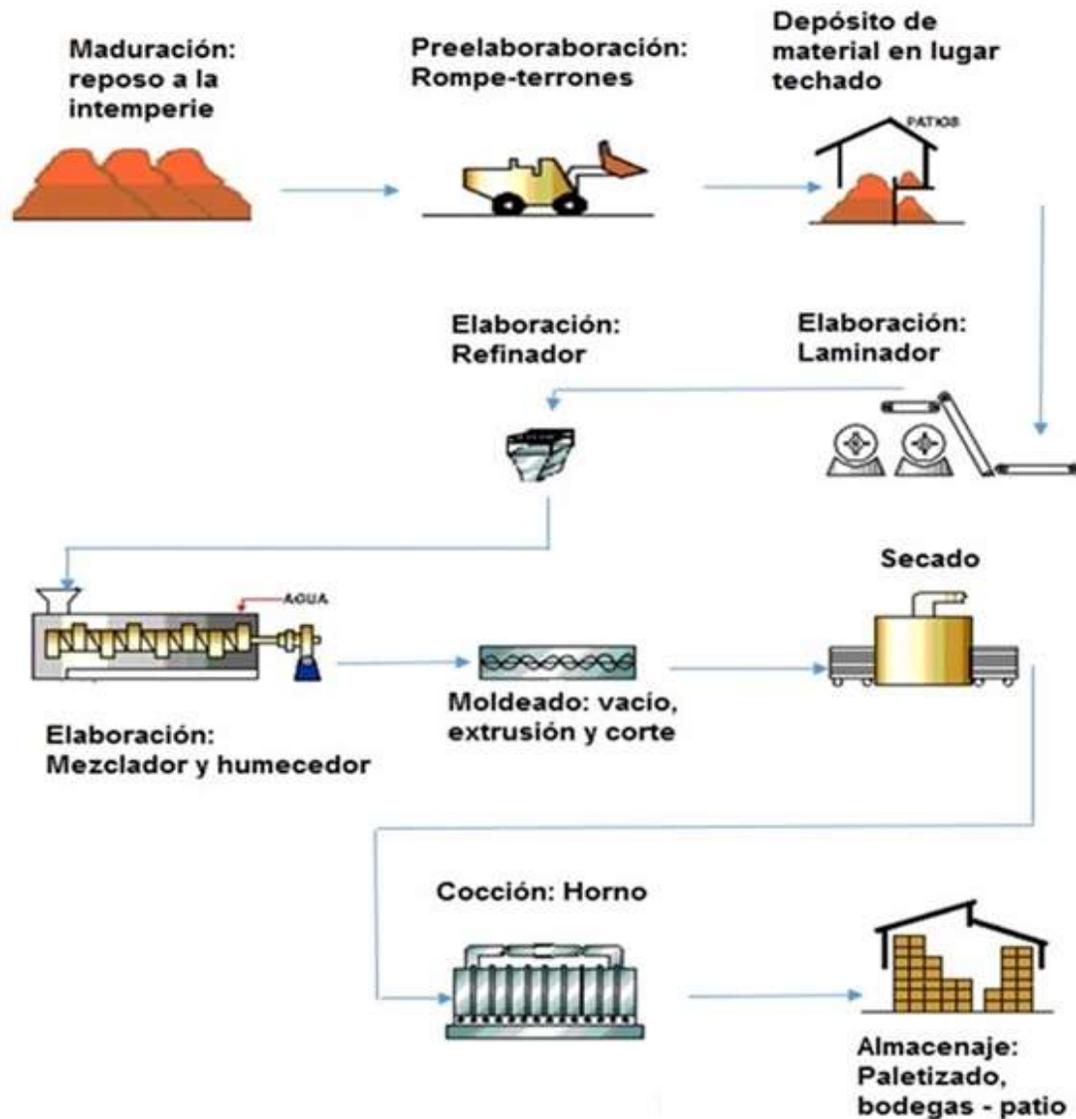


Figura n°2 Diagrama del proceso para elaborar productos cerámicos.

Cada uno de estos procesos será descrito a continuación.

1.3.1. La Arcilla

Es la materia prima principal en la fabricación de ladrillos, está compuesta de sílice, alúmina, agua y cantidades variables de hierro y otros materiales alcalinos. Es muy dúctil al ser preparada con agua por lo cual mejora su plasticidad y al pasar a la etapa de secado o cocción adquiere una notable solidez con una disminución de masa (de alrededor de 5% a 15%) en proporción a su plasticidad inicial. [4]



Figura n°3 Arcilla.

1.3.2. Maduración

El proceso de maduración se divide en dos etapas, el reposo a la intemperie y la exposición a la acción atmosférica (aire, lluvia, sol, hielo, etc.) la primera tiene como finalidad que la arcilla adquiera una adecuada consistencia y uniformidad de las características físicas y químicas por medio de tratamientos de trituración, homogeneización y reposo en acopio. La segunda etapa facilita la trituración de los terrones favoreciendo la descomposición de la materia orgánica y permitiendo la purificación química del material.



Figura n°4 Sector de acopio de Arcilla.

1.3.3. Pre elaboración

Posterior al proceso anterior, que se produce en la zona de acopio, sigue el proceso de pre-elaboración que consiste en una serie de fases u operaciones que tienen la finalidad de limpiar y refinar la materia prima (Figura N°5). Los equipos utilizados en el proceso de pre-elaboración son los siguientes:

Rompe-terrones: Sirve para disminuir las dimensiones de los terrones hasta 15 y 30 mm de diámetro.

Eliminador de piedras: Esto lo componen dos cilindros que giran a diferentes velocidades, capaces de separar la arcilla de las piedras.

Desintegrador: Está destinado para triturar los terrones más grandes y más duros por intermedio de una serie de cilindros dentados.

Laminador refinador: Está constituido por dos cilindros rotatorios lisos montados en ejes paralelos, con separación entre sí de 1 a 2 mm, espacio por el cual pasa la arcilla sufriendo un aplastamiento y un planchado que afina aún más las partículas obteniendo la eventual trituración de los últimos nódulos que pudiesen estar aún en el interior del material.



Figura n°5 Sector de inicio de proceso.

1.3.4. Depósito de materia prima procesada

En la Figura N°6 se puede observar que la materia prima se deja acopiada bajo techo.

Es importante destacar que la materia prima debe quedar completamente junta y homogénea, principalmente en apariencia.



Figura n°6 Sector de acopio arcilla procesada.

1.3.5. Elaboración

Previo a la etapa de moldeo, se retira la arcilla de los sitios y se traslada a un laminador refinador (Figura N°7).

Luego a un mezclador humedecedor, donde se incorpora agua para así obtener la humedad precisa.



Figura n°7 Arcilla procesada, en proceso de elaboración.

1.3.6. Moldeado (vacío, extrusión y corte)

El proceso de moldeado consiste principalmente en entregarle a la materia prima ya en condiciones previamente obtenidas, la forma establecida, es por eso que la extrusora, es muy importante en esta etapa (Figura N°8).

Comúnmente el proceso de moldeado se realiza en caliente (utilizando vapor saturado a 130°C) y al vacío. De tal manera se obtiene una humedad más uniforme, el vapor tiene una mayor capacidad de penetración que el agua, y una masa más compacta.

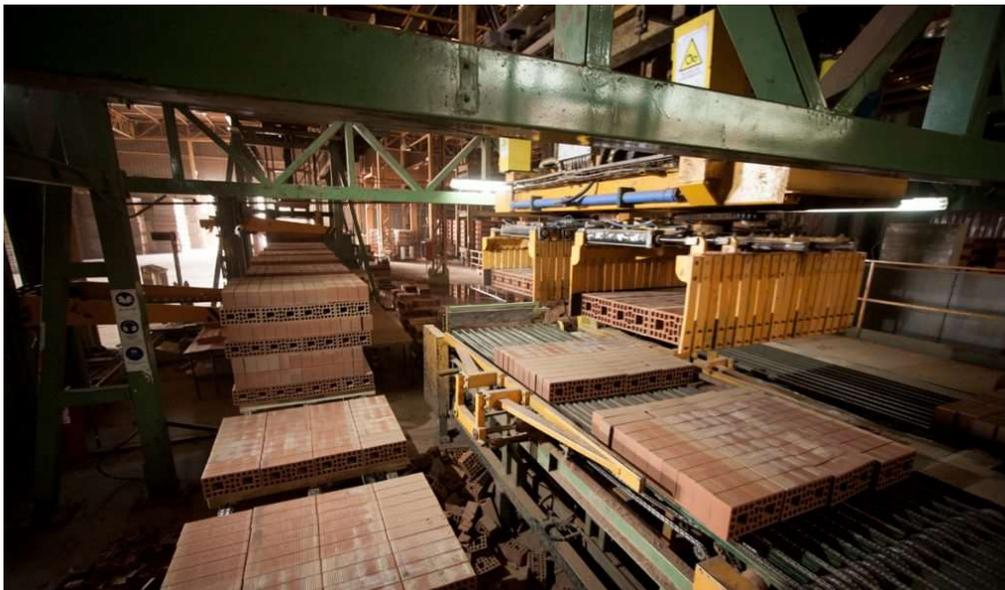


Figura n°8 Proceso de moldeado de productos.

1.3.7. Secado

Este proceso, probablemente debe ser uno de los más “delicados” en términos de mantener la calidad superficial de los productos.

Aquí, es donde posterior a la fase de maduración, los productos son destinados a un recinto designado como secadero, en donde mediante masas de aire caliente se le extrae la humedad obtenida en los procesos anteriores. Esta etapa debe ser controlada exhaustivamente (humedad y temperatura), ya que cualquier parámetro en exceso, puede impactar directamente en la calidad superficial de los productos cerámicos, generando por ejemplo fisuras o grietas por sobrecalentamiento de estos, en la Figura N°9 se pueden observar vagonetas cargadas de ladrillos en pleno proceso de secado.



Figura n°9 Vagonetas cargadas con productos en un secadero.

1.3.8. Cocción

La cocción, también no deja de ser importante debido a que los productos cerámicos son ingresados a un túnel de cocción, lugar donde estos son sometidos al punto de cocción.

El túnel de cocción posee una longitud de 120 m aproximadamente, el cual se divide en tres fases: precalentamiento, cocción y enfriamiento. La temperatura se incrementa de forma paulatina y controlada por medio de termocuplas y quemadores que funcionan en conjunto.

La temperatura de la zona de cocción oscila entre 900°C y 1.000°C.

Los productos son trasladados en carros/vagonetas, las cuales alimentan por un extremo el túnel, y salen por el extremo opuesto. En la Figura N°10 un carro vagoneta avanzando al interior de un túnel de cocción de ladrillos.



Figura n°10 Vista interior de un horno tipo túnel.

1.3.9. Almacenaje (Bodegas, patio y paletizado)

Previo al traslado posterior al patio, se realizan paquetes de ladrillos ordenados de forma estratégica, los cuales se almacenarán de forma transitoria (Figura N°11).

Los productos son trasladados al patio, por medio de grúas horquillas, y si en la eventualidad serán despachados de forma inmediata, estos son puestos sobre camión.



Figura n°11 Patio donde se almacenan los productos terminados.

1.4. Proceso de cocción de ladrillos en un horno

La primera zona, cuya longitud es aproximadamente 1/3 de la longitud total del horno, se relaciona al precalentamiento del ladrillo; las piezas alcanzan gradualmente la temperatura con el calor de los gases de combustión en contracorriente con la carga, los cuales son extraídos del horno mediante un ventilador. Seguidamente se encuentra la zona de cocción, donde se presenta la cocción del ladrillo, debido a la alta temperatura asociada a la combustión del combustible, mediante quemadores de GLP y biomasa (en este caso) ubicados en la parte superior del horno. La tercera zona se destina al enfriamiento de las piezas. El enfriamiento se realiza en contracorriente con el aire inyectado por la parte superior del horno mediante dos ventiladores en paralelo. Parte de este aire es ocupado como aire secundario de combustión y el resto es extraído después del enfriamiento por un ventilador que lo induce fuera del horno a una elevada temperatura (100°C).

La primera etapa es la de precalentamiento, y consiste en eliminar completamente el agua físicamente de los ladrillos cuando la temperatura de estos alcanza los 200°C, este proceso se realiza en forma continua y paulatina a través del aire caliente a contraflujo que circula a través de los ladrillos (Figura N°12).

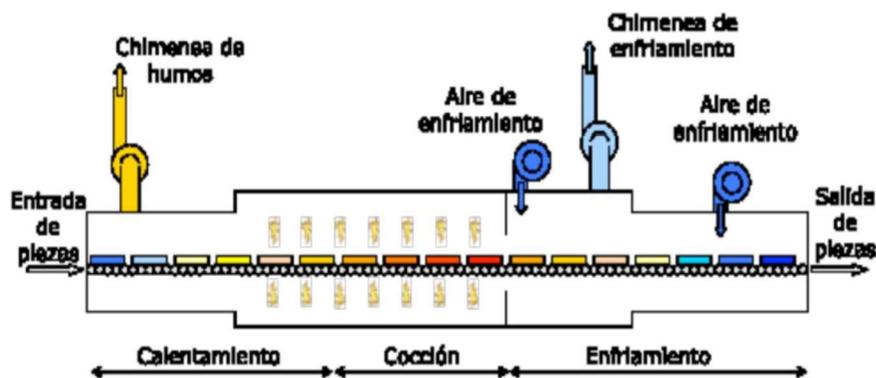


Figura n°12 Bosquejo ilustrativo que muestra túnel continuo de cocción de ladrillos.

La segunda etapa es la de cocción teniendo como finalidad eliminar el agua químicamente pura de los ladrillos llegando la temperatura hasta los 1.000°C, es donde ocurre la maduración del ladrillo y adquiere propiedades referentes a la resistencia mecánica y grado de porosidad. [5]

La última etapa, es la de enfriamiento de las piezas.

1.4.1. Clasificación de los hornos:

La clasificación de los hornos comúnmente va en función de la tecnología y la cantidad de producción que se quiere lograr. Dado lo anterior, cabe mencionar los siguientes tipos:

1. Intermitentes
2. Semicontínuos
3. Continuos

1. Hornos Intermitentes

Estos hornos son conocidos debido a que tienen cámaras independientes, en los que las piezas, la etapa de cocción y la de enfriamiento quedan en posición fija durante la totalidad del proceso. En función de lo anterior el esquema de los procesos que considera este tipo de horno son los siguientes: entrada de los productos, precalentamiento, cocción de los productos, enfriamiento de los productos, y salida de los productos.

El periodo o tiempo de cada una de estas etapas depende en gran medida del producto que se someterá a cocción.

2. Hornos Semicontínuos

Este tipo de horno es muy parecido al horno continuo, la carga de las piezas cerámicas se realiza sobre vagonetas o carros, recorriendo estos el túnel de cocción o galería, la diferencia que tiene este horno con respecto a los continuos es que las vagonetas son cargadas en un turno o dos turnos de trabajo, estos deben ser introducidos completamente en el túnel, por lo tanto, no existe almacenamiento de reserva. Por último, el funcionamiento de este horno es similar al de un horno intermitente durante las horas de descanso del personal correspondiente.

3. Hornos Continuos

Son una solución más rentable en la fabricación de productos cerámicos. Se caracterizan debido a su tecnología más avanzada, a la no interrupción de las etapas, evitando con esto variar el ritmo de la producción.

La planta en este caso posee un horno tipo túnel continuo. Las piezas ingresan al horno sobre vagonetas que se desplazan a lo largo del túnel de cocción. Además, mantienen un ritmo de avance predeterminado caracterizándose por una curva de cocción o calentamiento del horno. Conforme las vagonetas avanzan con el producto, pasan por una zona fija donde existen quemadores, lugar donde se produce la cocción.

La longitud del horno varía entre 80 a 120 m. El combustible se suministra por la parte superior mediante un sistema de transporte neumático. Este horno es utilizado por industrias altamente tecnificadas y con altos niveles de producción.

Las razones que han justificado la implantación de estos hornos en la industria cerámica responden a lo siguiente.

- El aire y los gases de combustión circulan en sentido inverso al de los ladrillos.
- El aire que entra por la boca de descarga del horno se calienta progresivamente en contacto con las piezas cocidas en su fase de enfriamiento.

Las llamas y los gases de combustión pasan por la zona de cocción transfiriendo su energía antes de escapar a la atmósfera. [6]

En la Figura N°13, es posible apreciar el comportamiento “teórico y “real” del horno continuo de cocción de ladrillos de la empresa Cerámica Santiago, como se indica en el eje de las abscisas muestra las termocuplas instaladas a lo largo del túnel de cocción, siendo estas las responsables de sensor o tomar las lecturas de temperaturas que se están dando en los sectores. Por otro lado, en el eje de las ordenadas, figuran las temperaturas que eventualmente podrían llegar los sectores del túnel.

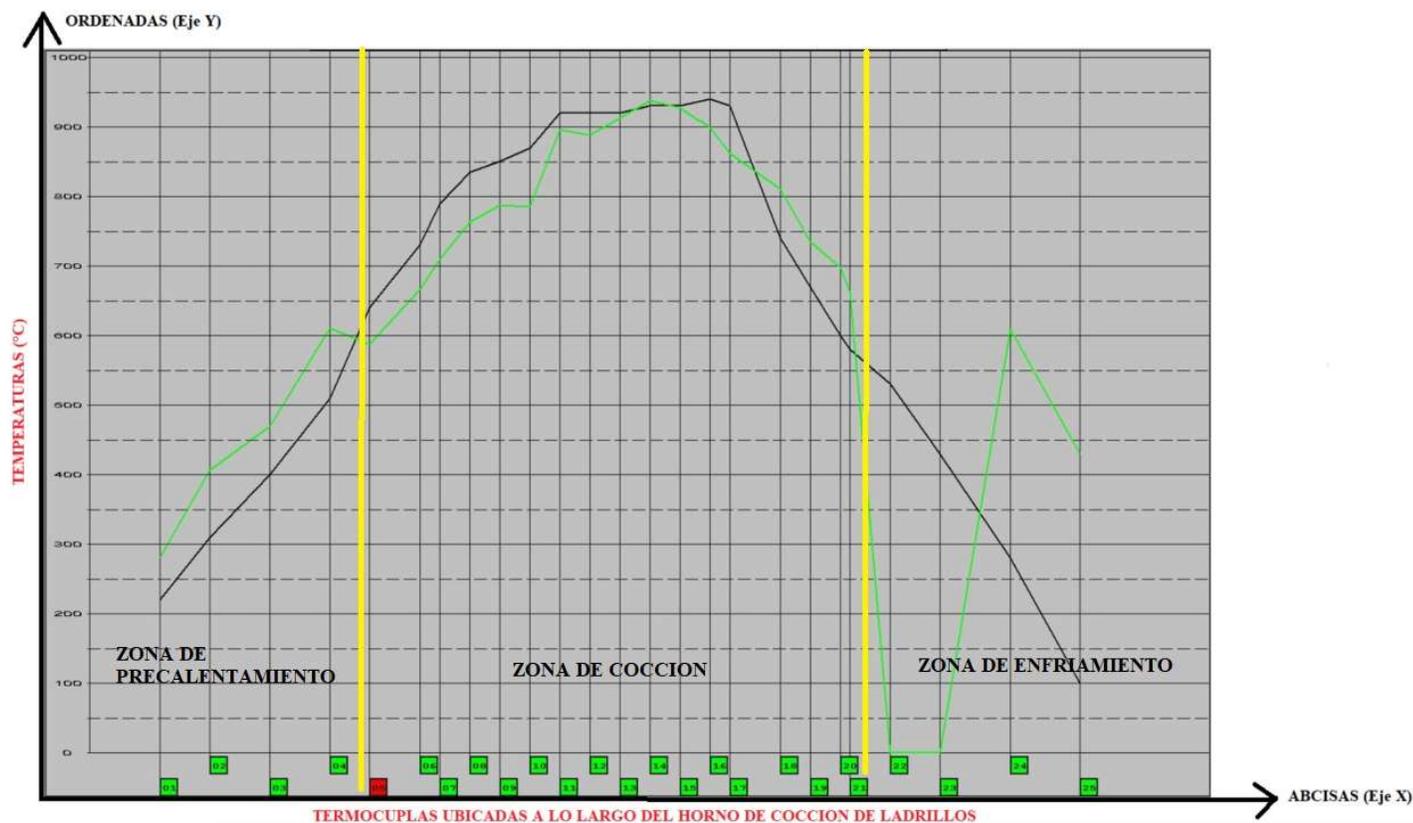


Figura n°13 Curva de temperatura teórica (en color negro), y real (en color verde) del horno de cocción, proporcionada por Cerámica Santiago.

1.5. Breve descripción de la oportunidad de mejora

El objetivo principal es evaluar la implementación de un sistema ORC en un horno tipo túnel para cocción de productos cerámicos, producto de esto se realizará un análisis técnico-económico de lo que implica llevar a cabo el proyecto. La revisión de las condiciones actuales en que se desempeña la planta es de suma importancia, para así obtener valores reales, con los cuales se pretende analizar posibles mejoras a implementar.

Para comenzar, se obtendrá la cantidad de energía disponible en forma de calor residual que se puede extraer del proceso de escape de los gases de combustión, ocurrido en un horno de cocción de ladrillos.

1.6. Volumen de Control

Para obtener las potencias caloríficas de entrada y salida del horno de cocción a evaluar, sigue a continuación (Figura N°14) el volumen de control correspondiente al caso base:

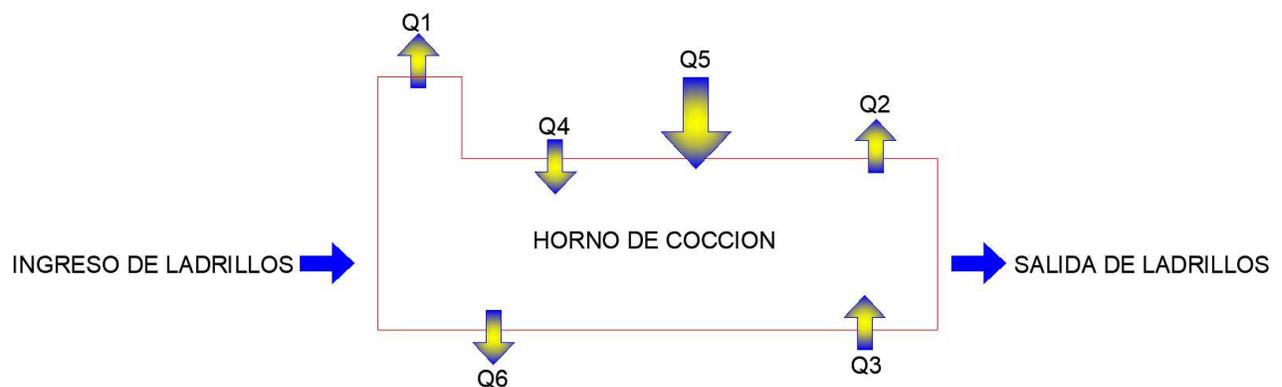


Figura n°14 Bosquejo que muestra volumen de control seleccionado para comenzar a analizar.

En función del volumen de control del caso base, se deducen las siguientes potencias caloríficas:

- $\dot{Q}1 = \text{Potencia Calorífica perdida por gases de la combustión}$
- $\dot{Q}2 = \text{Potencia Calorífica por extracción a secadero}$
- $\dot{Q}3 = \text{Potencia Calorífica por enfriamiento}$
- $\dot{Q}4 = \text{Potencia Calorífica por cocción de ladrillos}$
- $\dot{Q}5 = \text{Potencia Calorífica por combustibles}$
- $\dot{Q}6 = \text{Potencia Calorífica por pérdidas del horno}$

1.7. Primera Ley de la Termodinámica: “Conservación de la Energía”

La primera ley de la termodinámica establece que la energía no se crea, ni se destruye, solo se transforma, cumpliéndose el principio de la conservación de la energía. Entonces esta ley expresa que, cuando un sistema es sometido a un ciclo termodinámico, el calor cedido por el sistema será igual al trabajo recibido por el mismo, y viceversa.

La ecuación general de la primera ley de la termodinámica, para un sistema abierto, se expresa como:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{sal} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right)_{sal} - \sum_{ent} \dot{m} \left(h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right)_{ent} \quad (\text{ec. 1})$$

Dónde:

- $\dot{Q} = \text{Potencia}$
- $\dot{W} = \text{Trabajo}$

$\left(h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right)_{ent}$ y $\left(h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right)_{sal}$, son la energía por unidad de masa del flujo y comprende la entalpia, energía potencial y energía cinética:

donde:

h = entalpia

V = velocidad

g = aceleración de gravedad

z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia

La ecuación anterior queda expresada de la siguiente forma:

$$\dot{Q} = \dot{m} c \Delta T = \dot{m} \Delta h \quad (\text{ec. 2})$$

donde:

\dot{m} = flujo másico

c = calor específico

ΔT = diferencia de temperatura

Todos los flujos de potencia que se vienen a describir a continuación, se han obtenido con el calor específico en función de la temperatura analizada en el sector.

Balance de Energía:

Las siguientes potencias caloríficas, corresponden a las obtenidas en función del volumen de control.

1. Potencia Calorífica pérdida por gases de la combustión:

Estos gases de combustión están siendo extraídos a una temperatura de 100°C, y de acuerdo a esto se obtendrá desde las tablas termodinámicas del aire, la densidad a esta temperatura.

- Caudal de aire (Q) = 20,7 m³/s (entregado por Cerámica Santiago).
- Presión = atmosférica = 101.325 Pa
- Calor específico = 1,009 $\frac{KJ}{Kg \cdot K}$ a 100°C

- Temperatura inicial = 0°C
- Temperatura final = 100°C
- Densidad (ρ) a 100°C = 0,9458 kg/m³ [Anexo E]

Se obtiene el flujo másico:

$$\dot{m}_1 = Q * \rho \quad (\text{ec. 3})$$

Dónde:

$$\dot{m} = \text{Flujo masico} \left(\frac{kg}{s} \right)$$

$$Q = \text{Caudal de aire} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$\rho = \text{Densidad} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$\dot{m}_1 = 20,7 * 0,9458 = 19,57 \text{ (kg/s)}$$

Por lo tanto, la primera potencia calorífica es la siguiente:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Dónde:

$$\dot{Q} = \text{Potencia calorífica}$$

$$\dot{m} = \text{Flujo másico}$$

$$C_p = \text{Calor específico a la temperatura asociada en sector}$$

$$\Delta T = \text{Diferencia de temperatura}$$

Reemplazando:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = 19,57 \cdot 1,009 \cdot (100 - 0) = 1.974,61 \text{ kW}$$

2. Potencia Calorífica por extracción a secadero:

Este caudal está siendo extraído a una temperatura de 140°C, así se obtendrá la densidad.

- Caudal de aire: 15,34 m³/s (entregado por Cerámica Santiago).
- Presión = atmosférica = 101.325 Pa
- Calor específico = 1,013 $\frac{KJ}{kg \cdot K}$ a 140°C
- Temperatura inicial = 0°C
- Temperatura final = 140°C
- Densidad (ρ) a 140°C = 0,8542 kg/m³ [Anexo E]

El flujo másico (\dot{m}) es el siguiente:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho$$

$$\dot{m} = 15,34 \cdot 0,8542 = 13,10 \text{ (kg/s)}$$

Por lo tanto, la segunda potencia calorífica es la siguiente:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = 13,10 \cdot 1,013 \cdot (140 - 0) = 1.857,84 \text{ kW}$$

3. Potencia Calorífica por enfriamiento:

En este sector se está llevando a cabo, el proceso de enfriamiento de los ladrillos o productos cerámicos, mediante la inyección de un flujo de aire a temperatura ambiente.

La temperatura ambiente base de referencia para el caso de nuestro estudio es de 0°C, donde se encuentran ubicadas las dependencias de Cerámica Santiago en Batuco.

Por lo tanto, la diferencia de temperatura que se produce entre la temperatura ambiente, y la temperatura que se encuentra este sector del horno, que corresponde al final de este fue obtenida desde la curva de temperatura real que registra la empresa, esta equivale a 648,5°C.

En este caso se toma como referencia la temperatura de 700°C (la densidad y el calor específico del aire son correspondientes a este valor).

- Caudal de aire = 3,11 m³/s (entregado por Cerámica Santiago).
- Presión = atmosférica = 101.325 Pa
- Calor específico = 1,135 $\frac{KJ}{kg \cdot K}$ a 700°C
- Temperatura inicial = 0°C
- Temperatura final = 648,5°C
- Densidad (ρ) a 700°C = 0,3627 kg/m³ [Anexo E]

Así se obtiene el flujo másico (\dot{m}):

$$\dot{m} = Q \cdot \rho$$

$$\dot{m} = 3,11 \cdot 0,3627 = 1,12 \text{ (kg/s)}$$

Posterior se tiene la tercera potencia calorífica:

$$\dot{Q}_3 = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = 1,12 \cdot 1,135 \cdot (648,5 - 0) = 824,37 \text{ kW}$$

4. Potencia Calorífica por cocción de ladrillos

Para obtener la potencia de la cocción del horno o potencia que absorbe al proceso se debe conocer la cantidad de ladrillos por unidad de tiempo, el porcentaje de humedad, calcular la potencia de secado, y potencia de fusión de la arcilla. [7]

$$\dot{Q}_4 = \dot{m} \cdot (\text{humedad} \cdot q_{\text{secado}} + q_{\text{pasta}}) \quad \text{(ec. 4)}$$

Donde:

\dot{Q}_4 = Potencia calorífica por cocción de los ladrillos (kW).

\dot{m} = Flujo másico de ladrillos (kg/h). Para la obtención de esta cantidad es importante tener en cuenta el dato de la cantidad de producción diaria a plena carga.

$$\text{Producción en 1 h} = \frac{\text{Producción diaria}}{24}$$

Reemplazando:

$$\frac{800 \text{ Ton/día} * 1,000 \text{ (para pasar a kg.)}}{24 \text{ h (día)}} = 33.333,33 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \sim 9,25 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

humedad= cantidad de agua que poseen los ladrillos en relación a su peso = 4%

q secado = calor necesario para secar la pieza en (kJ/kg).

q secado = (q agua + q latente cambio fase H₂O + q vapor sobrecalentado) (kJ/kg).

en donde,

q agua = calor necesario para elevar la temperatura del agua presente en los ladrillos en la entrada del horno hasta la temperatura de evaporación a presión atmosférica de 101.325 Pa, estas temperaturas son T_i=30°C y T_f=100°C respectivamente y con C_pagua = 4,187(kJ/kg K)

$$q \text{ agua} = C_{p\text{agua}} \cdot (T_f - T_i) \quad (\text{ec. 5})$$

$$q \text{ agua} = 4,187 \cdot (100 - 30) = 293,09 \text{ (kJ/kg)}$$

q latente cambio fase H₂O = calor necesario para convertir toda el agua de líquido a vapor a presión atmosférica de 101.325 Pa a 100°C, según estos datos obtenemos de tabla de vapor y líquido saturado del agua las siguientes entalpías:

$$h_{\text{vapor}} = 2.675,6 \text{ (kJ/kg)} \text{ y } h_{\text{líquido}} = 419,5 \text{ (kJ/kg)}$$

$$q \text{ latente cambio fase H}_2\text{O} = h_{\text{vapor}} - h_{\text{líquido}} \quad (\text{ec. 6})$$

$$q \text{ latente cambio fase H}_2\text{O} = 2.675,6 - 419,5 = 2.256,1 \text{ (kJ/kg)}$$

q vapor sobrecalentado = calor necesario para subir la temperatura del vapor de 100°C a 200°C, esta última temperatura es la necesaria para que se remueva toda el agua higroscópica. De estas temperaturas obtenemos de la tabla de vapor y líquido saturado del agua las siguientes entalpías:

$$h_{200} = 2.927,9 \text{ (kJ/kg)} \text{ y } h_{100} = 2.675,6 \text{ (kJ/kg)}$$

$$q \text{ vapor sobrecalentado} = h_{200} - h_{100} \text{ (kJ/kg)}$$

$$q \text{ vapor sobrecalentado} = 2.927,9 - 2.675,6 = 252 \text{ (kJ/kg)}$$

Por lo tanto, el calor de secado es:

$$q \text{ secado} = 293,09 \text{ (kJ/kg)} + 2.256,1 \text{ (kJ/kg)} + 252 \text{ (kJ/kg)} = 2.801,19 \text{ (kJ/kg)}$$

q pasta = calor necesario para secar la pasta de arcilla que conforma el ladrillo en (kJ/h)

$$q \text{ pasta} = (1 - \text{humedad}) \cdot C_{p\text{ladrillo}} \cdot (T_f - T_i) \quad (\text{ec. 7})$$

en donde,

humedad = Agua contenida en los ladrillos a la entrada del horno en tanto por ciento referida a la masa de estos e igual a un 4%

$C_{p\text{ladrillo}}$ = calor específico del ladrillo es igual a 0,837 (kJ/kg K)

T_f = Temperatura máxima que alcanzan los ladrillos en la zona de cocción igual a 900°C.

T_i = Temperatura de los ladrillos a la entrada al horno igual a 30°C.

$$q \text{ pasta} = (1 - 0,04) \cdot 0,837 (900 - 30) = 699,06 \text{ (kJ/kg)}$$

Por lo tanto, la potencia calorífica para la cocción de ladrillos:

$$\dot{Q}_4 = 9,25 \cdot (0,04 \cdot 2.801,19 + 699,06) = 7.502,74 \text{ kW}$$

5. Potencia Calorífica de los combustibles

1.8. Combustibles utilizados

1.8.1 GLP (Gas licuado de petróleo)

El gas licuado de petróleo (GLP) es una mezcla de propano y butano. La ficha técnica del GLP utilizado se adjunta en el Anexo F.

1.8.2. Biomasa (Aserrín)

Pellet de Madera

Los pellets de madera son un biocombustible sólido estandarizado y producido en base a residuos de madera provenientes de la industria forestal, principalmente.

Los pellets son cilindros que se obtienen mediante un prensado de aserrín, virutas o polvo de madera en equipos especialmente concebidos para este fin (prensa pelletizadora). Los pellets deben cumplir con algunas características establecidas por normas de calidad, para ser utilizados como un combustible domiciliario, comercial e industrial. [8]



Figura n°15 Pellets.

La totalidad de la energía en forma de calor, la aportan estos dos combustibles.

De acuerdo a la información entregada por Cerámica Santiago, las proporciones de combustibles son de 1/3 de GLP y 2/3 de Biomasa, del total de la energía entregada por estos al proceso. La cantidad total de potencia calorífica suministrada por los combustibles corresponde a $48,53 \times 10^6$ kJ/h \sim 13,48 MW.

Esta potencia calorífica corresponde al calor total aportado por los combustibles al horno de cocción, y es equivalente a $\dot{Q}_5 = 13.480,55 \text{ kW}$.

6. Potencia Calorífica de pérdidas en el horno

Por último, se hace mención a las pérdidas por transmisión de calor desde el interior del horno, hacia los alrededores, (a pesar que está aislado térmicamente) denominada potencia calorífica de pérdidas en el horno. Se ha utilizado la ecuación de transferencia de calor por conducción.

$$\dot{Q}_6 = (T_2 - T_1)/(Rt) \cdot A \text{ (kW)} \quad \text{(ec. 8)}$$

Donde:

T_2 = Temperatura interior promedio del horno en °C en cada zona del horno.

T_1 = Temperatura exterior del horno en °C.

Rt = Resistencia térmica total que se mantiene constante en las diferentes zonas del horno $\sum \frac{L}{\lambda}$ en ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{w}$).

Donde:

L = espesor de cada capa que conforma las paredes y techo del horno en (m).

λ = Conductividad térmica del material que conforma las paredes y techo del horno en ($\text{w}/\text{m} \cdot \text{K}$).

A = Área superficial de las paredes laterales y techo que conforman el horno en (m^2).

A = Área techo + Área pared (m^2).

Los materiales que conforman las paredes laterales y techo son cuatro (Figura N°16), según la información entregada por Cerámica Santiago:

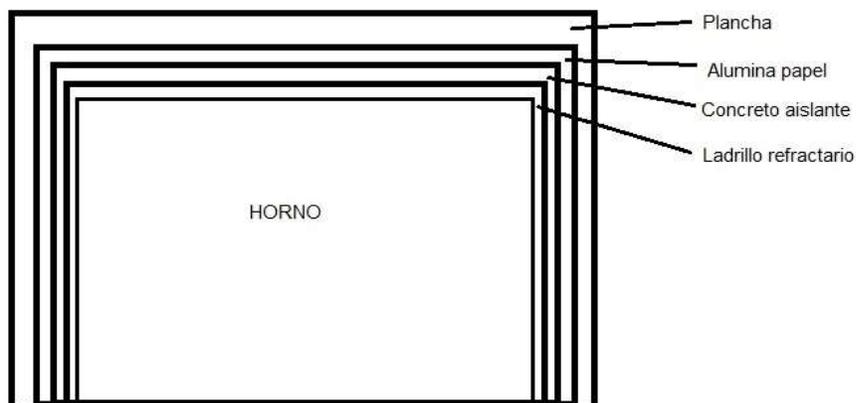


Figura n°16 Corte muestra materialidad horno túnel.

La tabla n°1, muestra el detalle de los materiales indicados y sus características:

Material	L Espesor (m)	λ Conductividad Térmica (w/m·K)	R Resistencia Térmica (m ² ·K /w)
Ladrillo refractario	0,345	0,15	2,3
Concreto Aislante	0,425	0,45	0,944
Alumina Papel	0,001	0,09	0,011
Plancha acero al carbono	0,005	0,54	0,092

Tabla n°1 Valores conductividad y resistencias de materialidad horno túnel.

Como las resistencias, de los cuatro materiales de la tabla precedente están posicionadas en serie se obtiene una resistencia total igual a:

$$R_t = R_{\text{ladrillo refractario}} + R_{\text{concreto aislante}} + R_{\text{alumina papel}} + R_{\text{plancha acero al carbono}} \quad (\text{ec. 9})$$

$$R_t = 2,3 + 0,944 + 0,011 + 0,092 = 3,34 \text{ (m}^2 \cdot \text{K /w)}$$

Se obtendrán los cálculos de transferencia de calor de las tres zonas del horno según las temperaturas de proceso, de esto se desprenderá una temperatura promedio T_2 que viene a ser la más representativa, observar Figura N°17.

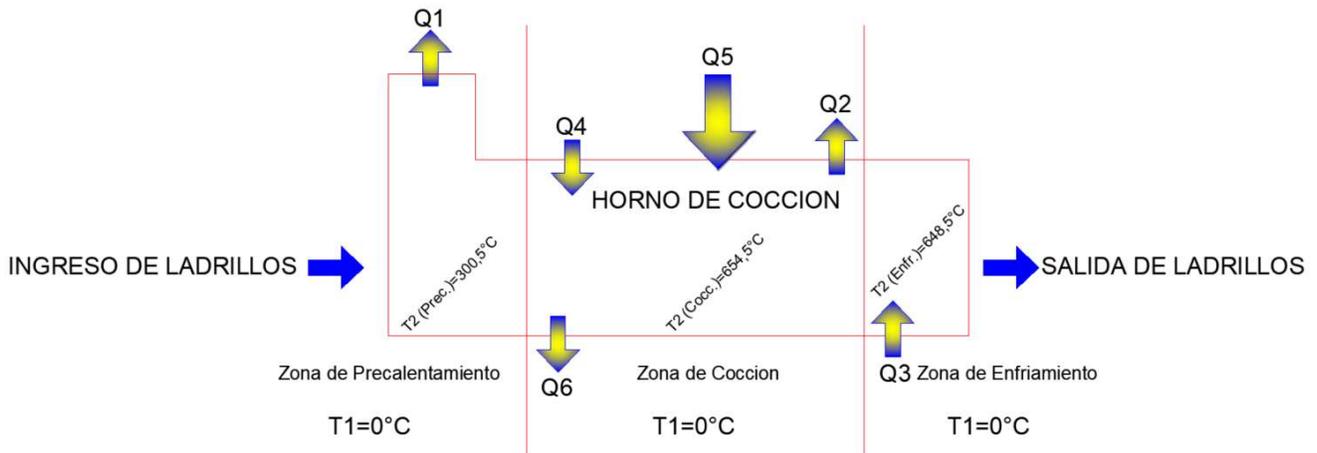


Figura n°17 Volumen de control (CASO BASE).

La tabla n°2, muestra el detalle de los sectores en el horno de cocción de ladrillos:

	ZONA		
	Pre calentamiento	Coccion	Enfriamiento
$T^\circ 2$	300,5°C	654,5°C	648,5°C
$T^\circ 1$	0°C	0°C	0°C
ANCHO (A)	7 m	7 m	7 m
ALTURA (B)	3,17 m	3,17 m	3,17 m
LARGO (C)	19 m	67 m	25 m
AREA TECHO	133 m ²	469 m ²	175 m ²
AREA PARED	60,23 m ²	212,39 m ²	79,25 m ²

Tabla n°2 Dimensiones del horno túnel.

Calculo de \dot{Q}_6 zona de precalentamiento:

Se tienen los siguientes parámetros de tabla precedente:

$$\text{Área techo} = 133 \text{ (m}^2\text{)}$$

Área pared (son 2 paredes de los costados iguales):

$$2 \cdot 60,33 \text{ (m}^2\text{)} = 120,66 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A = 133 + 120,66 = 253,66 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$\dot{Q}_6 \text{ precalentamiento} = (300,5 - 0)/3,34 \cdot 253,66 = \mathbf{22,82 \text{ (kW)}}$$

Calculo de \dot{Q}_6 zona de cocción:

Se tienen los siguientes parámetros de tabla precedente:

$$\text{Área techo} = 469 \text{ (m}^2\text{)}$$

Área pared (son 2 paredes de los costados iguales):

$$2 \cdot 212,39 \text{ (m}^2\text{)} = 424,78 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A = 469 + 424,78 = 893,78 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$\dot{Q}_6 \text{ coccion} = (654,5 - 0)/3,34 \cdot 893,78 = \mathbf{175,14 \text{ (kW)}}$$

Calculo de \dot{Q}_6 zona de enfriamiento:

Tenemos los siguientes parámetros de tabla precedente:

$$\text{Área techo} = 175 \text{ (m}^2\text{)}$$

Área pared (son 2 paredes de los costados iguales):

$$2 \cdot 79,25 (m^2) = 158,5 (m^2)$$

$$A = 175 + 158,5 = 333,5 (m^2)$$

$$\dot{Q}_6 \text{ enfriamiento} = (648,5 - 0)/3,34 \cdot 333,5 = \mathbf{64,75 (kW)}$$

Por lo tanto, las pérdidas de calor tanto en las paredes como en el techo del horno son:

$$\dot{Q}_6 = \mathbf{22,82 + 175,14 + 64,75 = 262,71 (kW)}$$

La siguiente tabla presenta el resumen del balance térmico “caso base” en el horno:

	Potencias Caloríficas asociadas al horno	Cantidad de Calor (kW)
Q1	Potencia calorífica perdidas por gases de la combustión	1.974,61
Q2	Potencia calorífica extracción a secadero	1.857,84
Q3	Potencia calorífica por enfriamiento	824,37
Q4	Potencia calorífica por cocción de ladrillos	7.502,74
Q6	Potencia calorífica por perdidas en el horno	262,71
Q5	Potencia calorífica por los combustibles	12.422,27

Tabla n°3 Resumen de potencias asociadas al horno caso base.

Al analizar las diferentes potencias caloríficas asociadas a cada sector del proceso del horno de cocción, se llega a la conclusión que, a partir de información y antecedentes entregados y recopilados por Cerámica Santiago, no es posible intervenir ningún sector que involucre directamente la fabricación de los ladrillos, a excepción del sector donde escapan los gases de combustión (chimenea). Si se interviniese cualquiera de los otros sectores, provocara un desequilibrio energético ocasionando un desmedro en la calidad del producto final.

1.9. Diagrama Sankey del horno de cocción

El diagrama de Sankey representado por la Figura N°18, es un tipo específico de diagrama de flujo, en el que el ancho de las flechas es proporcional al flujo de energía o potencia representado, dependiendo si el balance se realizó en base a energías o potencias. Para tener una visión general de la interacción de las potencias caloríficas, en el horno de cocción, se ha generado un Diagrama Sankey del proceso:

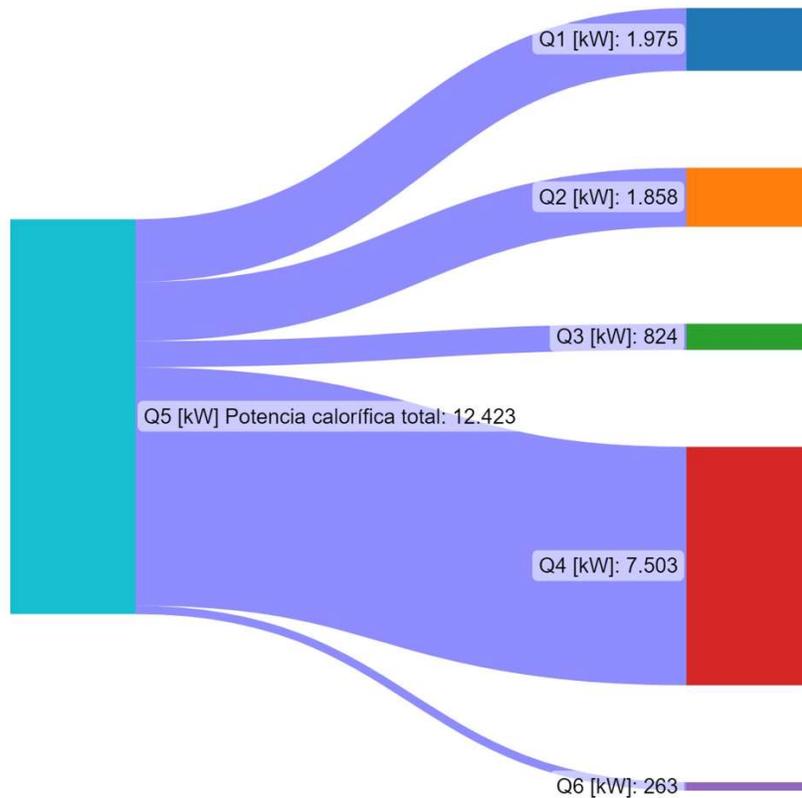


Figura n°18 Diagrama Sankey del proceso (CASO BASE).

En función de lo anterior, sigue a continuación el volumen de control del “caso con proyecto” (Figura N°19) el cual incorpora el sistema ORC en el sector de la chimenea del horno, donde escapan los gases de combustión:

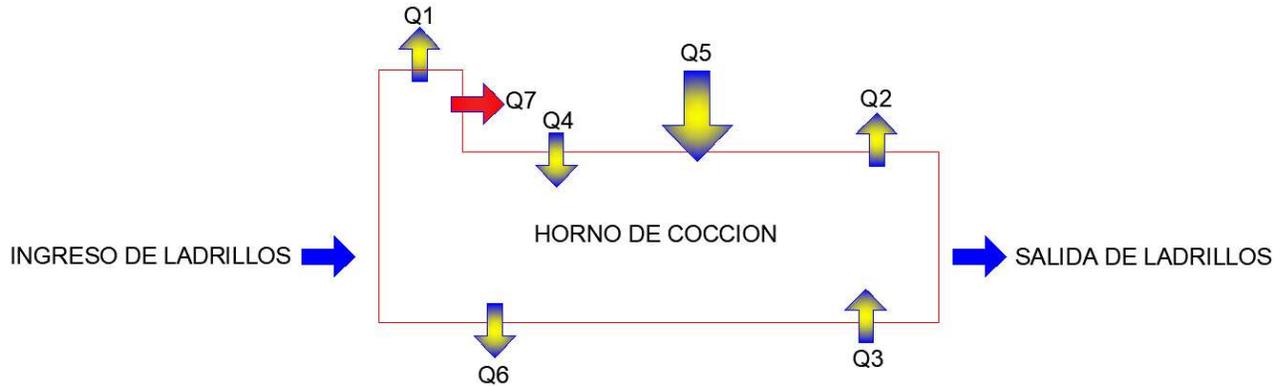


Figura n°19 Volumen de control (CASO CON PROYECTO).

En función del volumen de control para el “caso con proyecto”, se deducen las siguientes potencias caloríficas:

- $\dot{Q}1$ = Potencia Calorífica perdida por gases de la combustion
- $\dot{Q}2$ = Potencia Calorífica por extraccion a secadero
- $\dot{Q}3$ = Potencia Calorífica por enfriamiento
- $\dot{Q}4$ = Potencia Calorífica por coccion de ladrillos
- $\dot{Q}5$ = Potencia Calorífica por los combustibles
- $\dot{Q}6$ = Potencia Calorífica por perdidas en el horno
- $\dot{Q}7$ = Potencia Calorífica por sistema ORC

Como se puede apreciar en el volumen de control del “caso con proyecto”, se agrega una potencia calorífica ($\dot{Q}7$), la cual nace incorporando el sistema ORC, en el sector de la chimenea donde escapan los gases de combustión.

El sistema ORC considerado finalmente, admite temperaturas “menores” por lo tanto, es factible instalarlo en este sector.

La potencia calorífica ($\dot{Q}7$) corresponde a lo requerido por el equipo ORC (Modelo: LT1), ofrecido por el fabricante ORC RANK. Debido a los parámetros disponibles en el sector de la chimenea del horno de cocción, (temperatura y caudal de gases de combustión), solo es posible

instalar técnicamente una sola unidad, ya que después de pasar los gases por el intercambiador (economizador), la temperatura de estos disminuye a tal punto que no es viable instalar una segunda unidad en serie.

Otro punto a considerar, sería que al disminuir bastante la temperatura de los gases de combustión podríamos eventualmente comenzar a condensar el vapor de agua, ocasionando problemas de corrosión en la materialidad del intercambiador de calor directamente, y en general a lo expuesto a estos gases.

Los cálculos asociados a esta potencia calorífica son los siguientes:

- Caudal de agua = 8 m³/h (requerido por fabricante de equipo ORC). [Anexo D]
- Calor específico = 4,18 $\frac{KJ}{kg \cdot K}$
- Temperatura inicial de agua = 70°C
- Temperatura final de agua = 90°C
- Densidad (ρ) = 1.000 kg/m³

Así se obtiene el flujo másico (\dot{m}):

$$\dot{m} = Q \cdot \rho$$

$$\dot{m} = 8 \cdot 1.000 = 8.000 \frac{kg}{h} \sim 2,22 \text{ kg/s}$$

Se tiene la potencia calorífica, correspondiente al sistema ORC:

$$\dot{Q}_7 = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = 2,22 \cdot 4,18 \cdot (90 - 70) = 186 \text{ kW}$$

La tabla n°4 comparativa presenta el resumen del balance térmico del “caso con proyecto”, con respecto al “caso base” en el horno:

	Potencias Caloríficas asociadas al horno	Cantidad de Calor (kW) CASO BASE	Cantidad de Calor (kW) CASO CON PROYECTO
Q1	Potencia calorífica perdidas por gases de la combustión	1.974,61	1.788,61
Q2	Potencia calorífica extracción a secadero	1.857,84	1.857,84
Q3	Potencia calorífica por enfriamiento	824,37	824,37
Q4	Potencia calorífica por cocción de ladrillos	7.502,74	7.502,74
Q6	Potencia calorífica por perdidas en el horno	262,71	262,71
Q5	Potencia calorífica por los combustibles	12.422,27	12.422,27
Q7	Potencia calorífica por sistema ORC	-	186

Tabla n°4 Resumen potencias asociadas al horno “caso base” y “caso con proyecto”.

La Figura N°20, muestra el diagrama de Sankey del caso con proyecto, el cual incorpora la potencia calorífica asociada al equipo ORC (\dot{Q}_7).

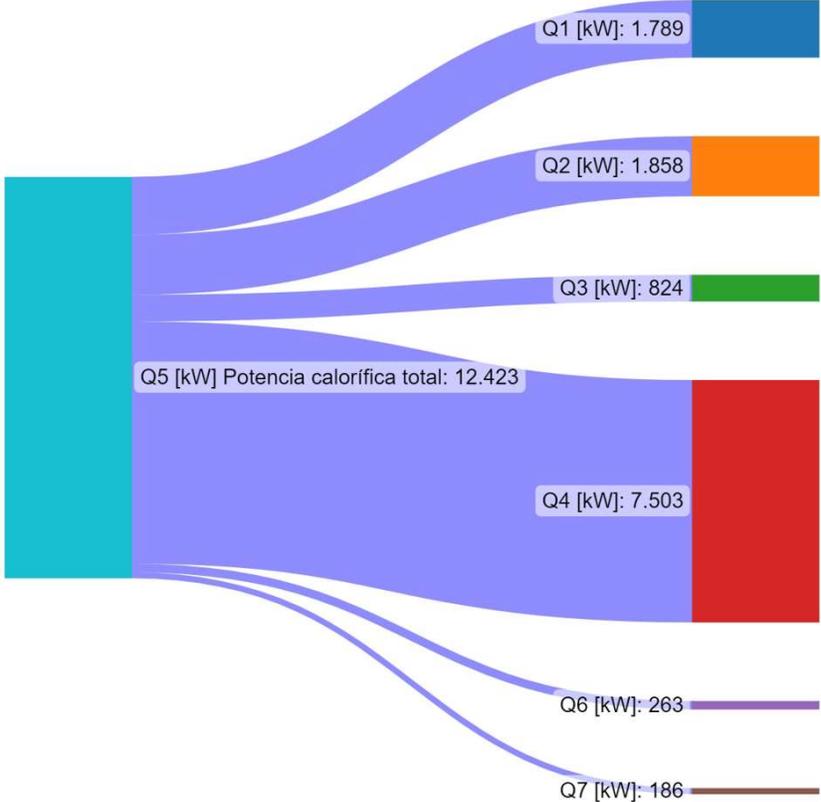


Figura n°20 Diagrama Sankey del proceso (CASO CON PROYECTO).

CAPÍTULO 2: FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL PROYECTO

2.1. Introducción al Capítulo

La factibilidad técnica del proyecto se basa en desarrollar y evaluar la posibilidad de instalar un equipo para obtener energía eléctrica basado en el ciclo orgánico de Rankine, para lo cual se han registrado datos, y a la vez recopilado información del funcionamiento actual de la planta.

Primero se debe considerar la recuperación de calor del horno de cocción de ladrillos el cual se obtendrá de la zona de los gases de combustión.

Luego se debe realizar un levantamiento de las condiciones en que se encuentran las instalaciones, asegurando de interferir lo menos posible la actual situación de la planta, así lograr ocupar en forma eficiente el espacio disponible.

La selección de los equipos debe ser en función de los puntos anteriores, del modo de funcionamiento (características técnicas y de fabricación), del intercambiador que absorberá el calor de los gases de combustión a través de agua enviándolo al evaporador del equipo ORC como también a la selección del condensador del ORC que en este caso será una torre de enfriamiento.

2.2.Ciclo de Rankine

El ciclo de Rankine funciona con vapor y está presente en las centrales térmicas de alrededor de todo el mundo siendo el medio generalizado para obtención de energía eléctrica. Desde que fue desarrollado a través del ingeniero y físico escocés William Jhon Macquorn Rankine ha evolucionado a lo largo de los años en el sentido de la búsqueda de una mejora en los rendimientos, lo que ha traído grandes ahorros energéticos y por ende una baja en los costos que se relacionan directamente con la energía eléctrica.

El ciclo Rankine utiliza como fluido de trabajo el vapor de agua el cual al pasar por diferentes estados termodinámicos recibe, transporta y entrega energía a través de diferentes equipos como condensadores, evaporadores y bombas de recirculación entre otros para culminar en producción de energía eléctrica mediante un generador.

El ciclo Orgánico de Rankine sustituye el agua por un fluido orgánico alcanzando temperaturas de operación de entre 70°C a 250°C, en cambio, en el ciclo de Rankine convencional las temperaturas de operación son del orden de 350°C.

El ciclo orgánico de Rankine necesita al igual que el ciclo convencional de Rankine de una bomba, evaporador, turbina y condensador, también se puede realizar una regeneración o precalentamiento para mejorar el rendimiento. [9]

2.2.1 Componentes de un sistema funcionando con un Ciclo de Rankine

Principales componentes de un equipo ORC del tipo orgánico, representados en la Figura N°21:

[10]

1. Bomba recirculadora
2. Evaporador
3. Turbina
4. Condensador
5. Fluido de operación

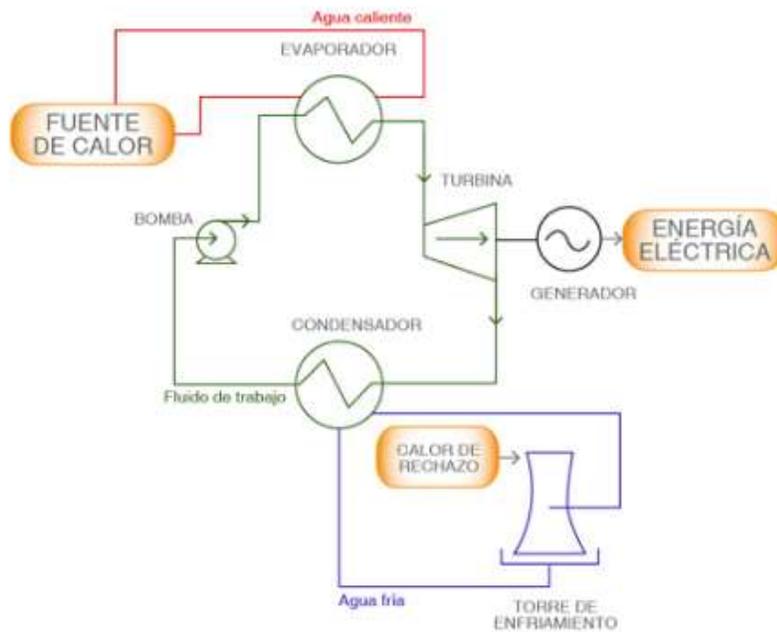


Figura n°21 Diagrama del sistema ORC.

A continuación, se describen los componentes del sistema ORC:

1. Bomba:

Aumenta la presión del fluido operativo a la presión del evaporador, haciendo circular el fluido por el sistema.

2. Evaporador

El evaporador es el componente en donde el fluido operativo se ve expuesto al calor residual provocando la evaporación de este transformándose en vapor a alta presión.

Un evaporador es del tipo directo cuando transfiere la energía calorífica directamente de la fuente de calor residual al líquido operativo. En cambio, los denominados evaporadores indirectos utilizan un medio de transferencia térmica entre la fuente de calor y el líquido operativo.

3. Turbina:

Es la que recibe el fluido en forma de vapor sobrecalentado, así este en función de su energía contenida, producirá movimiento en esta, para la posterior generación de energía eléctrica.

4. Condensador

El condensador, es un intercambiador de calor que como su nombre lo indica, se produce un cambio de estado, pasando desde el estado de vapor a líquido un fluido dado, por medio de un enfriamiento del vapor.

Existen diferentes tipos de condensadores que se comercializan habitualmente, y que utilizan aire, agua o cualquier otro medio para producir el efecto deseado.

Los intercambiadores de calor, que hacen las veces de condensadores apropiados para trabajar con un sistema ORC son:

- 1- Torre de Enfriamiento.
- 2- Condensador Evaporativo.
- 3- Extracción de Agua Subterránea.

5. Fluido de Operación

Los tipos de fluidos más comúnmente utilizados en los equipos ORC son de tipo orgánico, y se detallan algunos a continuación:

- 1- OMTS (C₈ H₂₄ O₂ Si₃): Se trata de un fluido basado en aceite de silicona incoloro, de bajo punto de ebullición y alto peso molecular.
- 2- Solkatherm (SES36): Es una mezcla refrigerante azeotrópica formada por un 65% de R365 mfc (pentafluorobutano) y 35% de PFPE (perfluoropolietileno).
- 3- R245FA: Pentafluoropropano, no es inflamable y tiene una baja toxicidad, su bajo punto de ebullición de 14.8 lo hace ideal para su uso en sistemas de ORC que utiliza calor de baja temperatura y el valor residual para generar electricidad.

2.2.2 Eficiencia del Ciclo ORC

El ciclo ORC tiene una elevada eficiencia energética: 98% de la potencia térmica aportada por el aceite térmico se transforma en energía eléctrica (alrededor del 10-20 %) y calor (88-78%).

Los rendimientos eléctricos de los ciclos pueden alcanzar hasta un 20% cuando se dispone de una fuente de calor a alta temperatura (cerca de 250°C), como en aplicaciones con biomasa, y del orden del 10% en recuperación de calor. [11]

En este caso, el equipo seleccionado alcanza un rendimiento eléctrico a plena carga del orden del 6,11%, y valores menores cuando el equipo trabaja a cargas parciales. Así también, para el caso del rendimiento térmico, en este caso trabajando el equipo a plena carga, logramos valores del orden de un 88,89%.

2.3 Selección General

2.3.1 Selección del equipo ORC

El equipo ORC modelo LT1 (Figura N°22), perteneciente al fabricante español Rank, fue determinado según la potencia calorífica de los gases de combustión que están a 100°C y que servirán para calentar el agua que necesita el evaporador del ORC. Esta empresa se destaca porque posee equipos que permiten aprovechar una fuente de calor de baja temperatura como es este caso. [12]



Figura n°22 Equipo Modelo LT1 empresa española Rank.

A continuación, en la (Figura N°23), se presenta extracto de catálogo para selección de equipo ORC, en él se presentan los principales parámetros:

Conditions required by the customer						
<u>Heat source</u>	Fluid:	not specified		<u>Heat sink</u>	Fluid:	not specified
Inlet temperature, T_1'		90	°C	Inlet temperature, T_3		not specified °C
Outlet temperature, T_2'		not specified	°C	Outlet temperature, T_4		not specified °C
Vol. flow rate, V_{source}		8	m ³ /h	Vol. flow rate, V_{sink}		not specified m ³ /h
Thermal power		not specified	kW _{th}	Thermal power		not specified kW _{th}
<u>Additional remarks</u>						
Commercial solution proposed by Rank®						
Rank® Equipment		LT1*		Number of units		1
Net power output, P_{net}		11	kW _e			
<u>Heat source</u>	Fluid:	Water		<u>Heat sink</u>	Fluid:	Water
Inlet temperature, T_1		90	°C	Inlet temperature, T_3		20 °C
Outlet temperature, T_2		70	°C	Outlet temperature, T_4		30 °C
Vol. flow rate, V_{source}		8	m ³ /h	Vol. flow rate, V_{sink}		14 m ³ /h
Thermal power		180	kW _{th}	Thermal power		160 kW _{th}

Figura n°23 Extracto de catálogo Fabricante Rank, España.

La selección del equipo ORC asocia los resultados de la tabla n°5, proporcionados por el fabricante español ORC Rank.

- Equipo: ORC en base a un ciclo de Rankine.
- Marca: RANK.
- Modelo: LT1.

En la tabla n°5 se indican los parámetros característicos de operación que necesita el equipo ORC Rank modelo LT1, de los cuales los más representativos son la potencia térmica de entrada ORC de 180 kW que se produce con la transferencia de calor con los gases calientes de la chimenea logrando producir una potencia eléctrica de salida ORC (total) de 11 kW.

Análisis de resultados	Valor
Temperatura entrada agua intercambiador de calor	70°C
Temperatura salida agua intercambiador de calor	90°C
Caudal de Agua intercambiador de calor	8 m ³ /h
Potencia térmica de entrada ORC	180 kW
Potencia eléctrica de salida ORC (total)	11 kW
Potencia térmica de salida ORC	160 kW
Temperatura de entrada agua fría torre de enfriamiento	30°C
Temperatura de salida agua fría torre de enfriamiento	20°C
Caudal volumétrico de agua fría torre de enfriamiento	14 m ³ /h

Tabla n°5 Parámetros selección equipo ORC.

2.3.2 Diseño del intercambiador de calor en la chimenea para el equipo ORC

Este equipo tiene relación con el calor necesario a extraer desde el sector de salida de los gases de combustión, correspondientes al horno de cocción de ladrillos.

Este equipo será seleccionado en base a la cantidad de calor disponible en el sector indicado en la tabla n°5.

La Figura N°24 muestra los datos de operación correspondientes al equipo ORC seleccionado. Por intermedio del apoyo de un software térmico denominado “HTRI” el cual es ocupado ampliamente en el rubro asociado a la transferencia de calor en distintos procesos.

Se presenta ficha técnica del intercambiador seleccionado, el cual muestra los diferentes parámetros asociados al intercambiador de calor que ha sido considerado para la recuperación de calor desde los gases de combustión que escapan desde la chimenea del horno de cocción de ladrillos. [13]

Xace E Ver. 6.00 25-06-2019 19:46 SN: Vals100+				MKH Units	
Rating-Horizontal economizer countercurrent to crossflow					
No Data Check Messages.					
See Runtime Message Report for Warning Messages.					
Process Conditions		Outside		Tubeside	
		gases combustion		agua	
Fluid name			Sens. Gas		Sens. Liquid
Fluid condition					
Total flow rate	(1000-kg/hr)		70,481		8,000
Weight fraction vapor, In/Out		1,000	1,000	0,000	0,000
Temperature, In/Out	(Deg C)	100,00	90,57	70,00	90,00
Skin temperature, Min/Max	(Deg C)	76,96	93,50	76,50	93,21
Pressure, Inlet/Outlet	(kgf/cm2A)	1,000	0,988	0,000	0,000
Pressure drop, Total/Allow	(kgf/cm2) (kgf/cm2)	0,012	0,000	0,034	0,000
Midpoint velocity	(m/s)		21,71		0,36
- In/Out	(m/s)			0,27	0,36
Heat transfer safety factor	(-)		1		1
Fouling	(m2-hr-C/kcal)		0,000000		0,000000
Exchanger Performance					
Outside film coef	(kcal/m2-hr-C)	80,54	Actual U	(kcal/m2-hr-C)	51,152
Tubeside film coef	(kcal/m2-hr-C)	2406,46	Required U	(kcal/m2-hr-C)	49,060
Clean coef	(kcal/m2-hr-C)	51,152	Area	(m2)	252,162
Hot regime		Sens. Gas	Overdesign	(%)	4,26
Cold regime		Sens. Liquid	Tube Geometry		
EMTD	(Deg C)	13,0	Tube type	High-finned	
Duty	(MM kcal/hr)	0,160	Tube OD	(mm)	25,400
Unit Geometry			Tube ID	(mm)	21,184
Bays in parallel per unit		1	Length	(mm)	1499,982
Bundles parallel per bay		1	Area ratio(out/in)	(-)	15,7005
Extended area	(m2)	252,162	Layout	Staggered	
Bare area	(m2)	19,257	Trans pitch	(mm)	52,000
Bundle width	(mm)	1500,	Long pitch	(mm)	45,032
Nozzle		Inlet	Outlet	Number of passes	(-) 9
Number	(-)	1	1	Number of rows	(-) 6
Diameter	(mm)	52,553	52,553	Tubecount	(-) 168
Velocity	(m/s)	1,05	1,06	Tubecount Odd/Even	(-) 28 / 28
R-V-SQ	(kg/m-s2)	1073,43	1087,28	Tube material	Carbon steel
Pressure drop	(kgf/cm2)	6,021e-3	3,881e-3	Fin Geometry	
Fan Geometry			Type	Plain round	
No/bay	(-)	2	Fins/length	fin/meter	315,0
Fan ring type		Straight	Fin root	mm	25,400
Diameter	(mm)	760,	Height	mm	12,700
Ratio, Fan/bundle face area	(-)	0,40	Base thickness	mm	0,300
Driver power	(kW)	23,34	Over fin	mm	50,800
Tip clearance	(mm)	9,525	Efficiency	(%)	72,3
Efficiency	(%)	65	Area ratio (fin/bare)	(-)	13,0945
Airside Velocities			Material	Aluminum 1060 - H14	
Face	(m/s)	Actual	Standard	Thermal Resistance; %	
Maximum	(m/s)	9,51	7,24	Air	63,51
Flow	(100 m3/min)	21,97	16,74	Tube	33,37
Velocity pressure	(mmH2O)	12,830	9,778	Fouling	0,00
Bundle pressure drop	(mmH2O)	25,969		Metal	3,11
Bundle flow fraction	(-)	95,641		Bond	0,00
Bundle	80,38	Airside Pressure Drop; %		Louvers	0,00
Ground clearance	0,00	Fan guard	0,00	Hail screen	0,00
Fan ring	19,62	Fan area blockage	0,00	Steam coil	0,00

Figura n°24 Ficha técnica intercambiador de calor de la chimenea.

La Figura N°25, muestra la distribución de los tubos aletados del intercambiador de calor, se puede apreciar que tiene 9 pasos por donde circula el agua que se calienta hasta los 90°C, también se puede observar una distribución de forma triangular lo que ayuda a mejorar la transferencia de calor cuando pasan los gases calientes a través de los tubos aletados.

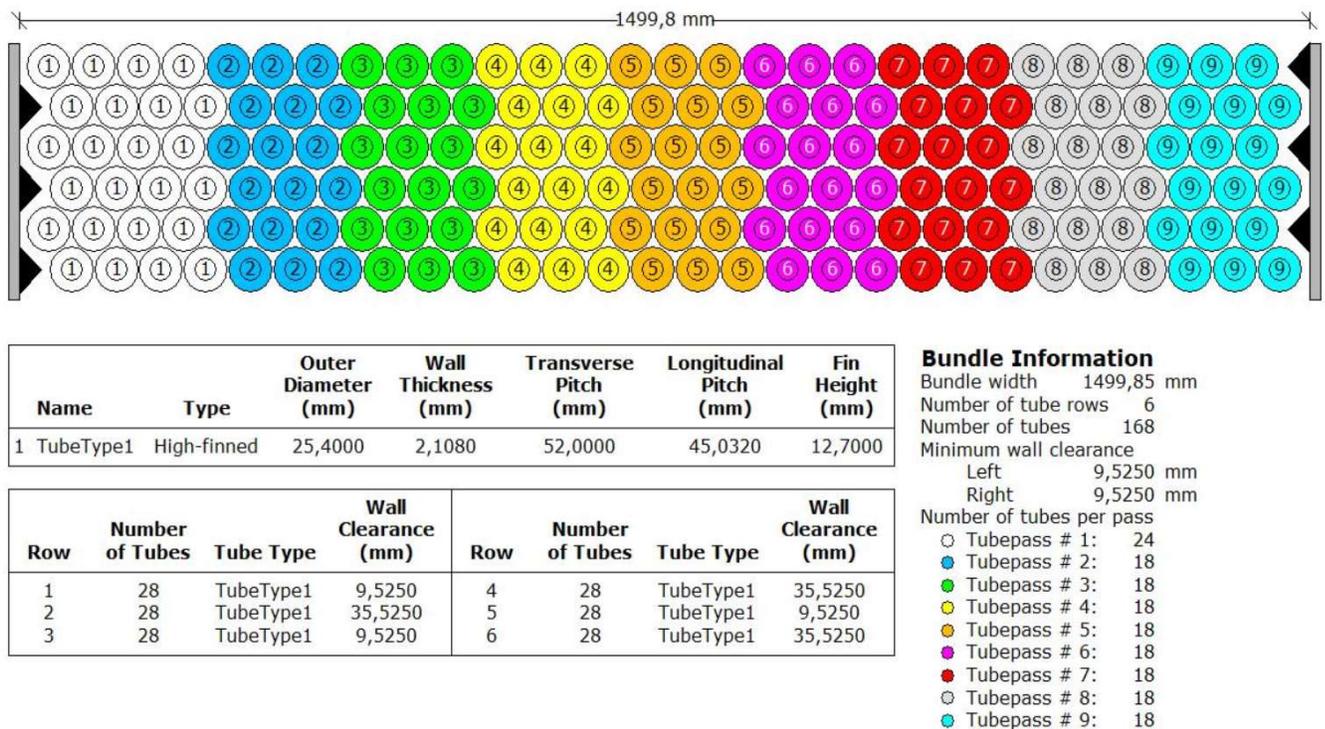


Figura n°25 Configuración de los tubos del intercambiador de calor de la chimenea.

2.3.3 Selección del sistema de enfriamiento del condensador

El equipo ORC dentro de sus componentes posee un condensador, el cual tiene la función de disipar el calor absorbido en el proceso de evaporación.

De acuerdo a esto se debe seleccionar un sistema el cual enfríe este condensador, en este caso se prefirió el enfriamiento mediante agua, por medio de una torre de enfriamiento, siendo esta más efectiva, que el mismo equipo al enfriarlo por medio de aire.

1. Torre de Enfriamiento

Las torres de refrigeración o enfriamiento son estructuras diseñadas para disminuir la temperatura del agua y otros medios. Con relación al mecanismo utilizado para la transferencia de calor los principales tipos son:

- Torres de refrigeración húmedas, funcionan por el principio de evaporación.
- Torres de refrigeración secas, funcionan por transmisión del calor a través de una superficie que separa el fluido a refrigerar del aire ambiente.

En una torre de refrigeración húmeda el agua caliente puede ser enfriada a una temperatura inferior a la del ambiente, si el aire es relativamente seco.

Datos de selección sistema de enfriamiento:

- Potencia térmica: 160 kW
- Temperatura de entrada: 30°C
- Temperatura de salida: 20°C

Con esto, se seleccionará una torre de enfriamiento determinada con los parámetros de diseño anteriormente indicados según catálogo de la empresa argentina Sinax.

La Figura N°26 muestra los parametros de la seleccion de la torre de enfriamiento modelo EWK 144, los mas importantes son A: alto, B: ancho y C: largo que corresponden a las dimensiones exteriores del equipo.

DIMENSIONES DE TORRES TIPO EWK																			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	Peso (Kg)	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	pulg	pulg	pulg	pulg	mm	mm	HP	mm	Operación	Neto
EWK 036	1730	1363	534	80	197	262	190	190	365	2 1/2	1	1/2	1 1/2	240	315	0,5	1074	119	48
EWK 064	2165	1776	760	80	197	262	285	285	465	2 1/2	1 1/2	1/2	1 1/2	330	415	1	1354	252	115
EWK 144	2702	2093	1140	110	270	338	420	420	731	4	2 1/2	1/2	1 1/2	520	615	2	1844	660	300
EWK 225	2749	2066	1430	125	355	423	590	590	865	5	3	1/2	1 1/2	675	765	3	2240	1077	382
EWK 324	3160	2245	1720	125	355	423	560	500	1047	5	4	1/2	2	785	915	5,5	2000	1490	644
EWK 441	3400	2290	2052	150	342	480	800	800	1120	6	2 x 4	1	2	930	1030	7,5	2350	2900	740
EWK 680	4480	2995	2995x2255	150	580	650	960	960	1625	2x6	2 x 4	1	2	988	1480	12,5	3246x2323	3400	1020
EWK 900	4705	3020	4014x1910	180	375	445	785	785	2165	2x8	2 x 4	1	2	875	2020	15	4330x2050	4160	1500
EWK 1260	4850	3190	4150x2930	180	390	450	800	800	1660	2 x 8	4 x 4	2 x 1	2 x 2	2000	1490	20	4280x3060	9665	2665

Figura n°26 Extracto de catálogo Fabricante SINAX, Argentina. Selección torre enfriamiento.

La Figura N°27 detalla las capacidades en toneladas de refrigeracion (TR) de los diferentes modelos EWK del fabricante, se destaca (recuadro rojo) el modelo seleccionado para el proyecto EWK 144 con 60 (TR) equivalentes a 210,99 kW de capacidad de transferencia.

Capacidades	
Modelo	TR (máx)
EWK 036	10
EWK 064	20
EWK 144	60
EWK 225	90
EWK 324	130
EWK 441	200

Figura n°27 Extracto catálogo Fabricante SINAX, Argentina.

2.3.4 Selección de conjunto suministro de agua para intercambiador de calor y torre de enfriamiento respecto al ORC

Ya seleccionados el intercambiador de calor, y la torre de enfriamiento se tiene que cuantificar el piping, accesorios e instrumentos para el correcto ensamble y conexión con el equipo ORC, esta tarea fue realizada por la misma empresa quien cotizo los equipos, Termia Ltda., ya que cuenta junto con el suministro de los equipos con la opción de la instalación en terreno, es decir “el trabajo llave en mano”.

En los Anexos A y B respectivamente, se encuentran las cotizaciones correspondientes al intercambiador de calor y la torre de enfriamiento con sus respectivos componentes para la interconexión.

2.4 Situación actual versus futuro, en relación al consumo de electricidad en Planta Cerámica Santiago

La siguiente información representa la situación que vive la empresa actualmente:

Consumo promedio mensual:

- Electricidad: 780.000 kWh (mes)

Con estos datos se puede analizar desde el punto de vista anual y equivalente a dinero el gasto con respecto a este ítem:

$$\text{Electricidad: } 780.000 \text{ kWh (mes)} * 12 \text{ (meses)} = 9.360.000 \frac{\text{kWh}}{\text{anuales}} \quad \text{(ec.10)}$$

Para calcular el precio del kWh se tiene como referencia el precio medio de mercado de la comisión nacional de energía (CNE). Según muestra la Figura N°28. [14]

Fecha de publicación de PMM	Ventana de 4 meses	Fijación Precio de Nudo	PMM ₀ SEN [\$/kWh]	PMM SEN [\$/kWh] *
05 de Diciembre de 2017	Junio 2017 - Septiembre 2017	-	-	62,185
04 de Enero de 2018	Julio 2017 - Octubre 2017	-	-	62,169
05 de Febrero de 2018	Agosto 2017 - Noviembre 2017	-	-	61,949
02 de Marzo de 2018	Septiembre 2017 - Diciembre 2017	-	-	62,266
03 de Abril de 2018	Octubre 2017 - Enero 2018	Abril 2018	62,169	61,218
04 de Mayo de 2018	Noviembre 2017 - Febrero 2018	Abril 2018	62,169	60,516
05 de Junio de 2018	Diciembre 2017 - Marzo 2018	Abril 2018	62,169	59,618
05 de Julio de 2018	Enero 2018 - Abril 2018	Abril 2018	62,169	59,114
03 de Agosto de 2018	Febrero 2018 - Mayo 2018	Abril 2018	62,169	59,400
05 de Septiembre de 2018	Marzo 2018 - Junio 2018	Abril 2018	62,169	60,563
03 de Octubre de 2018	Abril 2018 - Julio 2018	Octubre 2018	59,114	61,983
07 de Noviembre de 2018	Mayo 2018 - Agosto 2018	Octubre 2018	59,114	63,411
05 de Diciembre de 2018	Junio 2018 - Septiembre 2018	Octubre 2018	59,114	64,724
04 de Enero de 2019	Julio 2018 - Octubre 2018	Octubre 2018	59,114	65,388
05 de Febrero de 2019	Agosto 2018 - Noviembre 2018	Octubre 2018 - Indexación Febrero	65,388	65,392
05 de Marzo de 2019	Septiembre 2018 - Diciembre 2018	Octubre 2018 - Indexación Febrero	65,388	65,321
03 de Abril de 2019	Octubre 2018 - Enero 2019	Abril 2019	65,388	66,463
06 de Mayo de 2019	Noviembre 2018 - Febrero 2019	Abril 2019	65,388	67,837
05 de Junio de 2019	Diciembre 2018 - Marzo 2019	Abril 2019	65,388	69,083
03 de Julio de 2019	Enero 2019 - Abril 2019	Abril 2019	65,388	69,792
05 de Agosto de 2019	Febrero 2019 - Mayo 2019	Abril 2019	65,388	68,649
04 de Septiembre de 2019	Marzo 2019 - Junio 2019	Abril 2019	65,388	68,320
03 de Octubre de 2019	Abril 2019 - Julio 2019	Octubre 2019	69,792	67,732
06 de Noviembre de 2019	Mayo 2019 - Agosto 2019	Octubre 2019	69,792	67,865
04 de Diciembre de 2019	Junio 2019 - Septiembre 2019	Octubre 2019	69,792	68,641
06 de Enero de 2020	Julio 2019 - Octubre 2019	Octubre 2019	69,792	68,784
05 de Febrero 2020	Agosto 2019 - Noviembre 2019	Octubre 2019	69,792	69,308
04 de Marzo de 2020	Septiembre 2019 - Diciembre 2019	Octubre 2019	69,792	69,711
01 de Abril de 2020	Octubre 2019 - Enero 2020	Octubre 2019	69,792	71,429

Figura n°28 Precio medio de mercado sistema eléctrico nacional (PMM SEN).

* Valor real a la fecha de publicación considerando el IPC del segundo mes anterior a la fecha señalada.

El valor promedio según la Figura N°28, desde el 05-Diciembre-2017 al 01-Abril-2020 es de **65 (\$/kWh)**.

Gasto por concepto de electricidad al año =

$$9.360.000 \text{ kWh (anuales)} * 65 (\$/kWh) = \$ 608.400.000 \quad (\text{ec. 11})$$

Dada la información anterior se debe analizar cuanto generara el equipo ORC mensualmente, y así a posterior evaluar anualmente. Los siguientes valores se extraen de catálogo equipo ORC:

- Potencia neta entregada por equipo ORC: 11 kW

Con esto, se puede observar la potencia generada total en un año de funcionamiento, de forma continua.

$$11 \text{ kW} * 8.760 \text{ h} = 96.360 \frac{\text{kWh}}{\text{anuales}} \quad (\text{ec. 12})$$

Que equivalen a:

$$96.360 \frac{\text{kWh}}{\text{anuales}} * 65 \text{ \$/kWh} = \$ 6.263.400$$

Lo anterior considera un factor de planta del 100 %, siendo inviable en cualquier tipo de maquina o sistema.

El equipo ORC considera 2 semanas de mantenimiento preventivo según lo informado por la empresa española Rank, es así que se descuentan a las 8.760 h (horas totales de un año), 15 días que en este caso corresponden a 360 h.

$$8.760 \text{ h} - 360 \text{ h} = 8.400 \text{ h (de funcionamiento anual)} \quad (\text{ec. 13})$$

En función de lo anterior, la cantidad de potencia eléctrica entregada por el equipo ORC queda de esta forma:

$$11 \text{ kW} * 8.400 \text{ h} = 92.400 \text{ kWh (anuales)} \quad (\text{ec. 14})$$

Que equivalen a:

$$92.400 \frac{\text{kWh}}{\text{anuales}} * 65 \text{ \$/kWh} = \$ 6.006.000$$

Por lo tanto, se obtiene la diferencia entre lo que Cerámica Santiago gasta anualmente por concepto de electricidad, y en el escenario con el equipo ORC funcionando de forma continúa sin registrar alguna parada:

Situación actual gasto electricidad: \$ 608.400.000

Situación con equipo ORC funcionando de forma continua:

$$\text{\$ } 608.400.000 - \text{\$ } 6.006.000 = \text{\$ } 602.394.000$$

Se puede apreciar la disminución del gasto por concepto de electricidad, equivalente a:

\\$ 6.006.000 son equivalentes al 0.98 % menos de gasto, en un periodo de un año.

Se debe hacer el alcance que estos equipos están diseñados para funcionar 24/7 sin problemas. De acuerdo a información entregada por el fabricante, el promedio de disponibilidad de los equipos instalados actualmente en otra parte del mundo es del orden de un 98 %. [15]

De todas formas, de acuerdo a lo anterior las potencias eléctricas generadas en 1 año son las siguientes:

- A plena capacidad (100 %) = 96.360 kWh (anuales).
- A capacidad real = 92.400 kWh (anuales).

Por lo tanto, el factor de planta real es el siguiente:

$$\frac{\textit{Capacidad real}}{\textit{Capacidad a full}} = \frac{92.400}{96.360} = 0.95 \sim (95 \%) \quad (\text{ec. 15})$$

2.5 Generalidades con respecto al equipo ORC

- 1. Variaciones de demanda en la producción**, el equipo ORC trabaja a cargas parciales, de acuerdo a esto él se adaptará de forma automática a la cantidad de carga térmica de entrada que se está recuperando en este caso del horno de cocción de ladrillos y de acuerdo a esto se auto regulará. En el caso del equipo ORC, el límite inferior de carga es 10% del valor nominal.
- 2. Inyección de energía eléctrica generada**, por lo general la energía eléctrica generada es inyectada a la red. Hay que hacer el alcance que, si se quisiese trabajar “fuera de la red”, los costos son mayores, dado que el generador debe ser de mayor envergadura y además se necesitan para “almacenar” la energía un banco de carga.

Referente al aspecto económico de estar o no conectado a la red, no se maneja información, a pesar de esto, cualquier excedente de energía generada será traspasada a la red. No existe claridad real de que se va hacer con la energía eléctrica generada por el equipo ORC por parte de Cerámicas Santiago, por lo tanto, lo anterior viene a describir las posibilidades que existen frente a este tema. Agregar adicionalmente que este punto no está dentro del alcance del análisis.

3. **En caso de corte de energía**, el equipo ORC está completamente monitoreado por sistemas electrónicos de seguridad, y en caso de cualquier tipo de falla se detendrá de forma automática, así luego de resolver el problema, se puede poner en marcha de forma sencilla y en poco tiempo. Cabe destacar que el equipo ORC estará instalado en la salida de los gases de combustión y no afectará prácticamente en el proceso productivo.
4. **Sincronización con un grupo electrógeno**, en caso de “black star” o arranque autógeno, se necesita que se trabaje en paralelo con otro generador.

2.6 Ventajas del Equipo ORC

El uso de sistemas ORC presenta las siguientes ventajas:

- El equipo no consume combustible, tampoco genera emisiones.
- Se consigue el funcionamiento directo del generador eléctrico sin equipo de reducción, por lo que las pérdidas mecánicas son mínimas.
- Rendimiento del ciclo ORC está entre un 95-98% referente al aprovechamiento de la fuente de calor (25-30 % eléctrico, resto térmico).
- Poco ruidosos, compactos y con bajo mantenimiento.
- Buen funcionamiento a cargas parciales.

En resumen, la obtención de potencia calorífica a través de los gases de combustión de la chimenea resulta confiable y segura ya que no afecta al proceso productivo de los ladrillos, se aprovecha una fuente de energía que actualmente se está desperdiciando mejorando así la eficiencia energética de la planta con la transformación de energía calorífica en energía eléctrica. La intervención en la chimenea con la instalación del intercambiador de calor no contempla mayor complejidad ni daño a la estructura del horno. El equipo ORC se instalará cercano a la chimenea para disminuir las pérdidas de cargas y calor asociadas a la circulación de agua caliente que va y viene entre el intercambiador de calor y el equipo ORC.

El proyecto desde el punto de vista técnico, es factible.

CAPÍTULO 3: FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO

3.1 Introducción al Capítulo

En este capítulo, se evaluará el proyecto para su puesta en marcha y su permanencia en el tiempo gracias al ahorro de energía, lo que significa saber si la inversión que se está realizando es justificada para el ahorro que se generará.

Primero, se levantarán los posibles ingresos y egresos de fondos que se espera que produzca el proyecto del equipo ORC, se elaborará una lista de estos, se ordenará en forma cronológica, debido al monto de la inversión, el lapso de recuperación de esta será en 20 años para calcular el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), y el periodo de recuperación de capital (PAYBACK).

Se realizará un estudio basándose en los siguientes términos:

- Inversión inicial.
- Consumo de electricidad del proyecto.
- Mantenimiento.

3.2 Inversión Inicial

La potencia eléctrica total que producirá el equipo ORC son 11 kW, en base a esto se han evaluado los estudios que contemplan el costo del equipo, el costo del traslado desde el origen, el costo de los equipos y accesorios que funcionan en conjunto con el equipo ORC.

3.3 Costo equipo ORC

Los costos del equipo ORC mencionados en la tabla n°6 son los siguientes: (el costo del traslado se estimó considerando el flete marítimo de un contenedor con medidas y peso parecidas desde España). [Anexo D]

Ítem	Monto
Costo Equipo ORC	\$ 75.420.720
Costo de traslado desde origen: España	\$ 10.000.000
TOTAL	\$ 85.420.720

Tabla n°6 Costo equipo ORC (valor conversión euro \$ 927).

3.4 Costo de conjunto Torre de Enfriamiento

Los costos del conjunto torre de enfriamiento mencionados en la tabla n°7, se puede apreciar que el valor más alto corresponde a “piping y accesorios” debido a la diversa cantidad de cañerías, uniones apernadas, soportes que se necesitan para el ensamble total. [Anexo B]

Ítem	Cantidad	Monto
Torre de enfriamiento	1	\$ 2.523.325
Bomba de agua	2	\$ 908.020
Piping y accesorios	7	\$ 3.215.236
TOTAL		\$ 6.646.581

Tabla n°7 Costos accesorios torre de enfriamiento.

3.5 Costo conjunto intercambiador de calor

La tabla n°8 muestra los ítems contemplados en el costo del conjunto intercambiador de calor, el valor más alto es el del intercambiador de calor en sí, debido a la materialidad de los tubos aletados que son de acero con aleta extruida de aluminio, especiales para la transferencia de calor [Anexo A].

Ítem	Cantidad	Monto
Intercambiador de calor	1	\$ 4.250.235
Bomba de agua	1	\$ 652.325
Piping y accesorios	6	\$ 3.355.365
TOTAL		\$ 8.257.925

Tabla n°8 Costos accesorios intercambiador de calor.

3.6 Costo total de las instalaciones del equipo ORC

El costo total de las instalaciones mencionadas en la tabla n°9 está referido a la mano de obra involucrada en todo el proceso de instalación del equipo ORC y el intercambiador de calor en la chimenea [Anexo C].

Ítem	Monto
Montaje Mecánico	\$ 8.000.000
Montaje Eléctrico (tableros, cableado y conexiones)	\$ 5.000.000
Aislación térmica	\$ 4.540.325
Monto total montaje	\$ 17.540.325

Tabla n°9 Costo total instalaciones.

El cuadro resumen de la tabla n°10 muestra el costo total del proyecto en la planta de Cerámica Santiago:

Ítem	Monto
Equipo ORC Rank puesto en Chile	\$ 85.420.720
Conjunto Torre de enfriamiento	\$ 6.646.581
Conjunto Intercambiador de calor	\$ 8.257.925
Instalación proyecto ORC	\$ 17.540.325
Inversión del proyecto	\$ 117.865.551

Tabla n°10 Costo total del proyecto.

3.7 Ingreso debido a la generación de electricidad por el proyecto

La generación de energía neta del equipo ORC, es de 11 kW, considerando que el equipo trabajara 350 días del año (total de 8.400 horas) y que la producción de ladrillos de Cerámica Santiago no se detiene salvo para mantenciones correctivas. Estas mantenciones programadas son una vez al año, ocurren en las dos primeras semanas de enero de cada año, será similar para el equipo ORC.

3.8 Costo por consumo de electricidad por el proyecto

Las potencias eléctricas que interactúan en el proyecto, y que servirán para realizar el balance eléctrico y posterior conclusión económica son:

- 1) Potencia eléctrica neta de consumo de motor ventilador torre de enfriamiento: 0,8 kW.
- 2) Potencia eléctrica neta de consumo de motor bomba agua torre de enfriamiento: 1,6 kW.
- 3) Potencia eléctrica neta de consumo de motor bomba agua intercambiador de calor chimenea: 1 kW.

La potencia neta que se consume en el proyecto completo es de: 3,4 kW.

Energía *anual consumida por el proyecto ORC es:*

$$3,4 \text{ kW} \cdot 8.400 \text{ h} = 28.560 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{año}} \quad (\text{ec. 16})$$

Costo por consumo de electricidad por el proyecto ORC es:

$$28.560 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{año}} \cdot 65 \frac{\$}{\text{kW} \cdot \text{h}} = 1.856.400 \frac{\$}{\text{año}} \quad (\text{ec. 17})$$

3.9 Costo por Mantenimiento

Según indicaciones del fabricante del equipo ORC, este entrega una descripción de mantenciones que se deben cumplir para el óptimo funcionamiento del equipo, entre las tareas diarias se encuentran chequeo eléctrico, presión del aceite térmico, control de niveles tanto del aceite térmico como del agua, check list a instrumentos de medición y monitoreo, como también anualmente se debe realizar una mantención preventiva, así, entre las tareas a realizar se debe revisar el estado de los motores, realizar balanceo al eje del generador, limpieza de intercambiadores, torre de enfriamiento y análisis de vibraciones. Cada 5 años se debe realizar un overhaul o mantenimiento cero horas, entre las tareas a realizar: cambio de rodamientos a descansos principales, revisión y rebobinado de motores, cambio de cableado y conexiones principales.

La mantención anual del ORC cuesta aproximadamente \$ 2.000.000 basándose en un plan de mantención mecánico, eléctrico y de control que nos refirió el proveedor español ORC Rank cuyo valor de mano de obra y materiales se basa en el mercado chileno y al igual que el overhaul que cuesta alrededor de \$ 4.500.000.

3.10 Depreciación

La depreciación es la razón entre el valor total de la adquisición del activo y el número de años en que es posible depreciar el activo, en nuestro proyecto, será a 20 años.

3.11 Criterios de evaluación económica

La evaluación de proyectos permite medir el valor, a base de la comparación de los beneficios y costos proyectados en el horizonte del proyecto y con el objetivo de medir su valor económico, financiero o social.

La evaluación de proyectos se realiza a través de ciertos indicadores cuyo resultado permite conocer las siguientes alternativas:

- 1) Decisión de aceptar o rechazar un proyecto.
- 2) Elegir una alternativa optima de inversión, cuando se tiene una cartera de varios proyectos.
- 3) Postergar la ejecución del proyecto, cuando existen limitaciones de capital para su implementación.

Los indicadores más utilizados en la evaluación de proyectos son el VAN y el TIR, además de otros que se describen a continuación:

El Valor actual neto, conocido como VAN, mide en valores monetarios, los recursos que aporta el proyecto por sobre la rentabilidad exigida a la inversión y después de recuperarla toda ella. Para ello, calcula el valor actual de todos los flujos futuros de caja, proyectados a partir del primer período de operación, y le resta la inversión total expresada en el momento cero.

$$VAN = Inv. + \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+i)^j} \quad (\text{ec. 18})$$

Donde:

F_j = Flujo neto en el periodo j .

n = Horizonte de evaluación.

Inv. = Inversión en el periodo 0.

i = Tasa de descuento del inversionista.

Los criterios para la toma de decisión son:

- $VAN > 0$, el proyecto es rentable
- $VAN = 0$, es indiferente realizar
- $VAN < 0$, el proyecto no es rentable

La Tasa interna de retorno que se muestra en la figura n°29, conocida como la TIR, mide la rentabilidad de un proyecto en forma de porcentaje y corresponde cuando el VAN es igual a cero.

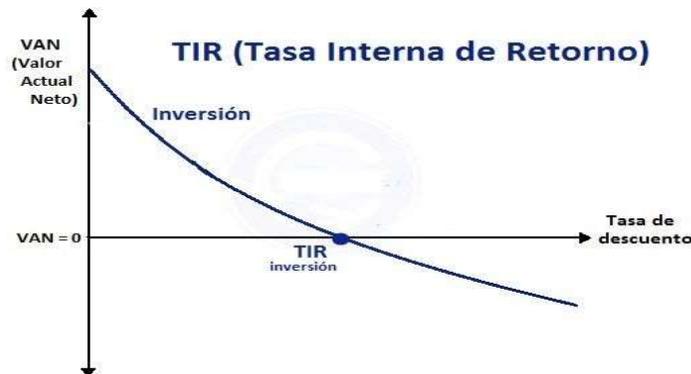


Figura n°29 Tasa interna de retorno. [16]

3.12 Criterios para evaluar la TIR

Si $TIR > Tasa de descuento$, se acepta

Los ingresos son mayores a los egresos, se cubre el requerimiento de la inversión inicial, se recupera el capital de trabajo y se generan excedentes de dinero.

Si $TIR < Tasa de descuento$, se rechaza

Los ingresos son menores a los egresos, no se cubre el requerimiento de la inversión inicial, no se recupera el capital de trabajo y no hay excedentes de dinero.

Si TIR = Tasa de descuento, indiferente

Los ingresos son iguales a los egresos. Por lo tanto, apenas se cubre el requerimiento de la inversión inicial, y apenas se recupera el capital de trabajo, y no hay excedentes de dinero.

El PAYBACK o "plazo de recuperación" es un criterio estático de valoración de inversiones que permite seleccionar un determinado proyecto sobre la base de cuánto tiempo se tardará en recuperar la inversión inicial mediante los flujos de caja. Resulta muy útil cuando se quiere realizar una inversión de elevada incertidumbre y de esta forma se tendrá una idea del tiempo que tendrá que pasar para recuperar el dinero que se ha invertido.

$$\text{Payback} = A + \frac{B}{C} \quad (\text{ec. 19})$$

Donde:

A = Año último de flujo actualizado acumulado negativo.

B = Último flujo actualizado acumulado negativo.

C = Flujo actualizado del año siguiente.

Los flujos son actualizados con la tasa de descuento actual según indicadores del Banco Central de Chile.

3.13 Tasa de descuento

La tasa de descuento, también llamada costo de oportunidad del capital, sirve para estimar el valor presente de los flujos de caja futuros y es usado para medir cuán rentable es un negocio. Cuanto

más inciertos sean los flujos de la empresa, mayor será la tasa de descuento y menor el incentivo para desarrollar un proyecto de inversión.

La tasa de descuento se puede descomponer en dos factores principales: (i) una tasa libre de riesgo, que representa el valor del dinero en el tiempo, y (ii) un premio por riesgo, que representa el retorno adicional exigido a la inversión debido a la variabilidad de sus flujos.

De acuerdo con el CAPM (Capital Asset Pricing Model) Modelo de variación de activos financieros, solo el riesgo sistemático o de mercado implica una mayor tasa de descuento.

La exposición al riesgo sistemático queda representada en el modelo mediante el parámetro beta.

El parámetro beta es una medida común de un título financiero encargada del riesgo no diversificable que responde al precio o valor de este al interactuar con las fuerzas del mercado. “El cambio porcentual esperado en el exceso de rentabilidad de una inversión debido a un 1% de cambio en el exceso de rentabilidad del portafolio de mercado”. [17]

En la práctica, el parámetro beta de un activo se calcula como la pendiente de la recta que entrega una regresión lineal entre los excesos de retorno del activo y los del mercado. Para esto se suele utilizar el IPSA (Índice selectivo de precio de acciones) o algún otro índice accionario como portafolio de mercado. Por lo tanto, para estimar la tasa de descuento de un proyecto se podría calcular su parámetro beta y aplicar la fórmula del modelo CAPM. Lamentablemente, en la mayoría de los proyectos no es posible encontrar empíricamente el parámetro beta. Esto se debe a que se evalúan proyectos futuros que, en general, no tienen información histórica de flujos ni retornos.

Para sobreponer esta dificultad, lo aconsejable es encontrar una empresa o grupo de ellas que se transen en la bolsa y que tengan proyectos de riesgo similares al que se desea evaluar. En este estudio, la empresa cuenta con capital propio para la inversión.

Capital Asset Pricing Model (CAPM)

(ec. 20)

$$CAPM = K_{LR} + (K_M - K_{LR}) * \beta$$

Donde:

K_{LR} = Tasa libre de riesgo.

$(K_M - K_{LR})$ = Prima de riesgo.

K_M = Rentabilidad del mercado.

β = Beta del activo.

3.14 Tasa libre de riesgo

La tasa libre de riesgo que muestra la Figura n°30 es un concepto teórico en economía y que se utiliza para saber la rentabilidad al invertir en un activo que se considera que es 100% seguro aludiendo a su nombre, tasa libre de riesgo. Esto hace que el activo que se considera ofrezca un rendimiento seguro en una unidad monetaria y en un plazo determinado. A continuación, se presenta en forma gráfica la tasa libre de riesgo del mercado chileno.

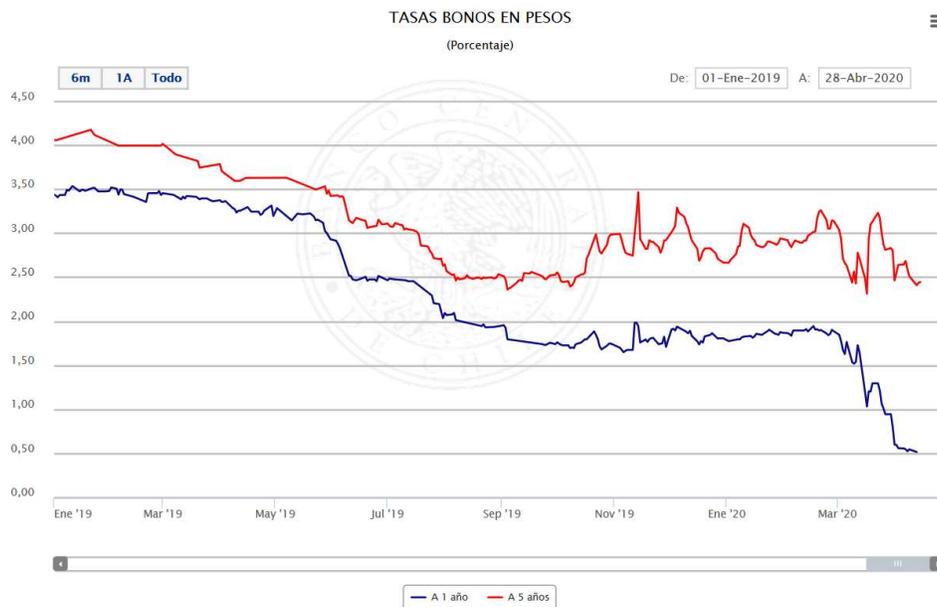


Figura n°30 Tasa libre de riesgo.

Tasas Libres de Riesgo Reales
(Porcentaje)

La tabla n°11 muestra la tasa de riesgo que indica la Figura n°30, es un concepto teórico en economía y que se utiliza para saber la rentabilidad al invertir en un activo que se considera que es 100% seguro.

	TLR1 ⁽¹⁾	TLR5 ⁽²⁾
Promedio	2.2	3.7
Desviación estándar	3.4	2
Mínimo	0.5	2.9
Máximo	3.5	4.2

Tabla n°11 Tabla Tasa libre de riesgo real.

(1) TLR1: Tasa libre de riesgo a 1 año.

(2) TLR5: Tasa libre de riesgo a 5 años.

Fuente: Banco Central de Chile y Bolsa de Comercio de Santiago. [18]

Se ha considerado el promedio de la tasa libre de riesgo a 5 años igual a 3.7.

La empresa de ladrillos pertenece al sector económico minerales no metálicos, se tomaron como datos los parámetros Betas de Cementos, Melón y Cristales, cuyos valores son 1.3, 0.9 y 1.2 respectivamente. [19]

$$\beta = 1$$

La rentabilidad del mercado chileno se utilizó el indicador IPSA, cuyo valor es 16 % para el día 17 de abril del 2020. [20]

3.15 Cálculo de la tasa de descuento

Ya definida la tasa de descuento anteriormente, se procederá a calcular:

TLR: tasa libre de riesgo

β : coeficiente Beta

RM: rentabilidad de mercado

$$CAPM = K_{LR} + (K_M - K_{LR}) \cdot \beta$$

$$CAPM = 3.7\% + (16\% - 3.7\%) \cdot 1$$

La tasa de descuento considerada es del 16%.

3.16 Impuesto a las utilidades

Es un impuesto sobre las utilidades de las empresas comerciales, industriales, mineras, servicios, etc., que se aplica a las ganancias obtenidas cada año. Se hace presente que, a contar del año tributario 2018, año comercial 2017, la tasa general del impuesto a aplicar a cualquier renta clasificada en dicha categoría será de un 25%. [21]

3.17 Flujo de caja y definición de sus ítems

Es un informe financiero que presenta un detalle de los flujos de ingresos y egresos de dinero que tiene una empresa en un periodo dado y que se puede aplicar como en nuestro caso, a un proyecto de ingeniería para conocer en forma rápida la liquidez de la empresa, entregando una información clave que ayuda a tomar decisiones a la hora de invertir.

A continuación, algunas definiciones de los ítems que conforman el flujo de caja:

El ingreso es el ahorro de energía que se produce al implementar el proyecto.

La Venta de Activo es el valor dispuesto a vender el activo, el cual se transformará en Capital de trabajo para la compra de un nuevo activo.

El valor libro o costo contable de un activo es el valor inicial del activo menos la depreciación acumulada.

El costo fijo son los costos que permanecen constantes dentro de un determinado tiempo sin importar si cambia el volumen de producción de energía; por ejemplo: sueldos a empleados, costos de mantención y overhaul.

3.18 Flujo de caja

ITEMS (Miles\$)	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13	AÑO 14	AÑO 15	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19	AÑO 20	
INGRESO POR PRODUCCIÓN DE ENERGÍA		6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006	6006
VENTA DE ACTIVO																						30
COSTO POR CONSUMO DE ELECTRICIDAD		-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856	-1856
COSTO FIJO (MANTENCIÓN)		-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000	-2000
COSTO FIJO (OVERHAUL)						-4500					-4500					-4500						-4500
DEPRECIACIÓN DEL ACTIVO		-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893	-5893
VALOR LIBRO																						0
UTILIDAD		-3744	-3744	-3744	-3744	-8244	-3744	-3744	-3744	-3744	-8244	-3744	-3744	-3744	-3744	-8244	-3744	-3744	-3744	-3744	-3744	-8214
UTILIDAD NETA		-3744	-3744	-3744	-3744	-8244	-3744	-3744	-3744	-3744	-8244	-3744	-3744	-3744	-3744	-8244	-3744	-3744	-3744	-3744	-3744	-8214
DEPRECIACIÓN DEL ACTIVO		5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893	5893
VALOR LIBRO																						-5
INVERSIÓN	-117865																					
FLUJO	-117865	2149	2149	2149	2149	-2351	2149	2149	2149	2149	-2351	2149	2149	2149	2149	-2351	2149	2149	2149	2149	2149	-2321

Tabla n°12 Flujo de Caja.

Se evalúa el proyecto en un periodo de 20 años esperando que la vida útil del equipo ORC dure por lo menos ese tiempo, considerando el buen funcionamiento y mantención normal con los overhaul a realizar cada 5 años. Se observa que el único ingreso es la producción de energía eléctrica basado en un precio de la electricidad de 65 \$/kWh con un valor de 92.400 kWh anuales de potencia

eléctrica. Se estima un costo de mantención de \$ 2.000.000 anuales dado por el fabricante Rank ORC, el equipo no presenta piezas y/o materiales que requieran cambiarse anualmente dada su hermeticidad.

No se ha considerado el impuesto a las utilidades, debido a que todas estas fueron negativas.

3.19 Calculo del VAN, TIR y Payback

Hoy en día los softwares facilitan bastante la obtención de datos y parámetros, en el ámbito financiero el programa Excel puede calcular tanto el VAN, TIR y Payback a través de sus fórmulas y funciones matemáticas, en base a esto y con el flujo de caja obtenido se tienen los siguientes resultados:

Tasa de retorno: 16%

Van: - \$ 93.965

TIR: -13%

Numero de períodos: 20 años

El VAN es menor que cero a los 20 años, esto indica que el proyecto no tiene ganancias por lo que deja de ser atractivo para invertir, y sumado que la TIR es menor que la tasa de retorno ($16\% > -13\%$), el proyecto en consecuencia no es rentable.

Para el cálculo del Payback, se ha obtenido lo siguiente:

Período	Flujo de caja	Flujo actualizado	Flujo actualizado acumulado
0	-117865	-117865	-117865
1	2149	1852,59	-116012,41
2	2149	1597,06	-114415,36
3	2149	1376,77	-113038,58
4	2149	1186,87	-111851,71
5	-2351	-1119,34	-112971,05
6	2149	882,04	-112089,01
7	2149	760,38	-111328,63
8	2149	655,50	-110673,13
9	2149	565,09	-110108,05
10	-2351	-532,93	-110640,98
11	2149	419,95	-110221,03
12	2149	362,03	-109859,00
13	2149	312,09	-109546,91
14	2149	269,04	-109277,86
15	-2351	-253,74	-109531,60
16	2149	199,94	-109331,66
17	2149	172,37	-109159,29
18	2149	148,59	-109010,70
19	2149	128,10	-108882,60
20	-2321	-119,27	-109001,87

Tabla n°13 *Flujo de caja acumulado para cálculo del Payback.*

De la tabla n°13, se observa que todos los flujos actualizados acumulados dan negativos, por lo cual, en el horizonte de 20 años de estudio económico del proyecto, no se recupera la inversión.

3.20 Análisis de Sensibilidad para el VAN y la TIR

El análisis de sensibilidad es una herramienta de gestión que permite a las empresas predecir resultados de un proyecto ayudando a tomar decisiones de inversión, en este caso, como lo muestra la tabla n°14, consiste en calcular nuevos VAN con tasas de retorno dadas, con estas nuevas variables se pueden hacer estimaciones para saber cuándo el proyecto es rentable, a continuación, los parámetros para el análisis obtenido por software Excel:

VAN	Tasa de retorno
-\$ 93.965	16%
-\$ 94.856	14%
-\$ 95.624	12%
-\$ 96.216	10%
-\$ 96.562	8%
-\$ 96.565	6%
-\$ 96.089	4%
-\$ 94.940	2%
-\$ 92.848	0%

Tabla n°14 *Análisis de sensibilidad Caso base.*

Al realizar el análisis de la tabla n°14, se observa que al disminuir la tasa de retorno hasta un 0% se mantiene un VAN negativo, por lo tanto, en este trabajo de titulación solo existe factibilidad técnica, dado que el alto monto de la inversión y la poca ganancia en términos de potencia eléctrica, hacen inviable la implementación de un equipo ORC de estas características.

3.21 Análisis bidimensional

Este análisis, muestra las variables que inciden sustancialmente en el VAN, el precio unitario de energía eléctrica y el costo de inversión del equipo ORC. Mediante un análisis de hipótesis y el programa Excel, se ha obtenido la siguiente tabla n°15. [22]

		PRECIO DE ELECTRICIDAD (\$/Kwh)															
		62	65	68	71	74	77	80	83	86	89	92	95	98	101	104	107
COSTOS DE INVERSIÓN (miles \$)	-\$ 93.965																
	-\$ 122.180	-98664	-97685	-96706	-95727	-94749	-93770	-92791	-91812	-90833	-89854	-88875	-87896	-86918	-85939	-84960	-83981
	-\$ 127.180	-102974	-101996	-101017	-100038	-99059	-98080	-97101	-96122	-95143	-94165	-93186	-92207	-91228	-90249	-89270	-88291
	-\$ 122.180	-98664	-97685	-96706	-95727	-94749	-93770	-92791	-91812	-90833	-89854	-88875	-87896	-86918	-85939	-84960	-83981
	-\$ 117.865	-94944	-93965	-92986	-92008	-91029	-90050	-89071	-88092	-87113	-86134	-85155	-84177	-83198	-82219	-81240	-80261
	-\$ 112.865	-90634	-89655	-88676	-87697	-86718	-85740	-84761	-83782	-82803	-81824	-80845	-79866	-78887	-77909	-76930	-75951
	-\$ 107.865	-86324	-85345	-84366	-83387	-82408	-81429	-80450	-79471	-78493	-77514	-76535	-75556	-74577	-73598	-72619	-71640
	-\$ 102.865	-82013	-81034	-80055	-79077	-78098	-77119	-76140	-75161	-74182	-73203	-72224	-71246	-70267	-69288	-68309	-67330
	-\$ 97.865	-77703	-76724	-75745	-74766	-73787	-72808	-71830	-70851	-69872	-68893	-67914	-66935	-65956	-64977	-63999	-63020
	-\$ 92.865	-73392	-72414	-71435	-70456	-69477	-68498	-67519	-66540	-65562	-64583	-63604	-62625	-61646	-60667	-59688	-58709
	-\$ 87.865	-69082	-68103	-67124	-66146	-65167	-64188	-63209	-62230	-61251	-60272	-59293	-58315	-57336	-56357	-55378	-54399
	-\$ 82.865	-64772	-63793	-62814	-61835	-60856	-59877	-58899	-57920	-56941	-55962	-54983	-54004	-53025	-52046	-51068	-50089
	-\$ 77.865	-60461	-59483	-58504	-57525	-56546	-55567	-54588	-53609	-52630	-51652	-50673	-49694	-48715	-47736	-46757	-45778
	-\$ 72.865	-56151	-55172	-54193	-53214	-52236	-51257	-50278	-49299	-48320	-47341	-46362	-45384	-44405	-43426	-42447	-41468
	-\$ 67.865	-51841	-50862	-49883	-48904	-47925	-46946	-45968	-44989	-44010	-43031	-42052	-41073	-40094	-39115	-38137	-37158
	-\$ 62.865	-47530	-46552	-45573	-44594	-43615	-42636	-41657	-40678	-39699	-38721	-37742	-36763	-35784	-34805	-33826	-32847
	-\$ 57.865	-43220	-42241	-41262	-40283	-39305	-38326	-37347	-36368	-35389	-34410	-33431	-32452	-31473	-30495	-29516	-28537
	-\$ 52.865	-38910	-37931	-36952	-35973	-34994	-34015	-33036	-32058	-31079	-30100	-29121	-28142	-27163	-26184	-25206	-24227
-\$ 47.865	-34599	-33621	-32642	-31663	-30684	-29705	-28726	-27747	-26768	-25790	-24811	-23832	-22853	-21874	-20895	-19916	
-\$ 42.865	-30289	-29310	-28331	-27352	-26374	-25395	-24416	-23437	-22458	-21479	-20500	-19521	-18543	-17564	-16585	-15606	
-\$ 37.865	-25979	-25000	-24021	-23042	-22063	-21084	-20105	-19127	-18148	-17169	-16190	-15211	-14232	-13253	-12274	-11296	
-\$ 32.865	-21668	-20689	-19711	-18732	-17753	-16774	-15795	-14816	-13837	-12859	-11880	-10901	-9922	-8943	-7964	-6985	
-\$ 27.865	-17358	-16379	-15400	-14421	-13443	-12464	-11485	-10506	-9527	-8548	-7569	-6590	-5612	-4633	-3654	-2675	
-\$ 22.865	-13048	-12069	-11090	-10111	-9132	-8153	-7174	-6196	-5217	-4238	-3259	-2280	-1301	-322	657	1635	
-\$ 17.865	-8737	-7758	-6780	-5801	-4822	-3843	-2864	-1885	-906	73	1051	2030	3009	3988	4967	5946	
-\$ 12.865	-4427	-3448	-2469	-1490	-511	467	1446	2425	3404	4383	5362	6341	7319	8298	9277	10256	
-\$ 7.865	-117	862	1841	2820	3799	4778	5757	6735	7714	8693	9672	10651	11630	12609	13588	14566	
-\$ 2.865	4194	5173	6151	7130	8109	9088	10067	11046	12025	13004	13982	14961	15940	16919	17898	18877	

Tabla n°15 Análisis bidimensional.

De la tabla N°15, se puede visualizar en la zona de color verde, que cualquier combinación entre precio de energía eléctrica y costo de inversión, el proyecto será rentable.

Por ejemplo: si el costo de la inversión es de \$ 17.865.000 y el precio de la energía es de 73 \$/kWh, el proyecto generará ganancias. En términos de porcentaje se debe realizar una reducción del 85% del precio de la inversión inicial y un aumento del 12% del valor del kWh.

Según los criterios de evaluación económica, el proyecto ORC no es rentable porque el VAN es negativo en el horizonte evaluado, la TIR es menor a la Tasa de Descuento y no se recupera el monto de la inversión según el Payback.

CAPÍTULO 4: IMPACTO EN EL PROCESO PRODUCTIVO

4.1. Introducción al Capítulo

El presente capítulo viene a esclarecer de forma cuantitativa el impacto que provocara la mejora en la implementación del sistema de enfriamiento en dicho sector del horno.

Dado los resultados negativos anteriormente indicados se debe definir si desde el punto de vista de la producción y la productividad existe algún impacto positivo o simplemente no habrá ningún efecto.

Para identificar los problemas que están ocurriendo en este sector, se deben manejar ciertos parámetros que ayudaran a obtener una idea concreta y con esto cuantificar lo que existe actualmente y las ventajas que se pueden obtener.

4.2. Introducción a los conceptos de productividad y producción

El concepto de producción hace referencia a producir o crear bienes y/o servicios, mientras que el concepto de productividad se refiere a la utilización eficiente de los recursos (insumos) al producir bienes y/o servicios (productos). En el fondo, el concepto de producción y productividad se encuentran relacionados, pero no pueden ser interpretados como sinónimos (situación que generalmente suele ocurrir). Por otro lado, si se aprecian ambos conceptos en términos cuantitativos, se puede observar que la producción se define como la cantidad de productos elaborados en un determinado periodo, mientras que la productividad es la razón entre la cantidad producida y los insumos utilizados. Es por este motivo que ambos conceptos, si bien es cierto se encuentran relacionados, no pueden ser interpretados como si fuese equivalentes. Es decir, el hecho de que la producción se haya incrementado en un determinado periodo no implica necesariamente que la productividad ha aumentado, sino que para determinar la validez de dicha afirmación se deben estudiar en forma conjunta los valores de producción y los insumos empleados en el periodo que se analiza. [23]

1. Productividad Total

El concepto de productividad total se define como la razón entre la producción total y la sumatoria de todos los factores del insumo. Es así como este concepto pretende reflejar el impacto conjunto de todos los insumos al fabricar los productos, o expresado, en otros términos, la productividad total hace referencia a la eficiencia, con que se están utilizando los recursos (en términos globales) en la fabricación de determinados bienes y/o servicios. Cabe destacar que debido al hecho de que este concepto involucra al total de los insumos ocupados en la producción, cada uno de estos debe ser expresado en sus respectivos valores monetarios, para de esta manera poder indicarlos en una medida común que permita determinar el impacto conjunto de su utilización. Por otro lado, cuando la producción involucra a más de un tipo de producto, también se hace necesaria la transformación de las unidades físicas a sus correspondientes valores monetarios, para de este modo poder obtener todos los valores en una medida común, al igual que el caso de los insumos.

2. Productividad Parcial

La productividad parcial es el cociente entre la producción total y un solo tipo de insumo. En otras palabras, el concepto de productividad parcial permite apreciar el grado de eficiencia con que se utiliza un determinado insumo en la elaboración de la producción total. Este concepto, a diferencia de la productividad total, permite establecer la relación entre producción e insumos en unidades físicas; sin embargo, el hecho de transformar ambos términos en sus equivalentes valores monetarios presenta una serie de beneficios al momento de realizar el análisis de las productividades parciales en conjunto con la productividad total.

En términos matemáticos, los dos conceptos de productividad presentados anteriormente pueden ser expresados de la siguiente forma:

$$Productividad\ Total = \frac{Producción\ Total}{Insumos\ (Mano\ de\ Obra + Materiales + Energía + Capital + Gastos\ Generales)}$$

(ec. 21)

dónde:

- Producción total (\$)
- Insumos: (mano de obra, materiales, energía, capital, gastos generales) (\$)

Por lo tanto, la productividad total es un indicador adimensional.

$$Productividad\ Parcial\ Materiales = \frac{Producción\ Total}{Insumo\ Materiale} \quad \text{(ec. 22)}$$

$$Productividad\ Parcial\ Mano\ de\ Obra = \frac{Producción\ Total}{Insumo\ Mano\ de\ Obra} \quad \text{(ec. 23)}$$

$$Productividad\ Parcial\ Capital = \frac{Producción\ Total}{Insumo\ Capital} \quad \text{(ec. 24)}$$

$$Productividad\ Parcial\ Gastos\ Generales = \frac{Producción\ Total}{Insumo\ Gastos\ Generales} \quad \text{(ec. 25)}$$

dónde:

- Producción total (\$)
- Insumos: (mano de obra, materiales, energía, capital, gastos generales) (\$)

Por lo tanto, la productividad parcial es un indicador adimensional.

4.3. Calculo de productividad total

Para calcular el indicador de productividad total, se reunieron los siguientes datos:

Insumos

1. Mano de obra

Cada proceso de cocción en el horno ladrillero, dura aproximadamente 12 h, por lo tanto, se deduce que hay tres turnos diarios, donde en cada turno trabajan 10 operarios.

Cada operario recibe un sueldo de \$ 500.000 mensuales, por lo tanto:

$$\frac{\$ 500.000}{30 \text{ dias (mes)}} = \$ 16.667 \text{ diariamente de ganancia cada operario.}$$

$$\begin{aligned} \$ 16.667 * 10 \text{ operarios por turno} &= \$ 166.670 * 3 \text{ turnos} = \\ & \$ 500.010 \text{ (mano de obra de 30 operarios por día)} \end{aligned}$$

$$\text{Mensualmente: } \$ 500.010 * 30 \text{ dias} = \$ 15.000.300$$

2. Materiales

Para estimar este costo se ha considerado lo siguiente en la tabla n°16: (Costos entregados por Cerámica Santiago).

Costo asociado	Valor
Extracción de materia prima, mismo sector planta	\$ 300.000
Acopio y traslado de materia prima en planta	\$ 100.000
Desgaste de maquinaria para extracción	\$ 200.000
Mantenimiento de maquinaria para extracción	\$ 400.000
TOTAL precio general Arcilla	\$ 1.000.000

Tabla n°16 Precio general de materiales de la arcilla.

Por lo tanto, se considera como valor estimativo por concepto de materiales: \$ 1.000.000.

3. Energía

Cerámica Santiago consume por concepto de energía eléctrica 780.000 kWh (mensuales).

Por lo tanto, esto queda:

$$780.000 \text{ kWh} * \$ 65 = \$ 50.700.000$$

Se considerará el valor del kWh/\$ = 65

(Para calcular el precio del kWh se tiene la referencia del precio medio de mercado histórico de la comisión nacional de energía).

Ahora por concepto de consumo de combustible es: 6.752.354 kWh/mensuales.

El valor anterior fue entregado por la empresa Cerámica Santiago.

Se ha considerado un valor de poder calorífico superior promedio entre la mezcla de butano + propano = 11.950 kcal/kg ~ 13,80 kWh/kg [Anexo F].

Por lo tanto:

$$\frac{6,752,354 \text{ kWh}}{13,80 \text{ kWh /kg}} = 489.301,01 \text{ kg}$$

Se considera la siguiente densidad para el GLP = 0,508 kg/l

De esta forma la cantidad de combustible mensual necesaria es:

$$\frac{489.301,01 \text{ kg}}{0,508 \text{ kg/l}} = 963.190,96 \text{ l de GLP mensual}$$

Precios al por mayor y con impuestos, en Región Metropolitana (*)		
Producto	Precio (\$/lt)	Variación total (\$/lt)
Gasolina 93	638,9	-5,6
Gasolina 95	663	-5,6
Kerosene	354,2	1,4
Diesel		-5,6
Precio al por mayor del GLP con impuestos, en \$/lt, en Concón (**)		
Gas licuado de petróleo	189,5	-3,4

Tabla n°17 Precio de combustibles.[24]

Considerando el valor del GLP indicado en tabla n°17, entonces queda de la siguiente manera:

$$963.190,96 * \$ 189,5 = \$ 182.524.687$$

4. Capital

Se presenta la tabla n°18, con detalles mensuales de insumos:

Concepto	Valor/mensual
Mano de obra	\$ 15.000.300
Materiales	\$ 1.000.000
Energía (eléctrica)	\$ 45.240.000
Energía (combustible)	\$ 182.524.687
Gastos generales	\$ 2.000.000
TOTAL GRAL	\$ 245.764.987

Tabla n°18 Resumen capital.

El costo del capital fue considerado como la sumatoria de todos los conceptos de insumos en un tiempo de un mes.

Por lo tanto, para el concepto de capital se consideran: \$ 245.764.987.-

5. Gastos Generales

En términos generales, se pueden presentar ciertos costos (tabla n°19) que mostraran el total de gastos generales considerados (mensualmente):

Costo asociado	Valor
Costo por RRHH	\$ 1.000.000
Costo por bonificaciones	\$ 700.000
Costo por maquinaria adicional requerida	\$ 300.000
TOTAL general Gastos Generales	\$ 2.000.000

Tabla n°19 Gastos generales.

La producción diaria corresponde a 800 Ton/día. Información entregada por Cerámica Santiago.

Por lo tanto, la producción en un mes seria de:

$$800 * 30 \text{ días} = 24.000 \text{ Ton/mes}$$

De acuerdo a esto se considerará el ladrillo modelo SANTIAGO TE 11 (tabla n°20).

Modelo Ladrillo	SANTIAGO TE 11
Dimensiones (cm)	32 x 15,4 x 11,3
Peso (kg)	4,78
Unidades/m ² cantería 1.5 cm	23
Hiladas en 1 m altura cantería 1,5 cm	7,5 unid.
Zona térmica	1, 2, 3, 4 y 5

Tabla n°20 Características del ladrillo Santiago TE 11. [25]

Se hace el alcance que el valor de este ladrillo, se obtiene de una casa comercial, su valor de venta es de \$ 590.

Por lo tanto, si el peso del ladrillo por unidad es: 4,78 kg. Esto equivale a 0,00478 Ton.

Entonces:

$$\frac{24.000 \text{ Ton}}{0,00478 \text{ Ton}} = 5.020.920,50 \text{ ladrillos producidos al mes}$$

En términos monetarios:

$$5.020.920,50 \text{ unidades} * \$ 590 = \$ 2.962.343.095$$

Ahora se puede obtener el indicador de productividad total:

$$\frac{\$ 2.962.343.095}{(\$ 15.000.300 + \$ 1.000.000 + \$ 50.700.000 + \$ 182.524.687 + \$ 250.000.000 + \$ 2.000.000)}$$

$$\text{Productividad total} = \frac{\$ 2.962.343.095}{\$ 501.224.987} = 5,91 (-)$$

La diferencia entre la situación actual con respecto a la productividad parcial en insumo electricidad, en comparación con la nueva situación (implementación de equipo ORC), se menciona a continuación:

4.4. Productividad Parcial Insumo Electricidad

Situación actual:

Se ha citado nuevamente el valor de consumo por concepto de electricidad de Cerámica Santiago en un período de un mes:

$$780.000 \text{ kWh} * \$ 65 = \$ 50.700.000$$

$$\text{Productividad parcial electricidad: } \frac{\$ 2.962.343.095}{\$ 50.700.000} = 58,42 (-)$$

Situación futura:

Cerámica Santiago actualmente consume por concepto de electricidad:

$$780.000 \text{ kWh (mensuales)} * 12 = 9.360.000 \text{ kWh (anuales)}$$

En términos monetarios:

$$9.360.000 \text{ kW h} * \$ 65 = \$ 608.400.000 \text{ (anuales)}$$

El equipo ORC tiene la capacidad de generar la siguiente cantidad anual de potencia eléctrica real: 92.400 kWh (anuales).

Por lo tanto:

$$9.360.000 - 92.400 = 9.267.600 \text{ kWh (anuales)}$$

En términos monetarios:

$$9.267.600 \text{ kW h} * \$ 65 = \$ 602.394.000 \text{ (anuales)}$$

Ahora si la nueva situación se lleva a términos de productividad:

$$\frac{9.267.600 \text{ kW}}{12} = 772.300 \text{ kW h(mensuales)}$$

$$772.300 \text{ kW h} * \$ 65 = \$ 50.199.500$$

$$\textit{Productividad parcial electricidad: } \frac{\$ 2.962.343.095}{\$ 50.199.500} = 59,01 (-)$$

Estamos en condiciones de obtener el indicador de productividad total a la situación futura, asociado al ítem de electricidad:

$$\frac{\$ 2.962.343.095}{(\$ 15.000.300 + \$ 1.000.000 + \$ 50.199.500 + \$ 182.524.687 + \$ 250.000.000 + \$ 2.000.000)}$$

$$\textit{Productividad total} = \frac{\$ 2.962.343.095}{\$ 500.724.487} = 5,91 (-)$$

Como se puede observar la productividad parcial respecto a la electricidad no se incrementa de manera considerable, y la productividad total se mantiene, esto debido a los 11 kw de potencia eléctrica que genera el equipo ORC.

Desde el punto de vista de la productividad parcial por concepto de consumo de electricidad para una misma cantidad de producción diaria, el equipo ORC es un aporte, pero no influye en la productividad total de la empresa.

VI. CONCLUSIONES

El presente trabajo de titulación ha querido mostrar que a través de una adecuada recopilación de información que permita analizar y evaluar en forma clara y concisa un sistema productivo se podrá mejorar la eficiencia energética de las empresas por medio de nuevas tecnologías presentes en el mercado. En este caso, se ha evaluado la implementación de un equipamiento que tiene la capacidad de aprovechar energía residual, que actualmente se está desaprovechando y que por medio del modelo termodinámico llamado ciclo orgánico de Rankine se puede obtener energía eléctrica.

La tecnología en estudio es un equipo ORC procedente de la empresa española Rank, que cuenta con la capacidad de aprovechar fuentes de calor de baja emisión como el de los gases de combustión en el sector de la chimenea del horno de cocción de ladrillos de la empresa Cerámica Santiago.

- La cantidad de energía en forma de calor disponible en el sector de la chimenea de escape de los gases de combustión del horno de cocción, es suficiente para ser extraído por el equipo ORC, y conjuntamente no interfiere de ninguna manera en el proceso de producción. Por lo tanto, técnicamente el proyecto es factible.
- El resto del equipamiento, tales como: torre de enfriamiento, bombas, intercambiador de calor, accesorios, piping, etc. Es técnicamente viable adquirirlo con proveedores nacionales e internacionales e instalarlos en el sector donde se pretende recuperar calor residual, de los gases de combustión del horno de cocción de ladrillos.
- Desde el punto de vista económico, posterior al análisis realizado, se puede apreciar una disminución del gasto por concepto de energía eléctrica equivalente a 1% del total consumido en un año normal por la planta. Sin embargo, en base a los indicadores económicos tales como el VAN, TIR y PAYBACK, arrojaron que el proyecto no es viable debido a la alta inversión inicial, versus la recuperación en base a la ganancia de energía eléctrica en el tiempo.

- Con respecto a la producción, ha mostrado que a pesar de que el indicador de productividad parcial como concepto de electricidad del proceso de cocción mejoro cerca de 1%, la mejora a la productividad total se mantiene sin cambios.

VII. RECOMENDACIONES

La recomendación más importante es no dejar de considerar este tipo de tecnología en las propuestas del ámbito energético del país, evaluando factibilidades como una alternativa viable en el caso de que los resultados fueran positivos. Es así como los gobiernos, conjuntamente con el Ministerio de Energía y las diferentes entidades relacionadas al tema energético, deben divulgar a los diferentes actores e inversionistas, información relevante con respecto a esta tecnología.

Es necesario realizar diversos estudios con respecto a esta tecnología y su viabilidad en nuestro país, haciendo revisión de variados procesos donde se pueda implementar esta tecnología, contando con la presencia de profesionales y organizaciones competentes en la materia.

Existen opiniones de diversos fabricantes extranjeros de esta tecnología, informando que nuestro país es potencialmente atractivo en todas las fuentes de calor, principalmente en la zona norte del país para aplicaciones como energía solar térmica y geotérmica.

Por lo tanto, la implementación y aceptación (previa evaluación) de esta tecnología, depende en gran medida de los riesgos que quieran tomar los inversionistas.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Santiago, “Ceramica Santiago,” 2021. <https://www.ceramicasantiago.cl/nosotros/>
- [2] C. Santiago, “Ceramica Santiago,” 2021. <https://www.google.com/maps/place/Italia+1000,+Batuco,+Lampa,+Región+Metropolitana/@-33.2253822,-70.8180336,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x96629626479928c7:0x67dc3d8b95ea1d35!8m2!3d-33.2253822!4d-70.8158449>
- [3] Ladrilladeros, “Ladrilladores,” 2015. <https://ladrilladores.wordpress.com/2015/03/04/proceso-de-elaboracion-de-los-ladrillos/>
- [4] C. Santiago, “Ceramica Santiago,” *La Arcilla*, 2018. <http://www.ceramicasantiago.cl/proceso-productivo/>
- [5] U. de P. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, “Proceso productivo de los ladrillos de arcilla producidos en la región de Piura,” 2011. [Online]. Available: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/1755>
- [6] P. Colombia, “Programa Eficiencia Energetica en Ladrilleras Artesanales - EELA.,” 2011. [Online]. Available: <https://docplayer.es/17410560-Characterizacion-de-los-hornos-usados-en-la-industria-ladrillera.html>
- [7] A. M. Graziani, “Materia Optativa: Construccion Industrializada Liviana,” *Flujo de Calor y Vapor de agua en cerramiento opacos*, 2013. <https://sistemacil.files.wordpress.com/2013/09/cil-flujo-higrotc3a9rmico.pdf>
- [8] J. C. Pinilla, K. Luengo, F. Lobo, M. Navarrete, and F. Navarrete, “Normativas aplicables a la producción de pellet en Chile,” *Norm. Apl. a la Prod. pellet en Chile*, 2021, doi: 10.52904/20.500.12220/31344.
- [9] Grebus, “El ciclo de Rankine orgánico y sus aplicaciones en la recuperación de calor,” 2015. <https://grebus.wordpress.com/2015/09/17/el-ciclo-de-rankine-organico->

y-sus-aplicaciones-en-la-recuperacion-de-calor/

- [10] Probio, “Microgeneracion,” 2013.
<http://www.probio.dne.gub.uy/cms/index.php/generacion/micro-generacion>
- [11] L. sánchez-Junco Fiter, “Aplicación Del Ciclo Orgánico De Rankine Para El Aprovechamiento De Calor Residual En Una Refinería,” p. 106, 2012, [Online]. Available:
http://oa.upm.es/15019/%0Ahttp://oa.upm.es/15019/1/PFC_Laia_Sanchez_Junco_Fiter.pdf
- [12] RANK, “ORC RANK.” <https://www.rank-orc.com/es/rank-lt/>
- [13] HTRI, “Software HTRI.” <https://www.htri.net/>
- [14] Comision Nacional de Energia, “Precio Medio de Mercado,” 2019. [Online]. Available: <https://www.cne.cl/precio-medio-de-mercado-2/2019-2/>
- [15] Turboden, “ORC TURBODEN.” <https://www.turboden.com/products/2463/orc-system>
- [16] Economipedia, “Tasa Interna de Retorno.” <https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html>
- [17] L. Gitman and M. Joehnk, *Gitman* © joehnk. 2009. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ITMNR9MUjuAC&oi=fnd&pg=PR11&dq=fundamentos+de+inversiones+&ots=A6DrCLMn3O&sig=WkEmfbcqnxcdUDXjMImGY-5fSh0#v=onepage&q=fundamentos+de+inversiones&f=false>
- [18] Banco Central de Chile, “Tasas de Interes,” 2019.
https://si3.bcentral.cl/Siete/ES/Siete/Cuadro/CAP_TASA_INTERES/MN_TASA_INTERES_09/TMS_15/T311?cbFechaInicio=2019&cbFechaTermino=2020&cbFrecuencia=QUARTERLY&cbCalculo=NONE&cbFechaBase=
- [19] C. A. Díaz Contreras and F. H. Higuera Cartes, “Contraste empírico del CAPM en el mercado accionario chileno,” *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 20, no. 2, pp. 255–266,

2012, doi: 10.4067/s0718-33052012000200012.

- [20] D. Macro, “IPSA Chile.” <https://datosmacro.expansion.com/bolsa/chile>
- [21] Servicio de Impuestos Internos, “Impuesto a las utilidades.”
https://www.sii.cl/aprenda_sobre_impuestos/impuestos/imp_directos.htm
- [22] C. Nassir Sapag, *Preparación y evaluación de proyectos*, vol. 53, no. 9. 2008.
- [23] F. Lillo, C. U. Técnica, F. Santa, I. Del, and C. Productividad, “Documento Productividad – Tesis Magíster en Ingeniería Mecánica – Francisco Lillo C. Universidad Técnica Federico Santa María. 1.-,” pp. 1–15.
- [24] ENAP Empresa Nacional del Petroleo, “Precio de Combustibles.”
<https://www.enap.cl/pag/53/784/informe-precios>
- [25] CCHC, “Reglamentacion Termica,” vol. 1, pp. 16–18, 2006, [Online]. Available: www.mart.cl,

ANEXOS

Anexo A. Detalle cotización intercambiador de calor, bomba y piping de sistema.

COTIZACION N° 11096					
CLIENTE:	CERAMICAS SANTIAGO	INTERCAMBIADORES DE CALOR   			
RUT:					
DIRECCION:	AV. ISIDORA GOYENCHEA 3120 PROVIDENCIA				
TELEFONO:					
CONTACTO:					
MAIL:		FECHA :	12	JUNIO	2020
DETALLE DE PRODUCTO O SERVICIO		CANTIDAD	VALOR UNIT	VALOR TOTAL	
FABRICACION INTERCAMBIADOR DE CALOR TUBOS LISOS DIMENSIONES APP 1500 X 700 X 6 CORRIDAS CAPACIDAD 159.000 KCAL/HR MATERIALES: TUBOS: ACERO CARBONO ASTM A-106 DIAMETRO NOMINAL 1/2" SCH-40 CON COSTURA. COLECTORES Y ESTANQUES: ACERO CARBONO CALIDAD SA-36 ESCUADRAS: ACERO CARBONO SA-36 PRESION DE PRUEBA: 8 BAR G DURANTE 30 MINUTOS		1	\$ 4.250.235	\$ 4.250.235	
SUMINISTRO DE BOMBA CENTRIFUGA DE AGUA MARCA PEDROLLO 1,5 HP, 220 V, 9 A		1	\$ 652.325	\$ 652.325	
SUMINISTRO DE PIPING Y ACCESORIOS PARA INSTALACION, CAÑERIA ACERO AL CARBONO A 53 2", CODOS RADIO LARGO 2", TEE RADIO LARGO, COPLA 300 LBS		1	\$ 3.355.365	\$ 3.355.365	
		VALOR NETO		\$ 8.257.925	
				% DCTO	
		TOTAL NETO		\$ 8.257.925	
VALORES NO INCLUYEN I.V.A.					
PLAZO ENTREGA :	15 DIAS HABILES RECIBIDA YACEPTADA SU O/COMPRA				
LUGAR DE ENTREGA:	EN NUESTRAS BODEGAS.				
TIPO EMBALAJE:	PALLET MADERA				
FORMA DE PAGO:	CHEQUE A 30 DIAS C/ENTRAGA				
CLAUSULAS DE GARANTIA:	* UN AÑO POR DEFECTOS DE FABRICACION Y BAJO CONDICIONES NORMALES DE OPERACIÓN. * LA GARANTIA, EN CASO DE APLICAR, SOLO CUBRE LA REPARACION DEL EQUIPO FABRICADO Y NO CUBRE LUCRO CESANTE, DAÑO PATRIMONIAL O PERDIDA DE GANANCIA COMO CONSECUENCIA DEL DAÑO. * TODA REPARACIÓN SE REALIZARA EN NUESTRA PLANTA O SEGÚN ACUERDO ENTRE LAS PARTES				
VALIDEZ OFERTA:	10 DIAS.				
SOCIEDAD COMERCIAL E INDUSTRIAL TERMIA LIMITADA RUT : 76.014.721-4 San Eugenio N°12670 - Condominio Industrial Jardín del Sur - San Bernardo Telefonos : (56-2) 27756031 - 9960144 WWW.TERMIA.CL					
					

Anexo B. Detalle cotización torre de enfriamiento, bomba y piping.

COTIZACION N° 11082				
CLIENTE:	CERAMICAS SANTIAGO	INTERCAMBIADORES DE CALOR		
RUT:				
DIRECCION:	AV. ISIDORA GOYENECHEA 3120 PROVIDENCIA			
TELEFONO:		FECHA : 12 JUNIO 2020		
CONTACTO:				
MAIL:				
DETALLE DE PRODUCTO O SERVICIO		CANTIDAD	VALOR UNIT	VALOR TOTAL
TORRE DE ENFRIAMIENTO MARCA SINAX MODELO EWK 144		1	\$ 2.523.325	\$ 2.523.325
SEGÚN CONDICIONES DE OPERACIÓN ENVIADAS				
DIMENSIONES APP 2702 X 1140 X 1140 MM				
PILETA DE PLASTICO REFORZADO CON VIDRIO.				
TIPO DE SEPARADOR DE GOTAS DOBLE DEFLEXION D-15.				
TIPO DE PANELES DE RELLENO LAMINAR F KP-312 (240 M2/M3).				
MOTOVENTILADOR AXIAL TRIFASICO 2 HP.				
DIAMETRO NOMINAL ENTRADA/SALIDA AGUA 2 1/2" / 4" RESPECTIVAMENTE				
SUMINISTRO BOMBA CENTRIFUGA 1,5 HP 220 V 340*210*270 MM		1	\$ 908.020	\$ 908.020
SUMINISTRO DE PIPINNG Y FITTING PARAINSTALACION: CAÑERIA NEGRA ASTM A 106 4" Y 2 1/", CURVAS 90° RL A234 STD, TEE A234 STD, FILTROS Y 150 M20, VALVULAS DE BOLAS 2CPS SSS 316.		1	\$ 3.215.236	\$ 3.215.236
		VALOR NETO		\$ 6.646.581
		% DCTO		
		TOTAL NETO		\$ 6.646.581
VALORES NO INCLUYEN I.V.A.				
PLAZO ENTREGA :	15 DIAS HABILES RECIBIDA YACEPTADA SU O/COMPRA			
LUGAR DE ENTREGA:	EN NUESTRAS BODEGAS.			
TIPO EMBALAJE:	PALLET MADERA			
FORMA DE PAGO:	CHEQUE A 30 DIAS C/ENTRAGA			
CLAUSULAS DE GARANTIA:	<p>* UN AÑO POR DEFECTOS DE FABRICACION Y BAJO CONDICIONES NORMALES DE OPERACIÓN.</p> <p>* LA GARANTIA. EN CASO DE APLICAR. SOLO CUBRE LA REPARACION DEL EQUIPO FABRICADO Y NO CUBRE LUCRO CESANTE, DAÑO PATRIMONIAL O PERDIDA DE GANANCIA COMO CONSECUENCIA DEL DAÑO.</p> <p>* TODA REPARACIÓN SE REALIZARA EN NUESTRA PLANTA O SEGÚN ACUERDO ENTRE LAS PARTES</p>			
VALIDEZ OFERTA:	10 DIAS.			
SOCIEDAD COMERCIAL E INDUSTRIAL TERMIA LIMITADA				
RUT : 76.014.721-4				
San Eugenio N°12670 - Condominio Industrial Jardín del Sur - San Bernardo				
Telefonos : (56-2) 27756031 - 9960144				
WWW.TERMIA.CL				
				

Anexo C. Detalle cotización montaje electromecánico de sistema.

COTIZACION N° 12002					
CLIENTE:	CERAMICAS SANTIAGO	INTERCAMBIADORES DE CALOR   			
RUT:					
DIRECCION:	AV. ISIDORA GOYENECHEA 3120 PROVIDENCIA				
TELEFONO:					
CONTACTO:					
MAIL:		FECHA :	13	JULIO	2020
DETALLE DE PRODUCTO O SERVICIO		CANTIDAD	VALOR UNIT	VALOR TOTAL	
MONTAJE INTEGRAL PROYECTO ORC CERAMICAS SANTIAGO BATUCO ESTE PRESUPUESTO CONTEMPLA EL MONTAJE MECANICO, MONTAJE ELECTRICO Y LA AISLACION INCLUYENDO TAMBIEN LA PUESTA EN MARCHA DEL PROYECTO ORC PARA LA PLANTA CERAMICA SANTIAGO UBICADA EN LA COMUNA DE BATUCO REGION METROPOLITANA ALCANCES: 1- INSTALACION EQUIPO ORC EN LUGAR DE TRABAJO EN LO QUE RESPECTA AL ANCLAJE, SISTEMA HIDRAULICO, FUERZA Y CONTROL. 2- INSTALACION DE INTERCAMBIADOR DE CALOR EN LO QUE RESPECTA AL MONTAJE HIDRAULICO, FUERZA Y CONTROL. 3- INSTALACION DE TORRE DE ENFRIAMIENTO EN LO QUE RESPECTA AL MONTAJE HIDRAULICO, FUERZA Y CONTROL. LOS ITEMS 1,2 Y 3 ESTAN DETALLADOS EN PROYECTO TERMIA BT345 20 PARA LA EMPRESA CERAMICAS SANTIAGO.		1	\$ 17.540.325	\$ 17.540.325	
		VALOR NETO		\$ 17.540.325	
		% DCTO			
		TOTAL NETO		\$ 17.540.325	
VALORES NO INCLUYEN I.V.A.					
PLAZO ENTREGA :	20 DIAS HABLES RECIBIDA YACEPTADA SU O/COMPRA.				
LUGAR DE ENTREGA:	EN PLANTA CERAMICAS SANTIAGO BATUCO.				
FORMA DE PAGO:	CHEQUE A 30 DIAS C/ENTRAGA				
CLAUSULAS DE GARANTIA:	* UN AÑO POR DEFECTOS DE FABRICACION Y BAJO CONDICIONES NORMALES DE OPERACIÓN. * LA GARANTIA, EN CASO DE APLICAR, SOLO CUBRE LA REPARACION DEL EQUIPO FABRICADO Y NO CUBRE LUCRO CESANTE, DAÑO PATRIMONIAL O PERDIDA DE GANANCIA COMO CONSECUENCIA DEL DAÑO.				
VALIDEZ OFERTA:	10 DIAS.				
SOCIEDAD COMERCIAL E INDUSTRIAL TERMIA LIMITADA RUT : 76.014.721-4 San Eugenio N°12670 - Condominio Industrial Jardín del Sur - San Bernardo Telefonos : (56-2) 27756031 - 9960144 WWW.TERMIA.CL					
					

Anexo E. Propiedades del aire a 1 atm de presión.

Propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. T , °C	Densidad ρ , kg/m ³	Calor específico c_p J/kg · K	Conductividad térmica k , W/m · K	Difusividad térmica α , m ² /s	Viscosidad dinámica μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática ν , m ² /s	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para gases ideales, c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P distinta a 1 atm se determinan cuando se multiplican los valores de ρ a la temperatura dada por P (en atm) y cuando se dividen ν y α entre P (en atm).

Fuente: Datos generados a partir del Software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

Anexo F. Propiedades del GLP, ficha técnica entregada por Cerámica Santiago.

SECCIÓN 9: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Datos generales:

Estado físico	: Gas
Forma en que se presenta	: Gas licuado
Color	: Incoloro
Olor	: Desagradable
pH concentración y temperatura	: No aplica

Temperaturas específicas y/o intervalos de temperatura:

Ebullición	: Propano: -42,1	Butano: -0,5 °C
Crítica	: Propano: 96,81 °C	Butano: 153,2 °C
Congelación	: Propano: -187,6 °C	Butano: -138,3 °C
Descomposición	: Propano: 650 °C (se forma etileno y etano)	

Propiedades de Fuego y Explosión:

Temperatura de inflamación	: Propano: -104,4 °C	Butano: -60 °C
Límite inferior de inflamabilidad	: Propano: 2,1 % v/v	Butano: 1,9 % v/v
Límite superior de inflamabilidad	: Propano: 9,5 % v/v	Butano: 8,5 % v/v
Temperatura de autoignición	: Propano: 450 °C	Butano: 287 °C
Límite inferior de explosividad	: Propano: 2,37 % v/v	Butano: 1,9 % v/v
Límite superior de explosividad	: Propano: 9,50 % v/v	Butano: 8,5 % v/v
Temperatura de llama en aire	: Propano: 1.895 °C	Butano: 1.925 °C
Velocidad máx. propagación llama	: 30 cc/s	

Otras propiedades:

Poder calorífico superior	: Propano: 12.100 Kcal/Kg	Butano: 11.800 Kcal/Kg
Densidad relativa del agua	: Propano: 0,508	Butano: 0,584 (agua = 1)
Densidad relativa del vapor	: Propano: 1,522	Butano: 2,006 (aire = 1)
Presión crítica	: Propano: 42,01 atm	Butano: 525 psi
Presión de vapor a 25 °C	: Propano: 7.150 mm Hg	Butano: 1.820 mm Hg
Presión de trabajo	:	
Alta	: 40 a 210 psi (presión interior de los cilindros o estanques, variable)	
Media	: 1 a 29 psi (instalaciones industriales o abastecimiento y puntos de consumo)	
Baja	: 229 a 340 mm CA (todos los artefactos domésticos y algunos equipos indust.)	
Solubilidad en agua y en otros	: Escasa en agua. Soluble en alcohol absoluto, éter, cloroformo, benceno, trementina.	
Calor de combustión (volumen cte)	: Propano: 528,4 cal	
Calor de combustión (presión cte)	: Propano: 553,5 cal	
Vol. de 1 kg de gas (1 atm, 15 °C)	: Propano: 0,538 m ³	Butano: 0,408 m ³
Vol. de aire para quemar 1 m ³ gas	: Propano: 23,87 m ³	Butano: 31,03 m ³ (a 1 atm, 15 °C)

