

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Estudio de viabilidad de un sistema de trigeneración
para un complejo hotelero mediante simulación energética

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

William Omar Paredes Fierro

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

A Noelia, fuente infinita de inspiración.

A papá, un luchador incansable.

A mamá, una mujer valiente.

AGRADECIMIENTOS

Mi entera gratitud:

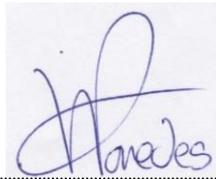
Al Ing. Carlos Paredes por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto.

Al Ing. Jorge Duque Rivera, principal colaborador durante el proceso. Mismo que con su tutela, experiencia y conocimiento fue fundamental.

A cada una de las personas que de manera desinteresada aportaron con la realización de este estudio.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *William Omar Paredes Fierro* doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'W. Paredes', is centered on the page. The signature is written in a cursive style with a large initial 'W'.

William Omar Paredes Fierro

EVALUADORES



Emérita Delgado Plaza, Ph.D.
PROFESOR DE LA MATERIA



Jorge Duque Rivera, M.Sc. ME
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente estudio tiene como finalidad evaluar la viabilidad técnica y económica de una planta de trigeneración capaz de satisfacer la demanda de electricidad, calor y frío de un complejo hotelero de 42 habitaciones en reemplazo de un sistema convencional. A través de una sucinta revisión bibliográfica, de alternativas de trigen para hoteles, y utilizando el proceso analítico jerárquico -AHP- se estableció un sistema compuesto por un motor de combustión interna de 313 kVA para la generación eléctrica, un intercambiador de calor de placas de 100 kW para el calentamiento de agua sanitaria, y una enfriadora de absorción de doble efecto, de 80 TRF, para la climatización de ambientes. Luego, empleando el motor de cálculo de *Energypius* e interfaz gráfica comercial de *DesignBuilder®*, se simuló el comportamiento energético de ambos sistemas considerando los requerimientos del cliente y los parámetros de modelación del edificio establecidos bajo las normas ASHRAE. Del sistema propuesto se obtuvo un rendimiento térmico global del 84% con retorno aparente de inversión a los 5 años de operaciones y valor de comercialización de 0,114 USD/kWh, mientras el sistema convencional presentó operaciones totalmente a pérdida. En conclusión, este enfoque de gestión sistemático fortalece la independencia y estabilidad comercial, y la autogeneración energética, sin embargo, su éxito está expuesto a factores externos que pueden debilitar o favorecer la reducción de pérdidas monetarias a largo plazo como, por ejemplo, la eliminación del subsidio al diésel en el país y el valor regulado de comercialización del kilovatio-hora en el Sistema Nacional Interconectado.

Palabras Clave: Trigeneración, simulación energética y rendimiento térmico.

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the technical and economic feasibility of a trigeneration plant capable of satisfying the demand for electricity, heat and cold of a hotel complex of 42 rooms, replacing a conventional system. Through a succinct bibliographic review of trigen alternatives for hotels, and using the analytic hierarchy process -AHP- a system was established consisting of an internal combustion engine 313 kVA for power generation, a plate heat exchanger 100 kW for heating domestic water, and a double-effect absorption chiller, 80 TRF, for air conditioning. Then, using the Energyplus calculation engine and DesignBuilder's commercial graphic interface, the energy behavior of both systems was simulated considering the customer's requirements and the building modeling parameters established under the ASHRAE standards. From the proposed system, a global thermal efficiency of 84% was obtained with an apparent return on investment after 5 years of operations and a commercialization value of 0,114 USD/kWh, while the conventional system had totally loss operations. In conclusion, this systematic management approach strengthens commercial independence and stability, and energy self-generation, however, its success is exposed to external factors that can weaken or favor the reduction of long-term monetary losses such as elimination of the diesel subsidy in the country and the regulated commercialization value of kilowatt-hour in the National Interconnected System.

Keywords: *Trigeneration, energy simulation and thermal efficiency.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 Definición del problema	1
1.2 Justificación del proyecto	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Alcance	3
1.5 Marco teórico	3
1.5.1 Contexto energético.....	3
1.5.2 Sistemas de trigeneración	6
1.5.3 Situación actual de la trigeneración en Ecuador	11
CAPÍTULO 2	13
2. Metodología.....	13
2.1 Necesidades del cliente	14
2.2 Estructura funcional.....	17
2.3 Generación de conceptos.....	19
2.4 Selección de concepto	20
2.5 Modelado del edificio.....	21
2.5.1 Condiciones de funcionamiento	22
2.5.2 Parámetros de modelación	22
2.5.3 Condiciones ambientales.....	23
2.5.4 Arquitectura del edificio.....	24

2.6	Simulación energética	25
2.6.1	Línea base	26
2.6.2	Planta de trigeneración	27
CAPÍTULO 3		28
3.	Resultados y Análisis	28
3.1	Demanda eléctrica	28
3.2	Demanda térmica	29
3.2.1	Agua caliente sanitaria.....	29
3.2.2	Frío	29
3.3	Equipamiento	29
3.3.1	Línea base	30
3.3.2	Panta de trigeneración.....	32
3.4	Estimación de costos	36
3.4.1	Línea base	36
3.4.2	Panta de trigeneración.....	36
CAPÍTULO 4		38
4.	Conclusiones y Recomendaciones	38
4.1	Conclusiones.....	39
4.2	Recomendaciones.....	40
BIBLIOGRAFÍA		41
APÉNDICES		43

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
AHRI	Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BP	British Petroleum
IEA	International Energy Agency
FAEN	Fundación Asturiana de la Energía
NREL	National Renewable Energy Laboratory
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
ARCONEL	Agencia de Regulación y Control de Electricidad
UTM	Universal Transversal de Mercator
BTU	Unidad Térmica Británica
GLP	Gas licuado del petróleo
COP	Coeficiente de rendimiento
TRF	Toneladas de refrigeración
RPM	Revoluciones por minuto
CFM	Pies cúbicos por minuto
VAN	Valor actual neto
TIR	Tasa interna de retorno
USD	Dólar estadounidense (moneda local)
TG	Turbina de gas
TV	Turbina de vapor
MCI	Motor de combustión interna

SIMBOLOGÍA

ft	Pie
m	Metro
g	Gramo
h	Hora
L	Litro
V	Voltio
A	Amperio
VA	Voltio-Amperio
W_{th}	Vatio (térmico)
W_e	Vatio (eléctrico)
Wh	Vatio-hora
Hz	Hercio
°C	Grado Centígrado
Cp	Capacidad calorífica
\$	Dólar estadounidense
bar	Bar
Pa	Pascal
HP	Caballo de fuerza mecánico
BHP	Caballo de fuerza de caldera
psig	Libra por pulgada cuadrada(g)
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
Mtoe	Megatonelada equivalente de petróleo
H ₂ O	Hidróxido de Hidrógeno (Agua)
CO ₂	Dióxido de Carbono
LiBr	Bromuro de Litio
NH ₃	Amoniaco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Consumo energético mundial.	4
Figura 1.2 Energía primaria mundial por combustible.....	4
Figura 1.3 Trayectoria del flujo de energía.	5
Figura 1.4 Cogeneración con turbina de vapor.....	7
Figura 1.5 Cogeneración con motor de combustión interna.	8
Figura 1.6 Cogeneración con turbina de gas.....	9
Figura 1.7 Ciclo de absorción simplificado.	10
Figura 1.8 Potencial de trigeneración en Ecuador.	12
Figura 2.1 Flujograma de trabajo.....	13
Figura 2.2 Árbol de objetivos jerárquico.	15
Figura 2.3 Modelo caja negra.....	17
Figura 2.4 Modelo caja transparente.	18
Figura 2.5 Árbol Función–Medios.....	18
Figura 2.6 Lote de terreno.....	23
Figura 2.7 Edificio – Vista Renderizada.....	24
Figura 2.8 Plantilla ACS.	26
Figura 2.9 Plantilla HVAC.....	26
Figura 2.10 Plantilla HVAC detallado.	27
Figura 3.1 Unidad paquete – 50TC-D29.....	30
Figura 3.2 Caldera de ACS – LRP-NT plus 1.	31
Figura 3.3 Enfriadora de absorción – CHP008H.....	32
Figura 3.4 Unidad manejadora de aire – 39MW-17W.....	33
Figura 3.5 Intercambiador de calor – AQ1L.....	34
Figura 3.6 Grupo electrógeno – P251B.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Consideraciones de diseño.	6
Tabla 1.2 Características energéticas por tecnología.	10
Tabla 1.3 Operatividad de la refrigeración por absorción.	11
Tabla 1.4 Cogeneración instalada en Ecuador.	12
Tabla 2.1 Lista de Atributos categorizada.....	14
Tabla 2.2 Escala de importancia relativa.	15
Tabla 2.3 Comparación en pares de objetivos.....	16
Tabla 2.4 Comparación en pares de subobjetivos: Costo (0,41).	16
Tabla 2.5 Comparación en pares de subobjetivos: Producción (0,28).	16
Tabla 2.6 Comparación en pares de subobjetivos: Operatividad (0,25).....	16
Tabla 2.7 Comparación en pares de subobjetivos: Mantenimiento (0,06).	17
Tabla 2.8 Cuadro Morfológico de tecnologías.	19
Tabla 2.9 Sistema de puntuación de alternativas.	20
Tabla 2.10 Matriz de decisión.....	21
Tabla 2.11 Variables proyectadas de diseño.....	22
Tabla 2.12 Parámetros de modelación.....	22
Tabla 3.1 Demanda eléctrica.....	28
Tabla 3.2 Agua caliente sanitaria.	29
Tabla 3.3 Frío.....	29
Tabla 3.4 Ficha Técnica: Unidad paquete – 50TC-D29.....	30
Tabla 3.5 Ficha Técnica: Caldera ACS – LRP-NT plus 1.	31
Tabla 3.6 Ficha Técnica: Enfriadora de absorción – CHP008H.....	32
Tabla 3.7 Ficha Técnica: Unidad manejadora de aire – 39MW-17W.	33
Tabla 3.8 Ficha Técnica: Intercambiador de calor – AQ1L.	34
Tabla 3.9 Ficha Técnica: Grupo electrógeno – P251B.	35
Tabla 3.10 Estimación de costos operativos: Línea base.	36
Tabla 3.11 Estimación de costos operativos: Planta de trigeneración.	37

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En esta sección se va a exponer la problemática de un complejo hotelero que emplea sistemas convencionales de consumo ineficiente de energía, también se exhibe la justificación, objetivos y alcance del presente proyecto de viabilidad. Finalmente, se fundamenta opciones de sistemas de trigeneración acorde a las condiciones operativas particulares del hotel.

1.1 Definición del problema

Los sistemas energéticos actuales se caracterizan por satisfacer su demanda de electricidad, calor y frío de manera aislada dentro de un proceso productivo. Normalmente, el gasto calorífico en las calderas industriales y el consumo eléctrico en los sistemas de aire acondicionado tradicionales no prevén la maximización de beneficios en los recursos disponibles.

En tal virtud, un complejo hotelero -como parte de su proceso de crecimiento empresarial- plantea analizar la viabilidad de un sistema alternativo de transformación de energía, que satisfaga las necesidades puntuales de producción de agua caliente y acondicionamiento de aire en las instalaciones de su nueva sucursal en la ciudad de Santo Domingo.

La infraestructura, aún en construcción, está situada en un terreno de 3.871,84 m² y tiene planificado una capacidad máxima de 122 personas (92 huéspedes repartidos en 46 habitaciones y 30 empleados). El sistema propuesto debe precautelar, sobre todo, la comodidad de sus clientes.

1.2 Justificación del proyecto

Las fuentes energéticas basadas en la combustión de productos fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón mineral se han visto mermadas por el significativo incremento de su consumo per cápita. Es por ello, preponderante la necesidad de migrar a fuentes de energía alternativas o en su defecto, más práctico, optimizar los recursos en la medida de lo posible.

En contexto, un hotel tradicionalmente basa su consumo energético de modo individualizado. Así, se requiere de la red eléctrica nacional para producir frío a partir de ciclos de refrigeración por compresión. Mientras, el calor para producir agua caliente se genera en calderas de combustible fósil.

Las plantas modernas de trigeneración se han propuesto a nivel mundial para satisfacer demandas energéticas propias del sector terciario porque presentan varias ventajas económicas y medioambientales, y en este trabajo se aborda la viabilidad de estas opciones para el caso en concreto del hotel en estudio.

Entre las más importantes tareas realizadas constan la revisión bibliográfica de casos reales tanto nacionales como internacionales, el análisis de posibles sistemas de solución que satisfagan demandas mínimas de consumo de electricidad, calor y frío, la simulación del comportamiento energético del sistema línea base y sistema propuesto con el fin de interpretar los resultados en la medida que se cuantifica sus costos asociados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Estudiar la viabilidad técnica y económica de una instalación de trigeneración mediante simulación energética para satisfacer la demanda de electricidad, calor y frío de un complejo hotelero en la ciudad de Santo Domingo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estimar la demanda energética por climatización, calentamiento de agua sanitaria y electricidad del complejo hotelero durante el día en operaciones más crítico del año.
- Simular computacionalmente el comportamiento energético de los sistemas estudiados enfocado en su rendimiento térmico global.
- Realizar el análisis técnico y económico del sistema línea base y sistema de trigeneración conceptualizado.

1.4 Alcance

Este proyecto se enmarca en un estudio de viabilidad técnica y económica de un sistema de trigeneración para un complejo hotelero en Santo Domingo. El edificio demandará consumo eléctrico y térmico diario que se desea satisfacer con la implementación de dicho sistema.

En primer lugar, la edificación se modeló computacionalmente a partir de la información arquitectónica suministrada por el cliente. Reproduciendo las condiciones ambientales y del entorno acorde a la normativa técnica vigente, con el fin de cuantificar sus variables de consumo. Además, se estableció una línea base que sirvió como comparativa entre un sistema convencional simulado y uno de trigeneración obtenido del proceso analítico jerárquico.

Los datos técnicos necesarios fueron facilitados por empresas proveedoras del sector industrial. El costo económico asociado al consumo energético se proyectó mediante información tarifaria actualizada recabada de fuentes gubernamentales y el análisis de resultados sopesó todos aquellos posibles beneficios y perjuicios que de alguna u otra manera impactaron en la empresa.

Por último, la propuesta del sistema de trigeneración incluyó la selección de la mejor alternativa de diseño considerando vida útil y rendimiento global. No se incluyó diseño detallado, montaje, puesta en marcha ni mantenimiento, ya que el proyecto se desarrolló íntegramente durante 14 semanas consecutivas.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Contexto energético

Los recursos energéticos a escala global se encuentran íntimamente vinculados al mejoramiento de la calidad de vida de las sociedades, al incremento de productividad y desarrollo socioeconómico de las naciones.

El consumo energético mundial, en los últimos 25 años, ha manifestado una demanda creciente de combustibles de alrededor de 14.000 Mtoe; particularmente, el gas natural representó 43% del aumento global y las energías renovables, únicamente 18%.

Así para 2018, tal como se presenta en la Figura 1.1, el consumo se situó 2,9% por encima del año anterior. Siendo el más fuerte desde 2010, y duplicando el promedio de los últimos 10 años. (BP p.l.c., 2019)

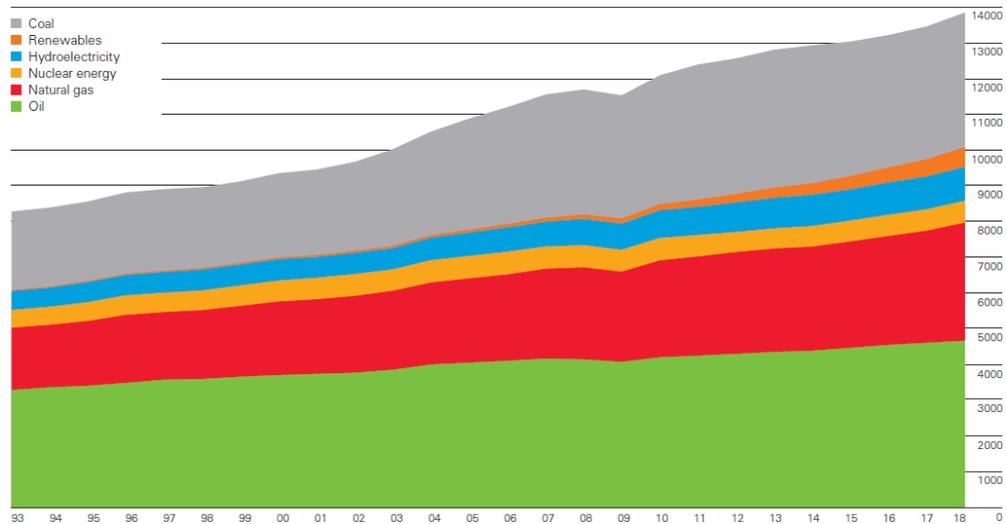


Figura 1.1 Consumo energético mundial.

Fuente: BP p.l.c. (2019). *BP Statistical Review of World Energy*. (p. 10). Londres.

En la Figura 1.2 se muestra las fuentes energéticas que satisficieron la demanda total en dicho año. El 33% de la energía primaria se obtuvo del petróleo, 27% del carbón y 24% del gas natural. Esto supone que más del 80% del requerimiento universal fue cubierto a partir de transformaciones energéticas basadas en combustibles fósiles. (BP p.l.c., 2019)

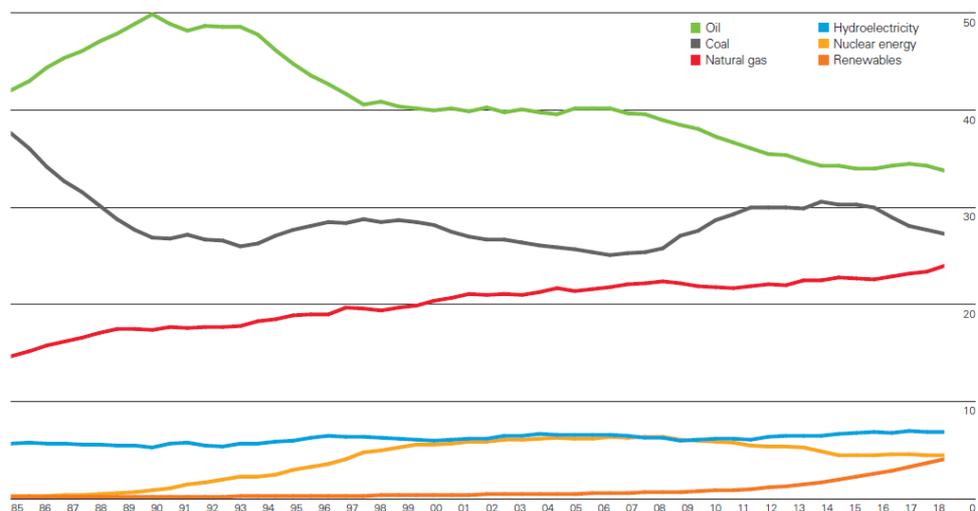


Figura 1.2 Energía primaria mundial por combustible.

Fuente: BP p.l.c. (2019). *BP Statistical Review of World Energy*. (p. 10). Londres.

Varios informes de la Agencia Internacional de la Energía dan cuenta de la grave dependencia de los países por dichos combustibles como resultado del vertiginoso crecimiento del consumo energético de la humanidad. Se prevé que los recursos terrestres únicamente sean capaces de paliar la demanda de las próximas tres décadas. (IEA, 2018)

Esquemáticamente, en la Figura 1.3, se denota tres etapas fundamentales dentro del proceso de producción de energía convencional: 1) transformación de combustible, 2) generación de electricidad y 3) conversión de uso final. (Cullen & Allwood, 2010)

En cada fase, la energía se convierte a una forma determinada, resultando en pérdidas significativas. Sin embargo, es posible rastrear el flujo de energía desde la fuente primaria (izquierda) a los servicios finales (derecha) con el fin de analizar y proponer alternativas de aprovechamiento de estos excedentes residuales.

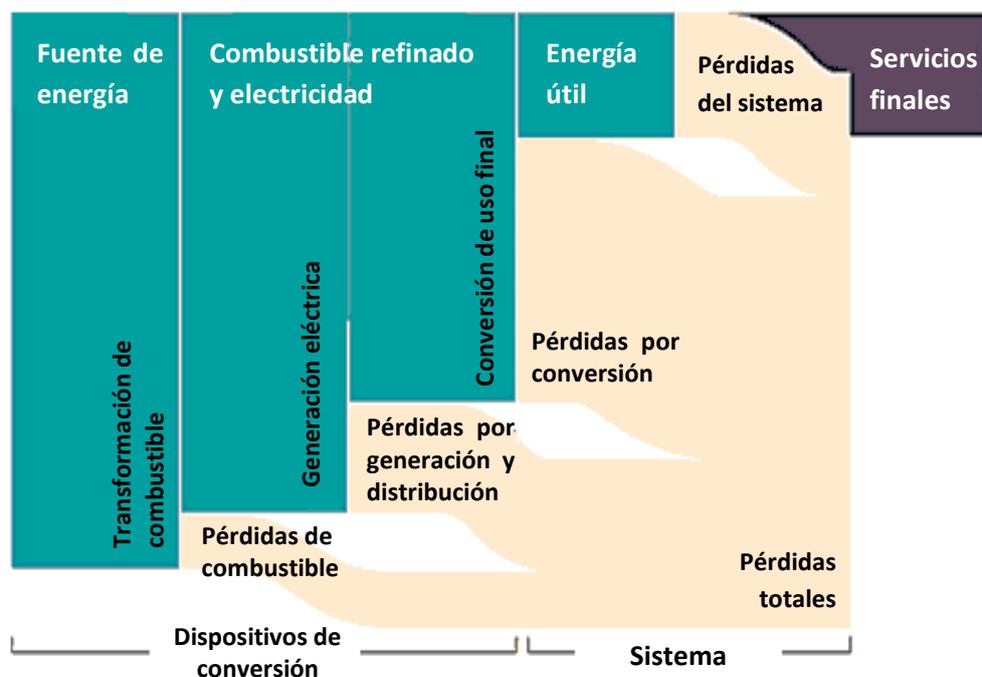


Figura 1.3 Trayectoria del flujo de energía.

Fuente: Cullen, J. & Allwood, J. (2010). The efficient use of energy: Tracing the global Flow of energy from fuel to service. (p. 77). Cambridge: Energy Policy.

1.5.2 Sistemas de trigeneración

La trigeneración refiere a la producción combinada de electricidad, calor y frío usando un único recurso primario. Se puede decir que el sistema comparte dos tipos de tecnologías. La cogeneración, que obtiene electricidad y calor como subproductos; y, la refrigeración activada térmicamente, que obtiene frío a partir del calor residual del primer proceso. (Chicco & Mancarella, 2009)

Típicamente, las industrias aspiran integrar sus procesos en función del aprovechamiento del calor residual para satisfacer sus necesidades energéticas. En la mayoría de los casos, se logra reducir el costo de producción de la electricidad en comparación al precio de mercado cuando se reutiliza dicho excedente para producir agua caliente o vapor y para climatizar o refrigerar ambientes. (Fernández, Huante, & Romo, 2006)

No obstante, según el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza, se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones de diseño resumidas en la Tabla 1.1. (Lozano, 2003)

Tabla 1.1 Consideraciones de diseño.

CONSIDERACIONES	ESTADO			
Capacidad térmica cubierta	Parcial		Total	
Generación eléctrica	A déficit	Autoconsumo		A excedente
Tamaño de planta	Micro (<50 kW)	Pequeña (<500 kW)	Mediana (<5 MW)	Grande (>5 MW)
Disponibilidad de equipos	Accesible		Limitada	
Calidad/precio combustible	Buena	Regular		Mala
Niveles de emisión contaminante	Alto	Medio		Bajo
Operatividad	Controlada		Inestable	

Fuente: [Elaboración propia].

Estos criterios facilitan el dimensionamiento de la planta cuando se define correctamente la capacidad de climatización, la forma de consumo eléctrico y su operatividad. Sin embargo, destacan factores que influyen circunstancialmente como la calidad/precio del combustible, disponibilidad de equipos y niveles de emisión contaminante que deben tomarse en cuenta según la realidad de cada sitio donde se implementará el sistema.

A continuación, se va a categorizar tres opciones tecnológicas de cogeneración junto con la descripción de un caso de estudio internacional relacionado que analiza los criterios previamente mencionados.

Categoría 1: Turbina de vapor (TV)

A partir de la expansión mecánica de vapor de alta presión procedente de la incineración de biomasa o búnker en una caldera convencional se produce energía eléctrica, entre 0,1 y 250 MWe. Por otro lado, para el calentamiento de masas de agua en el condensador se intercambia calor con el vapor de baja presión del sistema, así se muestra en la Figura 1.4.

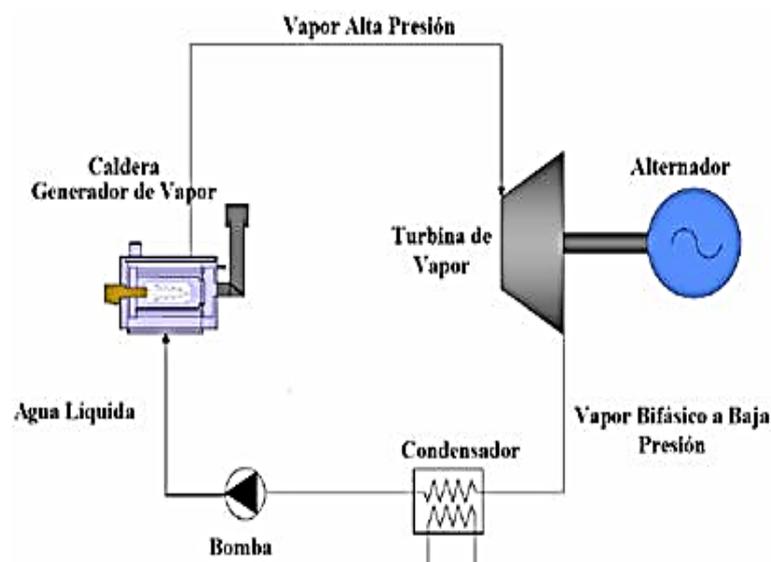


Figura 1.4 Cogeneración con turbina de vapor.

Fuente: Guevara, R. (2014). Tecnologías energéticas. Nuevo Chimbote: UNS.

En España, una unidad típica de pequeña escala operando en ciclo Rankine genera una potencia nominal de 500 kW_e a eficiencia eléctrica de 10%, y alrededor de 3000 kW_{th} a eficiencia térmica del 70%. (FAEN, 2006)

Categoría 2: Motor de combustión interna (MCI)

En función de la transferencia de calor entre el agua de refrigeración del motor, los gases de combustión y el agua en servicio, tal como se observa en la Figura 1.5, se produce vapor a baja presión (<10 bar).

Generalmente, se consideran de alto costo de inversión, pero de fácil mantenimiento y buen desempeño ante fluctuaciones de carga térmica o eléctrica. (Fernández C. , s/a)

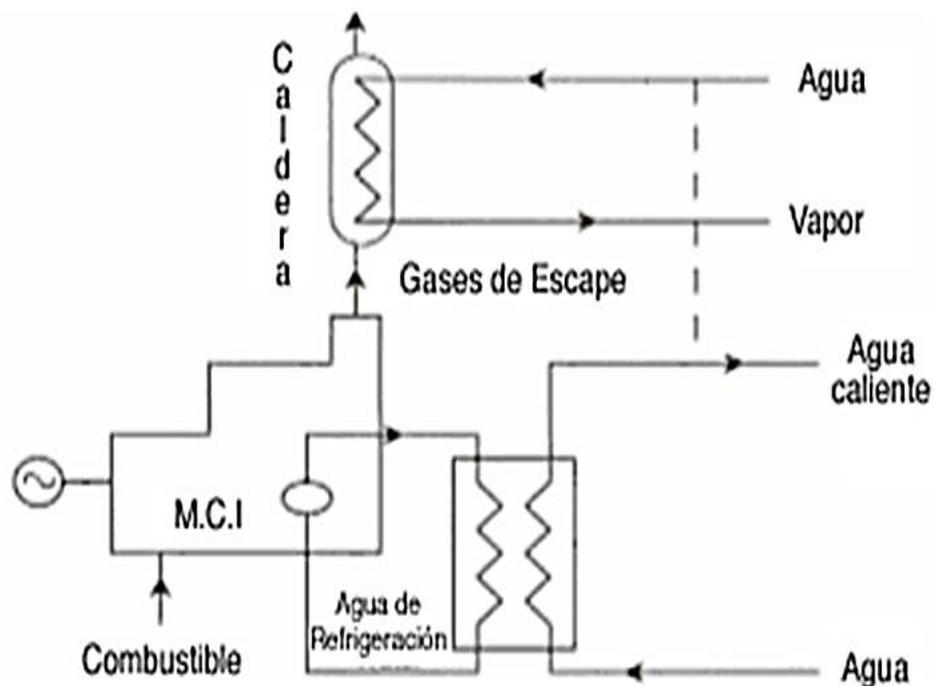


Figura 1.5 Cogeneración con motor de combustión interna.

Fuente: Cárdenas, N. (2015). Cogeneración en el sector terciario.

En México, un hotel a gran escala utilizando 2 unidades a diésel de 2,4 MW_e en total suplió sus necesidades de iluminación, equipamiento habitacional y elevadores, operando durante 14 horas diarias, todo el año. Sin embargo, luego de 3 años, a raíz del incremento en el precio del combustible, la planta paralizó sus operaciones. Antes de aquello, se había estimado en 8 años el tiempo retorno de la inversión. (CONUEE, 2013)

Categoría 3: Turbina de gas (TG)

En esta turbomáquina se quema combustible y transporta el calor residual a una caldera de recuperación para producir vapor. Parte de esta energía mecánica se transforma en electricidad mediante un generador eléctrico. En la Figura 1.6 se ejemplifica el sistema. (Opex Energy, 2009)

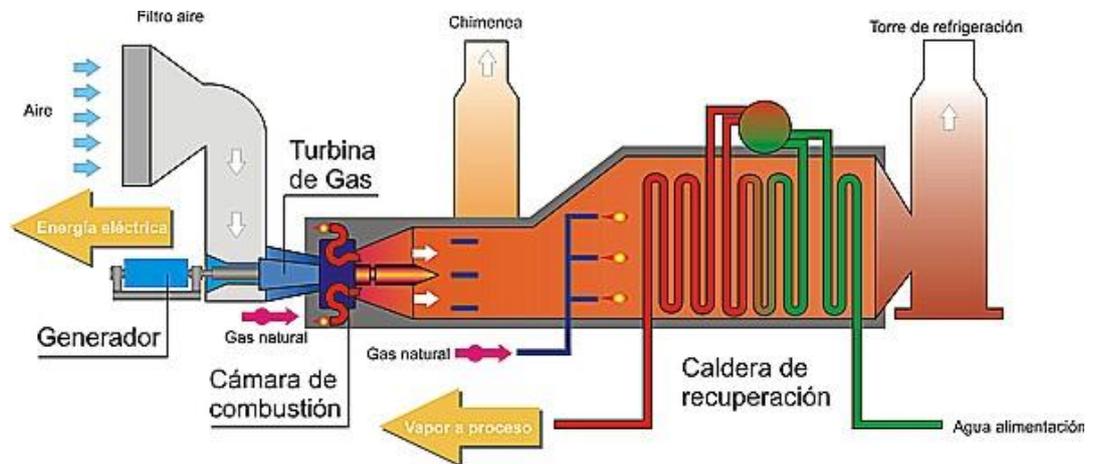


Figura 1.6 Cogeneración con turbina de gas.

Fuente: E.B. Estudios Técnicos S.L. (2019). *Industria de la energía - Cogeneración*. Madrid.

La *Massia Ferrer*, una casa rural en Cataluña, en 2006 ejecutó la instalación de una microturbina alimentada por GLP de 30 kW_e de capacidad eléctrica y 66 kW_{th} de capacidad calorífica. Operando en ciclo combinado, 8500 horas al año, conseguía cubrir la demanda anual de calor de 225 GWh y 150 GWh de electricidad a un costo unitario inferior a cualquier otro sistema alternativo. La inversión total se estimó en 48.000 euros. (FAEN, 2006)

Recapitulando, estas tecnologías se consideran económicamente rentables cuando el sistema de recuperación se ha diseñado específicamente para un determinado proceso, estimando el precio del calor recuperado, el patrón de consumo y su eficiencia térmica. En la medida de lo posible, se debe operar a un rango estable de carga base, *i.e.*, maximizar el número de horas en funcionamiento y utilizar sistemas complementarios de ser necesario. (García & Fraile, 2008)

En la Tabla 1.2 se resume las tecnologías analizadas de acuerdo con su rendimiento y potencia nominal.

Tabla 1.2 Características energéticas por tecnología.

Tecnología	Rendimiento, μ (%)		Potencia, P_o (MW)	Sector Económico
	Eléctrico	Global		
Turbina de vapor	7-20	75-90	0,1-250	Secundario
Motor combustión interna	35-45	75	1-25	Terciario
Turbina de gas	30-40	75-80	5-50	Secundario

Fuente: Leiva, R. (2014). *Cogeneración de ciclo superior y net metering*. Santiago: PUC de Chile.

Como complemento a los sistemas de cogeneración mostrados previamente, ahora se va a describir el ciclo de refrigeración térmica más utilizado en trigeneración para la producción de frío.

Refrigeración por absorción

El esquema mostrado en la Figura 1.7 representa un ciclo de absorción que emplea una solución concentrada en el generador en interacción con una aportación calorífica externa para vaporizar y separar del agua el fluido refrigerante, luego éste se envía hacia el condensador para conseguir su enfriamiento con un circuito de agua exterior. Seguidamente, el refrigerante líquido se dirige hacia el evaporador absorbiendo las calorías del sistema y pasa al absorbedor para completar el ciclo. (Corominas, s/a)

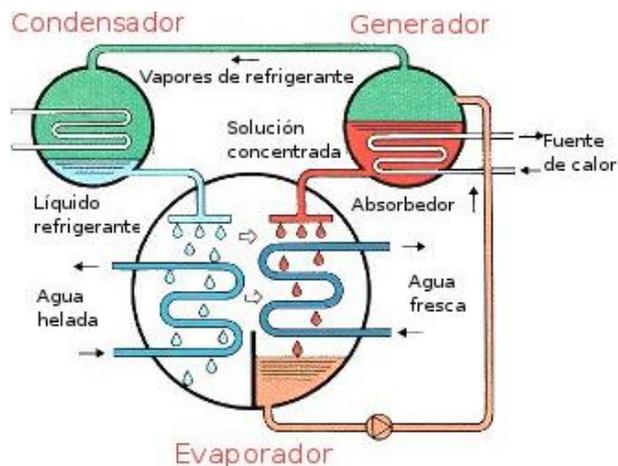


Figura 1.7 Ciclo de absorción simplificado.

Fuente: González, J. (2013). *Potencial de aprovechamiento de instalaciones solares*. (p.27). Sevilla

Se pretende usar la energía de baja calidad, procedente del sistema de cogeneración, para operarlo. De acuerdo con (Henning, Hindenburg, & Santamaria, 2001), este sistema, por lo general, trabajando a efecto simple muestra COP de 0,7 a temperaturas entre 80 y 100 °C; y a efecto doble muestra COP de 1,2 a temperaturas entre 140 y 160 °C. En la Tabla 1.3 se presentan las principales ventajas y desventajas de esta tecnología.

Tabla 1.3 Operatividad de la refrigeración por absorción.

Tecnología		En operaciones	
		Ventajas	Desventajas
Absorción	Efecto Simple: <i>H₂O/LiBr</i>	<ul style="list-style-type: none"> *Agua como refrigerante tiene gran capacidad calorífica. *Bromuro de litio no volátil. *Las soluciones no tóxicas ni inflamables. 	<ul style="list-style-type: none"> *No opera a menor temperatura del punto de congelación del agua. *Se demanda de alta impermeabilidad en el vacío.
	Efecto Doble: <i>H₂O/NH₃</i>	<ul style="list-style-type: none"> *Amoníaco como refrigerante tiene buena capacidad calorífica. *Trabaja a temperaturas muy bajas, hasta -60 °C. *Transferencia de calor/masa adecuada. 	<ul style="list-style-type: none"> *En tuberías la presión es muy alta. *El amoníaco es tóxico. *Se necesita rectificación para volatilizar el solvente.

Fuente: Abele, C. (2019). ¿Qué son los sistemas de refrigeración por absorción? Hamburgo: DAA.

1.5.3 Situación actual de la trigeneración en Ecuador

De acuerdo con el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable en su Estudio del potencial de cogeneración y trigeneración en el Ecuador de octubre de 2017, se establece las principales industrias que han desarrollado proyectos energéticos con las tecnologías de cogeneración descritas previamente.

Tal como se muestra en la Tabla 1.4, se tiene una potencia instalada de 490,85 MW lo que equivale a una generación eléctrica anual de 1619 GWh. Entre los equipos destacan motores de combustión interna y turbinas de vapor y/o gas. El combustible predominante en el sector corresponde a residuos agrícolas y forestales, y en menor medida, a diésel, búnker y gas natural. (Espinoza, 2017)

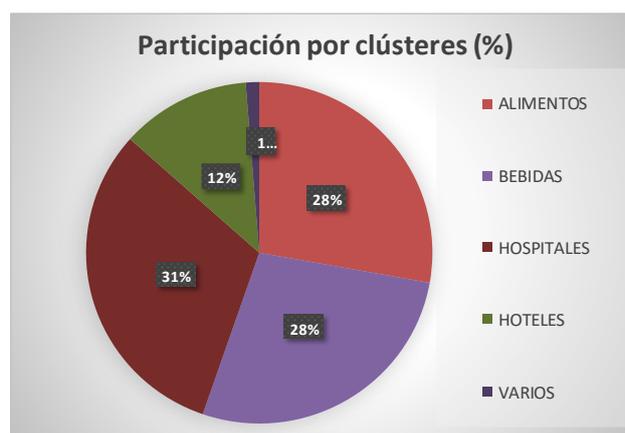
Tabla 1.4 Cogeneración instalada en Ecuador.

Tipo de industria/proceso	Ubicación	Tecnología / Proceso	Potencia Inst. (MW)	Tipo de combustible	Generación (GWh/año)
Industria Azucarera	Guayas, Cañar	Ciclo Rankine	136,6	Bagazo de caña de azúcar	408,3
Industria Alimentos	Manabí	Motor Diésel (2 x 500 kW)	1	Diésel	N/D
Industria Palma Aceitera	Quininde y Shushufindi	Ciclo Rankine 1,0 y 1,2 MW	2,2	Fibra+cuesco proceso palma aceitera	10,8 (estimado)
Industria de la madera	Pichincha	Ciclo Rankine	1	Residuos de madera	N/D
Termoeléctrica (Termogas Machala)	El Oro	Ciclo Combinado *	319*	Gas Natural	1.200
Refinería Esmeraldas	Esmeraldas	Ciclo Rankine	30,75	N/D	N/D
Producción etanol	Cañar	Ciclo Rankine	0,3	Bunker	-
TOTAL:			490,85**		

Fuente: Espinoza, J.(2017). Estudio del potencial de cogen y trigén en Ecuador. Cuenca: CELEC EP

En perspectiva, según el mismo estudio, el potencial de trigeneración en el país asciende a los 200 MW, de los cuales el clúster hotelero representa el 12% de participación, tal como se muestra en la Figura 1.8. No obstante, a la fecha, aun no se ha implementado ningún proyecto satisfactoriamente.

Figura 1.8 Potencial de trigeneración en Ecuador.



Fuente: Espinoza, J.(2017). Estudio del potencial de cogen y trigén en Ecuador. Cuenca: CELEC EP

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el presente proyecto de ingeniería se delimitó la metodología de trabajo seguida conforme el diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.1. Como primer paso, se identificó las principales variables operativas y parámetros de modelación del edificio a partir de las necesidades del cliente y bajo normativa técnica vigente, respectivamente. Luego, a través de una sucinta revisión bibliográfica, de alternativas de trigeneración para hoteles, y utilizando el proceso analítico jerárquico se estableció una propuesta de solución que satisface al mismo nivel las demandas energéticas de la empresa en comparación a un sistema tradicional preestablecido de climatización y calentamiento de agua sanitaria. Finalmente, basado en el diseño por selección y mediante simulación energética se definió y comparó ambos sistemas en términos económicos con el fin de evaluar la viabilidad del proyecto estimando los flujos de caja en el tiempo.

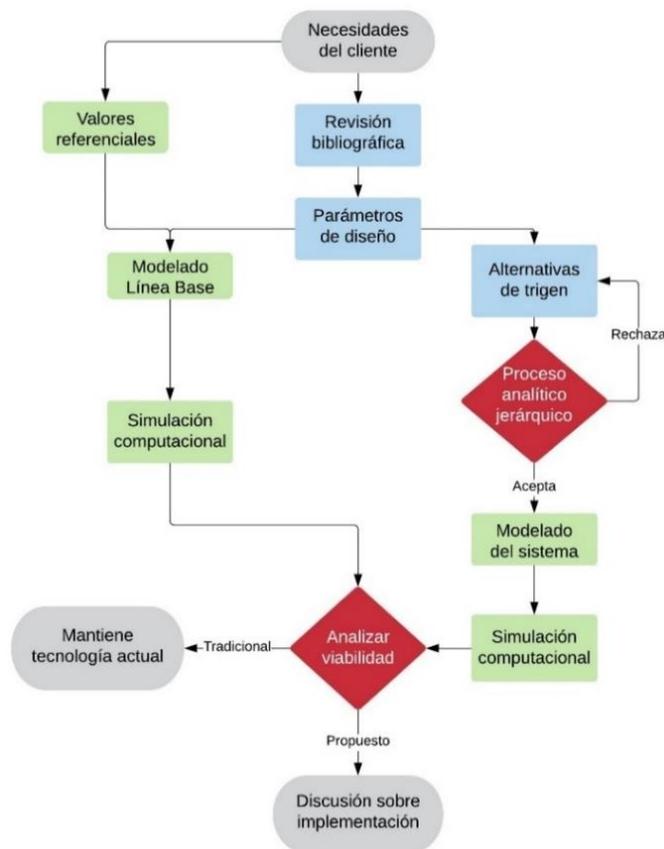


Figura 2.1 Flujograma de trabajo.

Fuente: [Elaboración propia].

Tal como se indicó en el capítulo 1, la implementación de una planta de trigeneración dependerá tecnológicamente de dos procesos industriales vinculados entre sí para producir y consumir, simultáneamente, energía tanto eléctrica como térmica. Por ello, a partir de la declaración expresa de requerimientos del cliente se estableció el siguiente proceso de diseño mostrado a continuación.

2.1 Necesidades del cliente

La tarea respondió a evaluar opciones de diseño de sistemas de trigeneración capaces de sustituir la planificada actual generación individual de electricidad, calor y frío del complejo hotelero en Santo Domingo.

Por tanto, de una entrevista realizada al representante de la compañía nació la siguiente lista inicial de atributos presentada en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Lista de Atributos categorizada.

OBJETIVOS	RESTRICCIONES
<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología consolidada en el mercado. • De larga vida útil. • Limitado mantenimiento. • Bajo costo inicial de equipos. • Simple suministro de combustible. • De inversión recuperable. • De alto rendimiento global. • Resistente a la corrosión. • Bajo costo operativo. • Asegurar la protección contra accidentes. • Aprovechar la energía disponible. • Simple adquisición de repuestos. 	<ul style="list-style-type: none"> • 75 m² destinado al cuarto de máquinas. • Operación mínima de 18 horas diarias.
	FUNCIONES
	<ul style="list-style-type: none"> • Satisfacer al menos la demanda interna de electricidad. • Generar demanda suficiente de agua caliente sanitaria. • Alcanzar niveles aceptables de confort térmico.

Fuente: [Elaboración propia].

Ahora, basándose en las preferencias del cliente, la lista de objetivos se clasificó conforme el siguiente árbol jerárquico mostrado en la Figura 2.2.

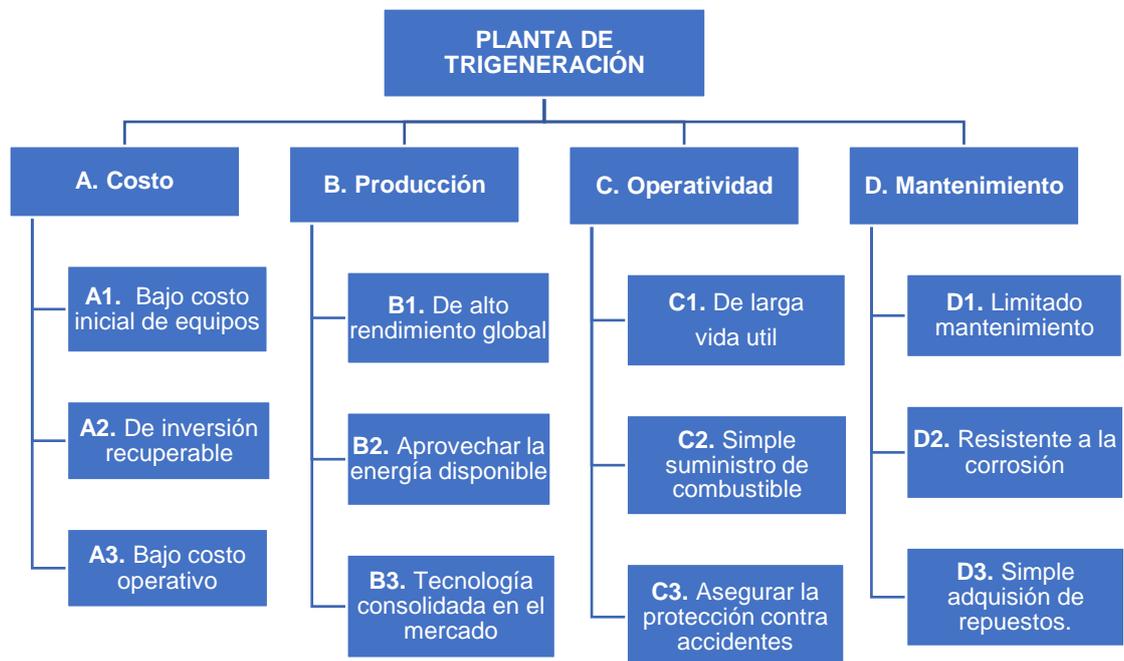


Figura 2.2 Árbol de objetivos jerárquico.

Fuente: [Elaboración propia].

Luego, con la lista de objetivos jerarquizada, se estableció su importancia relativa mediante la siguiente escala de ponderación expuesta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Escala de importancia relativa.

Valor	Explicación
1	<i>Igual importancia:</i> Alternativas similares.
3	<i>Fuerte importancia:</i> Favorece fuertemente una alternativa.
6	<i>Extrema importancia:</i> Favorece extremadamente una alternativa.
2,4,5	<i>Intermedia importancia:</i> Conforme se necesite.
1/n	<i>Recíproco:</i> Para comparación inversa.

Fuente: [Elaboración propia].

Con ello, se efectuó la ponderación de objetivos y subobjetivos como se ejemplifica a continuación:

- *Pesos de los objetivos*

Tabla 2.3 Comparación en pares de objetivos.

CRITERIO	A	B	C	D	Total	PESO
A	1,0	2,0	3,0	5,0	11,0	0,41
B	0,50	1,0	2,0	4,0	7,50	0,28
C	0,33	0,50	1,0	5,0	6,83	0,25
D	0,20	0,25	0,20	1,0	1,65	0,06
Total Final					26,98	1,00

Fuente: [Elaboración propia].

- *Pesos de los subobjetivos*

Tabla 2.4 Comparación en pares de subobjetivos: Costo (0,41).

CRITERIO	A1	A2	A3	Total	Peso REL.	Peso ABS.
A1	1,0	3,0	6,0	10,0	0,60	0,25
A2	0,33	1,0	4,0	5,33	0,32	0,13
A3	0,17	0,25	1,0	1,42	0,08	0,03
Total Final				16,75	1,00	0,41

Fuente: [Elaboración propia].

Tabla 2.5 Comparación en pares de subobjetivos: Producción (0,28).

CRITERIO	B1	B2	B3	Total	Peso REL.	Peso ABS.
B1	1,0	2,0	5,0	8,00	0,57	0,16
B2	0,50	1,0	3,0	4,50	0,32	0,09
B3	0,20	0,33	1,0	1,53	0,11	0,03
Total Final				14,03	1,00	0,28

Fuente: [Elaboración propia].

Tabla 2.6 Comparación en pares de subobjetivos: Operatividad (0,25).

CRITERIO	C1	C2	C3	Total	Peso REL.	Peso ABS.
C1	1,0	3,0	6,0	10,0	0,56	0,14
C2	0,33	1,0	5,0	6,33	0,36	0,09
C3	0,17	0,20	1,0	1,37	0,08	0,02
Total Final				17,70	1,00	0,25

Fuente: [Elaboración propia].

Tabla 2.7 Comparación en pares de subobjetivos: Mantenimiento (0,06).

CRITERIO	D1	D2	D3	Total	Peso REL.	Peso ABS.
D1	1,0	2,0	4,0	7,00	0,57	0,03
D2	0,50	1,0	2,0	3,50	0,29	0,02
D3	0,25	0,50	1,0	1,75	0,14	0,01
Total Final				12,25	1,00	0,06

Fuente: [Elaboración propia].

Finalmente, la lista de objetivos jerárquicos ponderados se presenta así:

1. Costo (41%)

- 1.1 Bajo costo inicial de equipos. (25%)
- 1.2 De inversión recuperable. (13%)
- 1.3 Bajo costo operativo. (3%)

3. Operatividad (25%)

- 3.1 De larga vida útil. (14%)
- 3.2 Simple suministro de combustible. (9%)
- 3.3 Protección contra accidentes. (2%)

2. Producción (28%)

- 2.1 De alto rendimiento global. (16%)
- 2.2 Aprovechar energía disponible. (9%)
- 2.3 Tecnología consolidada. (3%)

4. Mantenimiento (6%)

- 4.1 Limitado mantenimiento. (3%)
- 4.2 Resistente a la corrosión. (2%)
- 4.3 Simple adquisición de repuestos (1%)

2.2 Estructura funcional

El análisis funcional de la planta de trigeneración se representó mediante los modelos de caja negra y caja transparente.



Figura 2.3 Modelo caja negra.

Fuente: [Elaboración propia].

En la Figura 2.3 se especifica las funciones más relevantes del sistema donde destacan la producción de electricidad, calor y frío a partir de una única transformación de combustible e intercambio de calor entre masas de agua.

Mientras, en la Figura 2.4, se ilustra la relación de tecnologías del sistema, ya que al proceso de cogeneración se debe agregar enfriamiento en forma de absorción para aprovechar el calor residual en la producción de frío a fin de climatizar las habitaciones considerando el confort térmico de sus huéspedes.

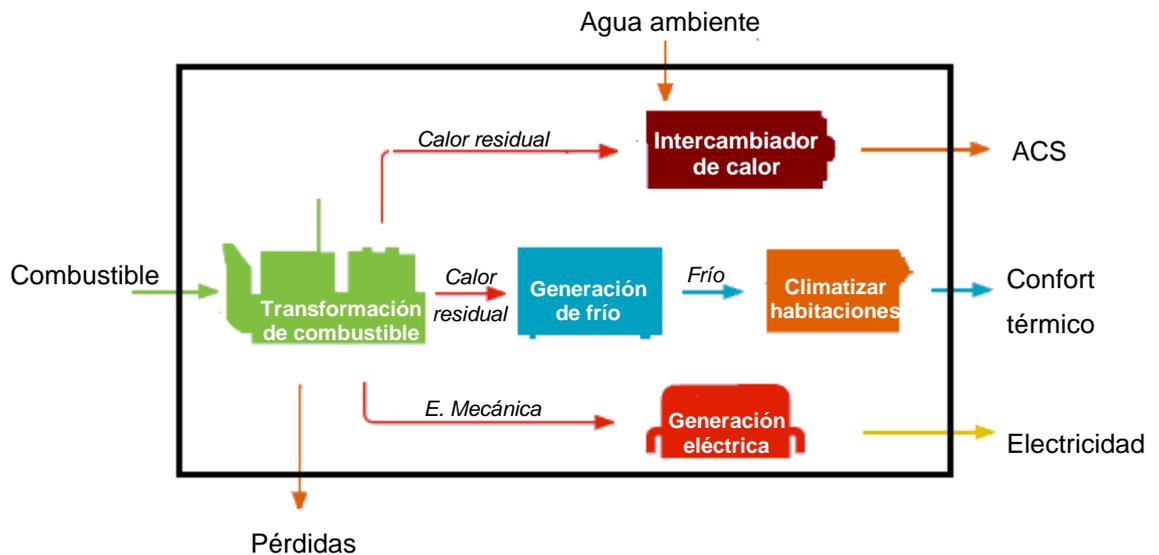


Figura 2.4 Modelo caja transparente.

Fuente:DFIC.(2016). *Cogeneration & Trigeneration: How to produce energy efficiently.* Berlin: GIZ GmbH

En adición, se elaboró el Árbol Función–Medios que representa gráficamente la relación entre dichas funciones y sus respectivos medios de operación.

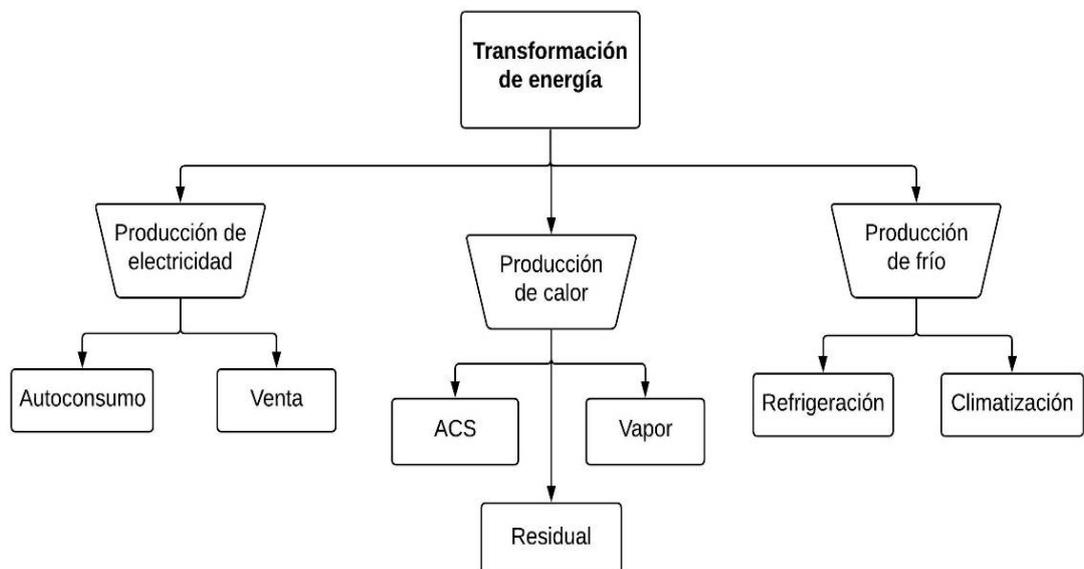


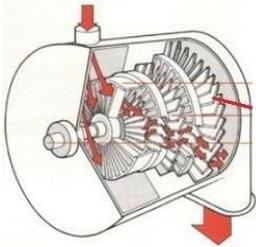
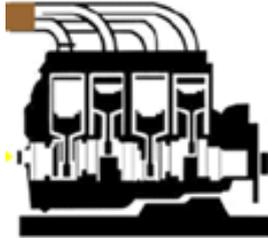
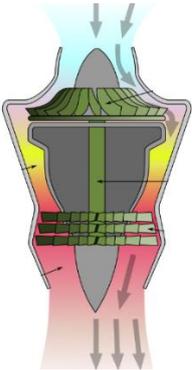
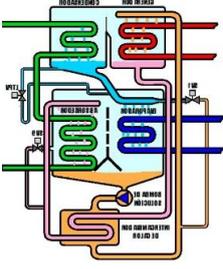
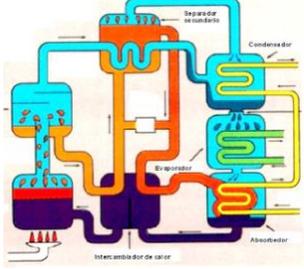
Figura 2.5 Árbol Función–Medios.

Fuente: [Elaboración propia].

2.3 Generación de conceptos

Las ideas de solución para la implementación de la planta de trigeneración se colocaron en la siguiente tabla considerando todos los criterios técnicos ingenieriles analizados hasta el momento.

Tabla 2.8 Cuadro Morfológico de tecnologías.

TECNOLOGÍA	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3
Cogeneración	 <p><i>Turbina de vapor</i></p>	 <p><i>Motor combustión interna</i></p>	 <p><i>Turbina de gas</i></p>
Refrigeración por Absorción	 <p><i>Efecto Simple</i></p>	 <p><i>Efecto Doble</i></p>	<p><i>Efecto Dual</i></p>

Fuente: [Elaboración propia].

Luego, a partir de las opciones de diseño presentadas en este cuadro morfológico, se procedió a describir las posibles alternativas de selección de acuerdo con la compatibilidad tecnológica entre subsistemas.

Alternativa A:

Una planta de trigeneración operando con una turbina de vapor y un enfriador de absorción a efecto simple garantiza la producción de frío al intercambiar calor con el vapor a baja presión.

Alternativa B:

Una planta de trigeneración operando con un motor de combustión interna y un enfriador de absorción a efecto dual garantiza la producción de frío al intercambiar calor con los gases de escape de la combustión y con el agua caliente del circuito de enfriamiento.

Alternativa C:

Una planta de trigeneración operando con una turbina de gas y un enfriador de absorción a efecto doble garantiza la producción de frío al intercambiar calor con los gases de escape procedentes de la cámara de combustión.

2.4 Selección de concepto

Se optó por el “Método de Selección de Calificación Ponderada” para establecer la mejor alternativa de diseño posible. El sistema de calificación ponderó la lista de objetivos jerárquicos de acuerdo con la escala detallada en la siguiente tabla.

Tabla 2.9 Sistema de puntuación de alternativas.

Valor	Explicación
1	<i>Bajo:</i> Alternativa completamente inferior.
3	<i>Medio:</i> Alternativa intermedia.
5	<i>Alto:</i> Alternativa completamente superior.

Fuente: [Elaboración propia].

Finalmente, considerando las preferencias del cliente y comparando tecnologías técnicamente, se estableció la alternativa de solución más adecuada para las condiciones particulares del complejo hotelero.

La matriz de decisión presentada en la Tabla 2.10 definió a la **Alternativa B** como el **mejor sistema** a implementarse por cuando obtuvo una puntuación de 381 puntos. Seguida de la A con 271 pts. y, por último, la C con 245 pts.

Tabla 2.10 Matriz de decisión.

Criterios de selección	Peso Abs.	ALTERNATIVA					
		A		B		C	
		Esc.	Valor	Esc.	Valor	Esc.	Valor
Bajo costo inicial de equipos	25	3	75	5	125	1	25
De alto rendimiento global	16	5	80	1	16	3	48
De larga vida útil	14	1	14	3	42	5	70
De inversión recuperable	13	3	39	5	65	3	39
Aprovechar energía disponible	9	1	9	5	45	3	27
Simple suministro combustible	9	3	27	5	45	1	9
Limitado mantenimiento	3	1	3	5	15	3	9
Bajo costo operativo	3	3	9	1	3	3	9
Tecnología consolidada	3	3	9	5	15	1	3
Resistente a la corrosión	2	3	6	5	10	3	6
Puntuación Final		271		381		245	
Escalafón		2		1.		3	

Fuente: [Elaboración propia].

2.5 Modelado del edificio

Para representar la infraestructura del complejo hotelero de forma simplificada se elaboró un modelo geométrico tridimensional asistido por el software de diseño, bajo versión de prueba gratuita, *DesignBuilder®*. Mismo que por su potente interfaz gráfica facilitó abstraer las propiedades esenciales del sistema, como, por ejemplo, las características geométricas, las condiciones habituales de operación y la interacción con el ambiente.

A continuación, se destacan las consideraciones de diseño más importantes del proyecto. Mientras, la secuencia seguida para modelar el edificio e ingresar los parámetros normados y las condiciones ambientales se ilustran en el Apéndice A.

2.5.1 Condiciones de funcionamiento

Las variables operativas del establecimiento se proyectaron conforme la información facilitada por la cadena hotelera. Datos contrastables correspondientes a un hotel en funcionamiento, de 34 habitaciones, situado en la ciudad de Quito.

Tabla 2.11 Variables proyectadas de diseño.

Variable	Valor mensual	Periodo	Fuente
Energía eléctrica	11092 [kWh]	Nov. 2018	Empresa Eléctrica Quito S.A.
Agua potable	564 [m ³]	a Nov. 2019	EP. Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento Quito

Fuente: [Elaboración propia].

A partir de los valores referenciales de la Tabla 2.11, se estimó un consumo mínimo de electricidad mensual de 326,2 kWh por habitación y demanda de agua caliente sanitaria en las instalaciones del nuevo complejo de 13,52 L/m²-día suministrada a 65 °C.

2.5.2 Parámetros de modelación

Se establecieron acorde a las Normas ASHRAE Standard 90.1-2010 y ASHRAE Standard 62.1-2007, y ASHRAE Handbook - Fundamentals 2009.

Tabla 2.12 Parámetros de modelación.

Parámetro		Valor sugerido		Fuente: ASHRAE
Ocupación	92 clientes	Q _{Sen} : 75 [W]	Q _{Lat} : 55 [W]	Tabla 1 HB-Fundamentals 2009, chapter 18
	30 empleados	Q _{Sen} : 170 [W]	Q _{Lat} : 255 [W]	
Densidad de iluminación		9,5 [W/m ²]		Tabla 9.5.1 Standard 90.1-2010
Densidad de equipos		Habitación: 5,4 [W/m ²] Cocina: 9,2 [W/m ²]		Tabla 12 HB-Fundamentals 2009, chapter 18
Tasa de ventilación		Habitación: 1,10 [m ³ /h-m ²] Cocina: 2,19 [m ³ /h-m ²]		Tabla 6.1 Standard 62.1-2007

Fuente: [Elaboración propia].

En cuanto a la ocupación hotelera se consideró las siguientes premisas para establecer el calendario de actividades:

- Las habitaciones se encontrarán operativas durante las 24 horas del día con permanencia mínima de 6 horas.
- Se reserva 2 horas como mínimo para tareas de limpieza, desinfección y abastecimiento de artículos de higiene personal.
- Se proyecta una ocupación promedio del 85%, por tanto, se consideró una densidad ocupacional de 16,5 m²/persona por día.

2.5.3 Condiciones ambientales

El lote de terreno se localiza en la zona urbana de la ciudad de Santo Domingo al pie de la Avenida del Cooperativismo. Presenta un clima tropical con precipitaciones muy frecuentes y una breve estación seca durante el año. Su temperatura ambiente oscila entre 21 °C y 32 °C.



Figura 2.6 Lote de terreno.

Fuente: Google. (s.f.). Mapa de Santo Domingo, Ecuador en Google Maps®.

El sitio mostrado en la Figura 2.6 corresponde a su ubicación geográfica, que en coordenadas UTM, equivalen a -0,262960 de latitud y -79,177331 de longitud. También, presenta una altitud promedio de 635 m.s.n.m. y presión atmosférica de 101,4 kPa.

Por un lado, según información meteorológica recopilada se fijó al 24 de abril como caso crítico, por ser el día más caluroso del año, alcanzando una temperatura máxima de 28,5 °C durante la mañana. (Merkel, 2020)

Por otro lado, se definió una humedad relativa entre 30% y 60%, y temperatura de climatización de 25 °C por concepto de confort térmico. (Pereyra, 2019)

2.5.4 Arquitectura del edificio

La construcción, asentada sobre un suelo netamente arcilloso, proyecta una arquitectura moderna que fusiona materiales y texturas clásicas. El modelo del edificio, mostrado en la Figura 2.7, así lo representa.

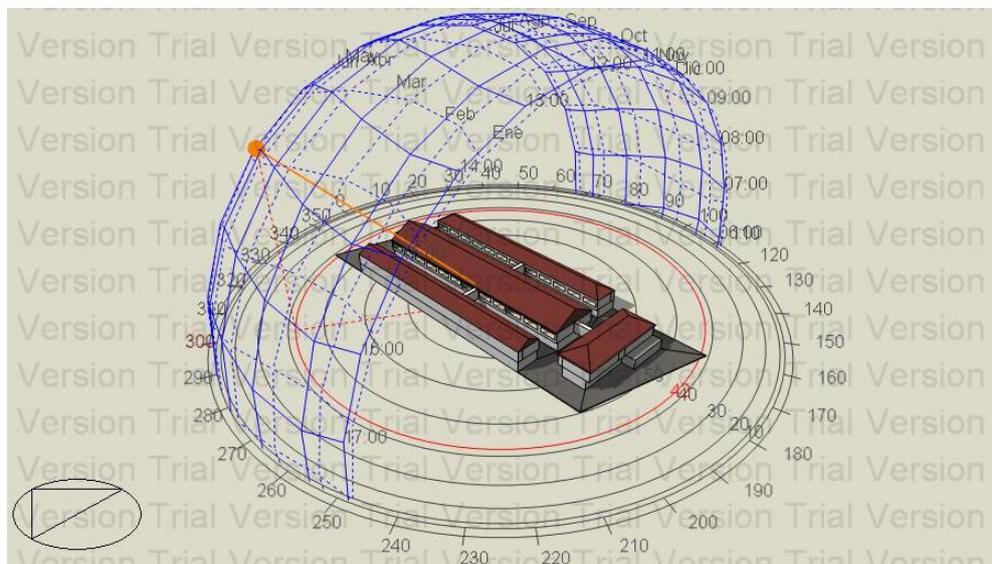


Figura 2.7 Edificio – Vista Renderizada.

Fuente: DesignBuilder®. (2019). Complejo hotelero en vista renderizada - versión 6.1.2.005.

En general, la planta baja se modeló con:

- Pisos de concreto compacto,
- Entradas de acceso a los parqueaderos de asfalto,
- Losas de hormigón armado, y
- Cubiertas a dos aguas de teja continua curva.

En particular, la planta alta, con 46 habitaciones, se modeló con:

- Ventanas de vidrio envolvente y puertas de *plywood*.
- Iluminación empotrada y tumbados enlucidos de *gypsum*,
- Paredes exteriores de BC con mortero convencional y enlucido de *stucco* de 1,5 cm. de espesor.
- Paredes interiores de bloque de picón y enlucido de *stucco* de 1,0 cm. de espesor.
- Pisos de cerámica y acabados de lujo.

2.6 Simulación energética

Para estimar el comportamiento energético en términos de la carga de climatización y calentamiento de agua sanitaria, potencia eléctrica y consumo de combustible durante un período de simulación de un año calendario se utilizó el programa, de licencia libre, *EnergyPlus v8.9* con ayuda de la interfaz gráfica existente en el *software* de modelación.

Los aspectos centrales cubiertos en las varias iteraciones de simulación del programa se describen como sigue:

- Un área total para climatizar de 1965,40 m².
- Un mismo horario de operatividad de equipos e iluminación.
- Una solución integrada y simultánea basada en el equilibrio térmico.
- Un factor de seguridad para el dimensionamiento de equipos de 1,15.

A continuación, se presentan las plantillas utilizadas para simular tanto el sistema línea base como el sistema de trigeneración. Para revisar la guía de simulación energética, descrita paso a paso, remitirse al Apéndice A.

2.6.1 Línea base

El sistema de calentamiento de agua sanitaria, prestablecido por el cliente, correspondió a una caldera de circuito cerrado alimentada por diésel. El esquema se muestra en la Figura 2.8.

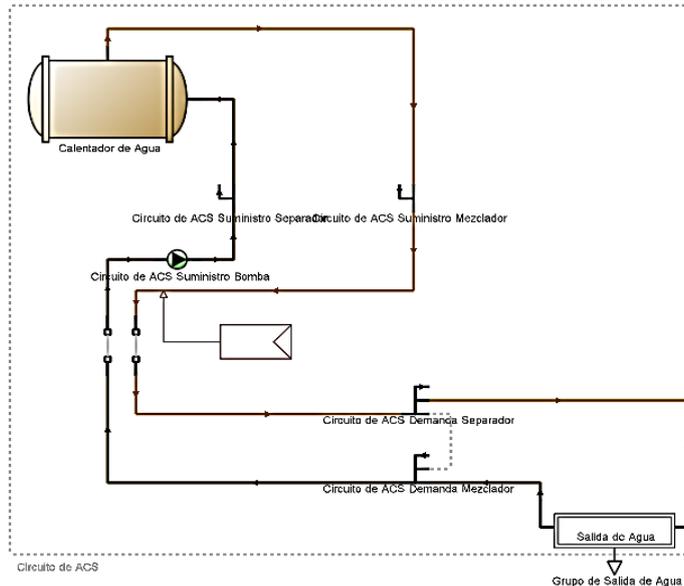


Figura 2.8 Plantilla ACS.

Fuente: DesignBuilder®. (2020). Domestic hot water template - v6.1.2.005.

Mientras, el sistema de climatización consistió en un arreglo modular de unidades de aire acondicionado de expansión directa -tipo paquete-. El esquema se presenta en la Figura 2.9.

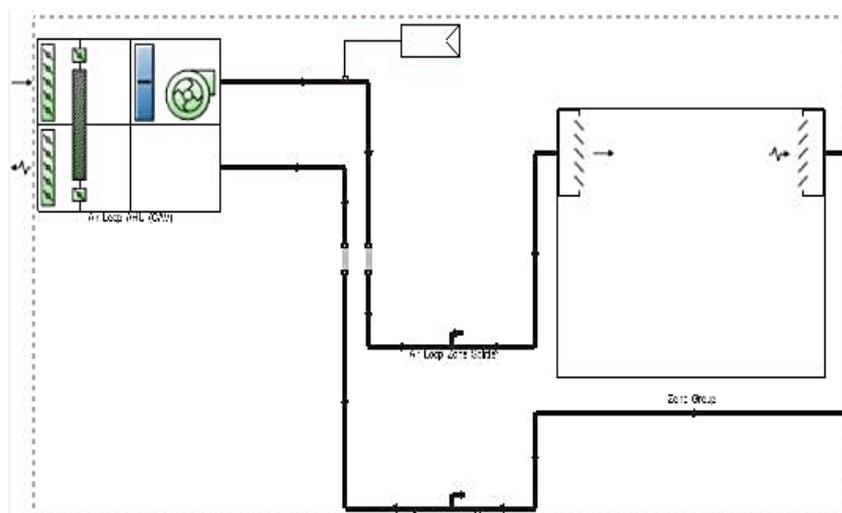


Figura 2.9 Plantilla HVAC.

Fuente: DesignBuilder®. (2020). Heating, ventilating and air conditioning template - v6.1.2.005.

2.6.2 Planta de trigeneración

El sistema trigén consistió en un motor de combustión interna para la generación eléctrica y de calor, un intercambiador de calor para el calentamiento de agua sanitaria, y una enfriadora de absorción, torre de enfriamiento y unidades manejadoras de aire para la climatización de las habitaciones. El esquema simplificado se detalla en la Figura 2.10.

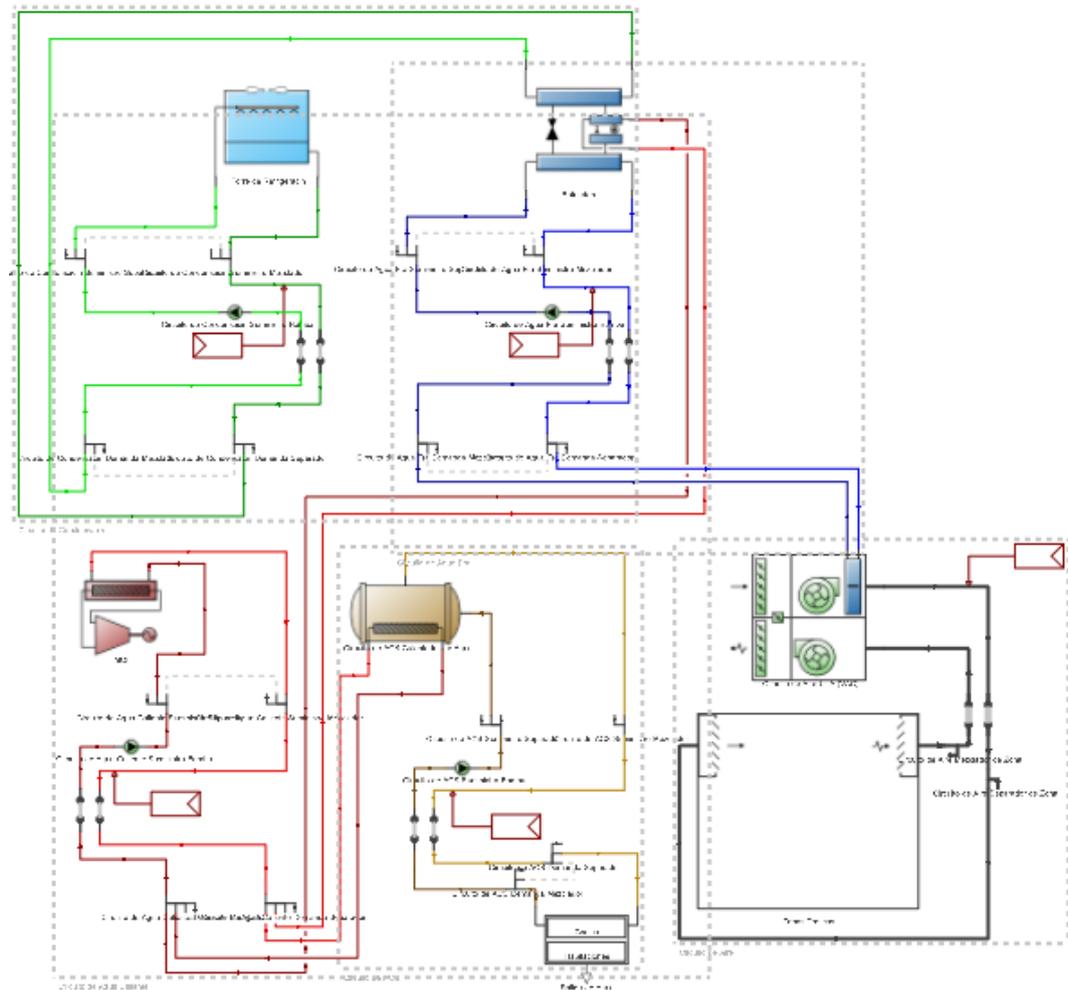


Figura 2.10 Plantilla HVAC detallado.

Fuente: DesignBuilder®. (2020). Own elaboration template - v6.1.2.005.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se presenta los principales hallazgos como resultado de las simulaciones energéticas realizadas al sistema línea base y al sistema de trigeneración escogido y modelado en el capítulo anterior. Por un lado, en el Apéndice B, se muestra el informe de consumo energético que incluye las gráficas obtenidas por simulación y por el otro, en el Apéndice C, se ejemplifica la validación de las variables de consumo y del dimensionamiento de los equipos.

Seguidamente, por simplicidad, se efectuó la comparación tomando en consideración los siguientes subsistemas desglosados.

3.1 Demanda eléctrica

El análisis se realizó considerando los rubros de consumo anual de electricidad por concepto de iluminación, equipamiento y climatización. De este modo, se presenta la tabla comparativa con los principales resultados.

Tabla 3.1 Demanda eléctrica.

Desglose	Línea Base, Energía [kWh]	Sistema Propuesto, Energía [kWh]
Iluminación (interior + exterior)	75200	75200
Equipamiento	102008	102008
Climatización	26912	255760
Total	204120	432968

Fuente: [Elaboración propia].

Sin embargo, por concepto de generación eléctrica, el sistema propuesto produce 1971,00 GWh anualmente. Rubro que debe ser considerado oportunamente en el análisis de costos.

3.2 Demanda térmica

Por concepto de calentamiento de agua y climatización se estableció el siguiente análisis calorífico, considerando la potencia nominal del equipo, energía de calentamiento/refrigeración, caudal de diseño sugerido, tipo de combustible y energía calorífica.

3.2.1 Agua caliente sanitaria

De acuerdo con el volumen de agua estimado en 8941 m³ y un caudal sugerido de 1020 L/h durante un periodo de 8760 horas, se presenta la siguiente tabla resumen del circuito.

Tabla 3.2 Agua caliente sanitaria.

Sistema	Potencia Nominal [kW]	Demanda de calor [kWh]	Combustible	
			Tipo	E. Calorífica [kWh]
Línea Base	59	519080	Gasóleo	564217
Trigeneración	63	550258	Calor Residual	561488

Fuente: [Elaboración propia].

3.2.2 Frío

De acuerdo con la carga térmica estimada en 65,6 TRF y un caudal total sugerido de 24500 CFM, obtenidos del caso crítico, se presenta la siguiente tabla resumen del circuito.

Tabla 3.3 Frío.

Sistema	Potencia Nominal [kW]	Demanda de frío [kWh]	Tipo de Combustible
Línea Base	231	67281	Electricidad
Trigeneración	230	65763	Calor Residual

Fuente: [Elaboración propia].

3.3 Equipamiento

A partir de los datos brutos de la sección anterior y considerando un factor de seguridad de 1,15 por dimensionamiento de equipos, entonces se procede con el detalle de la selección de los componentes asociados a cada sistema.

3.3.1 Línea base

Para el acondicionamiento de aire se seleccionó tres unidades de techo tipo paquete individual, modelo *WeatherMaker®* 50TC-D29 de la marca *Carrier Corporation*. Misma que se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.1 Unidad paquete – 50TC-D29.

Fuente: Carrier Corp. (2017). WeatherMaker® 50TC-D29. USA.

Su sistema de refrigeración cuenta con dos compresores de desplazamiento positivo que operan entre 54 psig a baja presión y 630 psig a alta presión. Además, incluye un ventilador de 277 W para la unidad horizontal de flujo de aire y alimentación eléctrica trifásica de 230 V y 60 Hz. (Carrier Corp., 2017)

En la Tabla 3.4 se presenta la información técnica más importante del equipo que especifica sus características de selección.

Tabla 3.4 Ficha Técnica: Unidad paquete – 50TC-D29.

Capacidad [TRF]	Flujo de aire [CFM]	Dimensiones [mm]			Peso [kg]	Refrigerante
		Largo	Ancho	Alto		
25	7500	4008	2194	1456	997	R-410A (11,3 kg)

Fuente: Carrier Corp. (2017). Product data. Ecuador.

Para el calentamiento de agua sanitaria se seleccionó una caldera pirotubular de espalda seca, de tres pasos de tubos de humo, que trabaja a bajas temperaturas, modelo *Pyronox® LRP-NT plus 1* de la marca YGNIS AG. Misma que se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.2 Caldera de ACS – LRP-NT plus 1.

Fuente: YGNIS AG. (2019). Pyronox LRP-NT plus 1. España.

El equipo opera a una presión de servicio de 4,0 bar, temperatura máxima de funcionamiento de 90 °C y temperatura mínima de retorno de 15 °C a 100 L/min de caudal máximo de circulación. De 92% de rendimiento estándar y alimentación eléctrica de 230 V y 50 Hz. (YGNIS AG, 2016)

En la tabla 3.5 se presenta la información técnica más importante del equipo que especifica sus características de selección.

Tabla 3.5 Ficha Técnica: Caldera ACS – LRP-NT plus 1.

Potencia [BHP]	Volumen de agua [L]	Dimensiones [mm]			Peso [kg]	Combustible
		Largo	Ancho	Alto		
92	130	1141	770	1040	283	Diésel (0,15 m ³)

Fuente: YGNIS AG. (2016). Manual de instalación. España.

3.3.2 Panta de trigeneración

Para el acondicionamiento de aire se seleccionó una enfriadora de absorción de doble efecto, que opera con gases de escape, modelo *CHP008H* de la marca *World Energy*. Misma que se muestra en Figura 3.7.



Figura 3.3 Enfriadora de absorción – CHP008H.

Fuente: World Energy Corp. (2017). CHP008H. Ireland.

El equipo, con capacidad de 80 toneladas de refrigeración, incluye un rango ajustable de caudales de agua y COP en frío de 1,42. Pesa 4300 kg. en funcionamiento pleno y demanda 2,8 kW de potencia eléctrica con fuente de alimentación estándar trifásica de 220 V y 50 Hz. Cuenta con 2610 mm de largo, 1800 mm de ancho y 2017 mm de alto. (World Energy Corp., 2019)

En la Tabla 3.6 se presenta la información técnica más importante del equipo que especifica sus características de selección.

Tabla 3.6 Ficha Técnica: Enfriadora de absorción – CHP008H.

Gases de escape			Agua Helada			Solución
Temperatura [°C]		Consumo [kg/s]	Temp. ida [°C]	Temp retorno [°C]	Consumo [m³/h]	LiBr (54%)
Entrada	Salida					
450	210	0,488	7	12	48,4	Peso: 1428 kg

Fuente: World Energy Corp. (2019). Catalogue: Absorption Chillers. Ireland.

Con respecto al circuito de condensación se escogió una torre de enfriamiento de 6,3 kW de potencia eléctrica, peso en operación de 2850 kg. y capaz de enfriar 80 m³/h de agua, operando entre 37 °C y 32 °C con caída de presión máxima de 7.6 m-H₂O.

Para la circulación de aire acondicionado en las habitaciones se definió tres unidades manejadoras de aire de volumen variable, modelo Aero® 39MW-17W de la marca *Carrier Corporation*. Misma que se muestra en Figura 3.8.



Figura 3.4 Unidad manejadora de aire – 39MW-17W.

Fuente: Carrier Corp. (2017). Aero® 39MW-17W. USA.

El equipo cuenta con un variador de frecuencia de fábrica que permite regular la velocidad rotacional del motor de acuerdo con la demanda, además utiliza un sistema de aislamiento de panel sellado de doble pared R-13. Se caracteriza por su diseño hermético y fácil limpieza y mantenimiento de componentes. (Carrier Corp., 2019)

En la Tabla 3.7 se presenta la información técnica más importante del equipo que especifica sus características de selección.

Tabla 3.7 Ficha Técnica: Unidad manejadora de aire – 39MW-17W.

Capacidad [CFM]	Velocidad [ft/min]	Dimensiones [mm]			Ventiladores (min/máx) [HP]	
		Largo	Ancho	Alto	Suministro	Retorno
8500	500	1981	2007	1270	1,5/20	1,5/20

Fuente: Carrier Corp. (2017). Product data. Ecuador.

Para el calentamiento de agua se seleccionó un intercambiador de calor de placas y marco con juntas, de flujo cruzado, modelo AQ1L de la marca Alfa Laval. Mismo que se muestra en la Figura 3.9.



Figura 3.5 Intercambiador de calor – AQ1L.

Fuente: Alfa Laval. (2019). Heat exchanger AQ1L. Suecia.

Las placas de transferencia de calor del equipo se fabricaron de acero inoxidable, aleación 316/304 y titanio; marco de acero suave y pintado con epoxi; las boquillas de acero al carbono y tuberías DN-32 de acero inoxidable. (Alfa Laval, 2019)

En la Tabla 3.8 se presenta la información técnica más importante del equipo que especifica sus características de selección.

Tabla 3.8 Ficha Técnica: Intercambiador de calor – AQ1L.

Capacidad [kW]	Flujo másico máximo [kg/s]	Dimensiones, [mm]			Superficie de transferencia [m ²]	Temp. diseño [°C]
		Largo	Ancho	Alto		
100	5	1370	190	790	10,9	180

Fuente: Alfa Laval. (2019). Product data. Suecia.

Por último, para la generación de electricidad y aprovechamiento térmico se seleccionó el grupo electrógeno abierto de 313 kVA, modelo *P251B* de la marca *Onis Visa S.p.A.* Mismo que se muestra en la Figura 3.10.



Figura 3.6 Grupo electrógeno – P251B.

Fuente: Onis Visa S.p.A. (2019). Power Generators - P251B. Italia.

El equipo conformado por un motor de combustión interna a diésel de 6 cilindros en línea y 8800 cm³ de cilindraje, modelo *1506A-E88TAG3* de la marca *Perkins*, cuenta con sistema de enfriamiento por agua de 30 L de capacidad, caudal de bomba de 11,4 m³/h, y temperatura del agua y gases de escape a la salida de 90 °C y 477 °C, respectivamente.

Además, incluye un alternador *STAMFORD*, modelo *UCDI274K*, trifásico de 60 Hz y factor de potencia de 0,8. Capaz de alcanzar 208 VAC de tensión en salida y 450 A. En la Tabla 3.9 se presenta la información técnica más importante del equipo que especifica sus características de selección. (Onis Visa S.p.A., 2019)

Tabla 3.9 Ficha Técnica: Grupo electrógeno – P251B.

Potencia Prime [kWe]	Velocidad nominal [RPM]	Consumo combustible [L/h]	Flujo de escape [m ³ /h]	Dimensiones [mm]			Peso [kg]
				Largo	Ancho	Alto	
225	1800	63,1	2934	3030	1120	1950	2210

Fuente: Onis Visa S.p.A. (2018). Technical Datasheet. Ecuador: Dinattek.

3.4 Estimación de costos

Considerando los costos asociados con la adquisición de equipos, instalación y puesta en marcha, mantenimiento, combustibles y operatividad anual de cada una de las tecnologías descritas anteriormente, se procedió con sigue.

3.4.1 Línea base

El sistema contó con una inversión inicial estimada en \$108.000,00, desglosada en la Tabla 3,10. Mientras por concepto de instalación de tuberías, ductos y puesta en marcha se estimó un rubro, sugerido por expertos, de \$13.440,00. Costo operativo anual de \$20.804,32 y gastos en electricidad y agua potable de \$26.027,85.

Tabla 3.10 Estimación de costos operativos: Línea base.

Inversión inicial			Mantenimiento Anual	Consumo Combustible
Cant.	Equipo	Valor Final		
3	WheatherMaker 50TC-D29	\$60.000,00	\$1.200,00 (4 visitas técnicas)	\$2.497,43 (Electricidad)
1	Pyronox LRP-NT plus 1	\$48.000,00	\$3.000,00 (1 visita técnica)	\$16.204,32 (Gasóleo)
TOTAL		\$108.000,00	\$4.600,00	\$18.701,75

Fuente: [Elaboración propia].

Por otra parte, de la Matriz Financiera, tabulada en el Apéndice D, se determinó un **VAN** de **-\$713.018,59** y **TIR indefinido**. Lo cual representó un sistema totalmente a pérdida que debe ser rechazado.

3.4.2 Panta de trigeneración

El sistema contó con una inversión inicial estimada en \$271.500,00. Mientras por concepto de instalación de tuberías, ductos y puesta en marcha se estimó un rubro, sugerido por expertos, de \$51.040,00. Costo operativo anual de \$154.455,14 y gastos en agua potable de \$7.107,12.

Debe tomarse en cuenta que los valores mostrada en la Tabla 3.11 corresponden a una aproximación meramente informativa.

Tabla 3.11 Estimación de costos operativos: Planta de trigeneración.

Inversión inicial			Mantenimiento Anual	Consumo Combustible
Cant.	Equipo	Valor Final		
1	CHP008H + Torre Enfriamiento	\$192.000,00	\$1.200,00 (3 visitas técnicas)	---
3	UMA Aero 39MW-17W	\$42.000,00	\$600,00 (2 visitas técnicas)	---
1	Alfa Laval AQ1L	\$7.500,00	\$200,00 (1 visita técnica)	---
1	Grupo electrógeno LG200C	\$30.000,00	\$1.000,00 (2 visitas técnicas)	\$151.455,14 (Gasóleo)
TOTAL		\$271.500,00	\$3.000,00	\$151.455,14

Fuente: [Elaboración propia].

Cabe mencionar, por concepto de generación eléctrica, existió un excedente estimado de 1538,03 GWh lo que representaría para la empresa un ingreso anual de \$117.197,89 por venta de electricidad al Sistema Nacional Interconectado.

Por otra parte, de la Matriz Financiera, tabulada en el Apéndice D, se determinó un **VAN** de **\$7525,50** y **TIR** de **11%**. Lo que implicaría una situación singular, ya que la inversión podría llevarse a cabo bajo condiciones mayormente favorables.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo es parte de un esfuerzo personal por impulsar nuevas alternativas tecnológicas que utilicen apropiadamente los limitados recursos disponibles. Su desarrollo marca un precedente en cuanto a la situación actual del país en términos energéticos y económicos, sirviendo como referente para la implementación de futuras plantas de trigeneración en el sector terciario. Además, al alinearse con el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035, que impulsa el gobierno central, se espera su masiva exploración y ejecución por su alto potencial técnico.

Por otro lado, es fundamental reconocer en profundidad las principales limitantes que se han presentado en el transcurso. Entre ellas destacan los exorbitantes gastos tributarios propios de las importaciones, como impuestos aduaneros y aranceles, la carencia de un marco normativo generalizado para el desarrollo de un mercado ecuatoriano de empresas de servicios energéticos, la limitada cantidad de personal técnico cualificado para el mantenimiento de los componentes más sensibles y el elevado costo inicial de inversión e insuficientes líneas de crédito nacionales que permitan reducir el riesgo y otorgar tasas de interés accesibles.

No obstante, la debilidad más arraiga con el éxito del proyecto radica en su exposición a factores externos gubernamentales que pueden debilitar o favorecer la viabilidad de éste, como, por ejemplo: el retiro o no del subsidio al diésel, la explotación a gran escala de gas natural y el valor regulado de comercialización del kilovatio-hora en el Sistema Nacional Interconectado.

La tecnología implementada en la planta de trigeneración reveló un notable aprovechamiento de recursos, dado que a partir de una única fuente primaria combustible fósil se destacó un rendimiento térmico global superior al 83%. Mismo que desglosado representó una eficiencia térmica del 30%, por concepto de generación de frío a partir del calor residual de los gases de escape del motor de combustión interna a diésel, y de 18%, por concepto de calentamiento de agua sanitaria a partir del intercambio de calor con el circuito de refrigeración del MCI.

También, se observó una eficiencia eléctrica del 36% suficiente como para abastecer la demanda interna de electricidad del complejo hotelero e inclusive generar un excedente para la venta a la red eléctrica nacional que beneficia sustancialmente las arcas de la empresa; y finalmente pérdidas acumuladas por radiación y fricción entre componentes mecánicos del 16%, valor que en comparación con las pérdidas del sistema línea base se encontró por debajo.

4.1 Conclusiones

Se estimó en 76 TRF y 92 BHP la carga térmica por concepto de climatización y calentamiento de agua sanitaria, respectivamente. También, se calculó una demanda eléctrica por concepto de iluminación y equipamiento igual a 485,5 kWh de electricidad requerida por el complejo hotelero durante un día de operaciones, el más crítico del año.

Se simuló computacionalmente el comportamiento energético del sistema línea base establecido por el cliente y del sistema de trigeneración propuesto a partir del proceso de diseño por selección. Donde se consideró los parámetros de modelación acorde a la normativa técnica vigente para edificios comerciales y las condiciones ambientales propias de la ciudad de Santo Domingo.

Se analizó en términos energéticos los sistemas en su conjunto teniendo como resultados un rendimiento térmico global superior al 83,3% para la planta de trigeneración, mientras para el circuito convencional de agua caliente un rendimiento de caldera únicamente del 92%.

Se estudió la viabilidad técnica del proyecto mediante simulación energética destacando los principales beneficios al adoptar una gestión de enfoque sistemático que buscar consumir la energía inteligentemente. Por otro lado, de la estimación de costos a largo plazo, se determinó en 11,4 centavos de dólar americano el costo mínimo de comercialización del kWh producido por el sistema de trigeneración para que éste sea rentable, no obstante, en caso de eliminación total del subsidio al diésel, éste ascendería a los 19,8 centavos.

4.2 Recomendaciones

Se sugiere no sobredimensionar los equipos más allá del 15%, ya que puede ser contraproducente e incurriría en gasto desmedido de energía y despilfarro económico. No obstante, este sistema de trigeneración es aplicable a mediana desde potencias nominales superiores a 250 kW en motores de combustión interna y enfriadoras de absorción mayores a 80 TRF.

Se recomienda evaluar medidas energéticas alternativas que puedan ser implementadas en el complejo hotelero antes de su construcción con el fin de aportarle un ahorro de energía extra a la empresa. Mismo que debe ser analizado en términos energéticos y económicos.

Se avizora la imperiosa necesidad de reformar las políticas energéticas y construir un marco jurídico-institucional que permita migrar oportunamente a tecnologías sustentables que logren maximizar el beneficio de los recursos, y el flujo de la energía dentro de los procesos productivos.

Se resalta que esta práctica de establecerse como política de Estado de largo plazo facilitaría el desarrollo de instrumentos financieros que impulsen a cada vez más industrias a participar bajo líneas de crédito como Fondos Semilla, Fondos de Donación, Fondos de Cooperación Técnica no Reembolsable, Fondos de Garantías de eficiencia energética e inclusive Fondos de Inversión Extranjera.

BIBLIOGRAFÍA

- AC&CC Ingeniería. (2018). ¿Cómo calculo la capacidad del aire acondicionado que necesito? Bogotá, Colombia.
- AHRI. (2000). AHRI Standard 560-2000. Arlington, USA.
- Alfa Laval. (2019). Heat exchanger AQ1L. Suecia.
- ARCONEL. (2016). *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano*. Quito: Ecuador.
- ARCONEL. (2019). Pliego Tarifario para las Empresas Eléctricas de Distribución Codificado. *Resolución*. Quito, Ecuador.
- ASHRAE. (2008). *Handbook HVAC-Systems and Equipment*. Atlanta, USA.
- BP p.l.c. (2019). *BP Statistical Review of World Energy*. London.
- Carrier Corp. (2017). Product Data: Catalog No: 50TC-18-29-H-03PD. USA.
- Carrier Corp. (2019). Product Data: Aero Outdoor Air Handlers. USA.
- Chicco, G., & Mancarella, P. (2009). Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization. *Energy*, 261-273.
- CONUEE. (2013). *Micro y pequeña cogeneración y trigeneración en México*. México, D. F.: Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.
- Corominas, F. P. (s/a). El ciclo de refrigeración por absorción. Aplicaciones solares. *Diapositivas*. Barcelona, España.
- Cullen, J. M., & Allwood, J. M. (2010). The efficient use of energy: Tracing the global flow of energy from fuel. *Energy Policy*, 75-81.
- El Universo. (2019). Precios de extra y diésel sin subsidio estarán en vigencia desde el 3 de octubre de 2019. *Diario El Universo*. Recuperado el 22 de enero de 2020
- Espinoza, J. (2017). *Estudio del potencial de cogeneración y trigeneración en el Ecuador*. CELEC EP, Cuenca.
- FAEN. (2006). *Cogeneración de pequeña potencia*. España: Fundación Asturiana de la Energía.
- Fernández, C. (s/a). La cogeneración y los MCI: Diseño de plantas de cogeneración y fundamentos tecnológicos. *Diapositivas*.
- Fernández, M., Huante, L., & Romo, C. (2006). Sistemas de cogeneración. *Boletín U.E.*, 67-72.

- Flores, R., & Dibene, L. (2012). *Enfriamiento evaporativo con desecante, estado del arte*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados., Jalisco.
- García, S., & Fraile, D. (2008). *Diseño, Operación y Mantenimiento de Plantas de Cogeneración*. Madrid, España: Díaz de Santos.
- Gómez, D. (2005). *Diseño del colector de gases de escape de una planta de cogeneración*. Barcelona: UPC.
- Guo, W. (2009). *The state of the art of tri-generation and its application in tertiary sector*. Italy: Institute for Promotion of Innovative Technologies.
- Henning, H., Hindenburg, C., & Santamaria, I. (2001). The potential of solar energy use in desiccant cooling cycles. 24, 220–229. International Journal of refrigeration.
- IEA. (2008). *Combined Heat and Power: Evaluating the benefits of greater global investment*, Digital. Recuperado el 30 de octubre de 2019, de http://www.iea.org/papers/2008/chp_report.pdf
- IEA. (2018). *Global Energy & CO2 Status Report*. Recuperado el 20 de octubre de 2019, de <https://www.iea.org/geco/>
- Lozano, M. (2003). *Síntesis de Sistemas de Cogeneración: Fundamentos y aplicaciones*. España: Área de Máquinas y Motores Térmicos.
- Merkel, A. (2020). *Climate-Data.org*. Recuperado el 12 de 1 de 2020, de AM Online Projects: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-de-santo-domingo-de-los-tsachilas/santo-domingo-de-los-tsachilas-2979/>
- Onis Visa S.p.A. (2019). Power Generators - P251B. Italia.
- Opex Energy. (2009). *Ciclos Combinados*. (Renovetec, Editor) Recuperado el 7 de noviembre de 2019, de <http://www.cicloscombinados.com/cogeneracion.html>
- Pereyra, J. J. (2019). Mejorando el desempeño de los edificios. *Siemens AG*, 8.
- Perkins Engines Co. Ltd. (mayo de 2015). 1500 Series Datasheet: TPD1951-02. Peterborough, Reino Unido.
- World Energy Corp. (2019). World Energy Absorption Chillers Europe. Dublin, Ireland.
- YGNIS AG. (2016). Instrucciones de instalación y mantenimiento: LRP NT plus. Ruswil, Suiza.

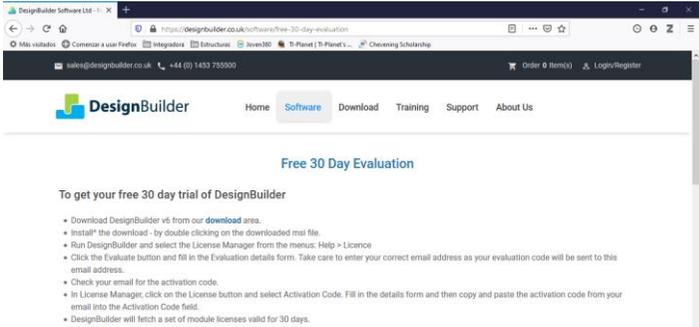
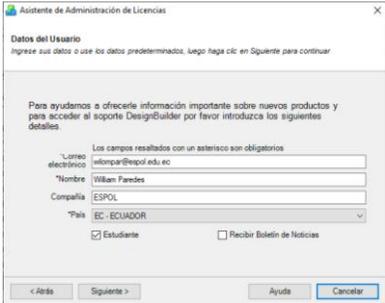
APÉNDICES

APÉNDICE A

Guía de Simulación Energética

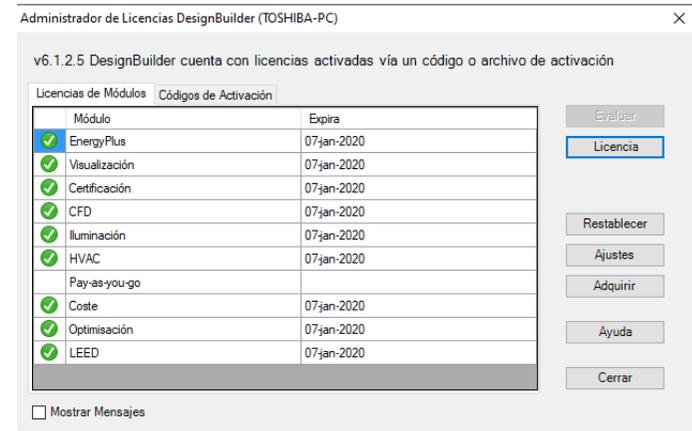
A continuación, se muestra los pasos a seguir para desarrollar la simulación energética desde la etapa inicial. El *software* utilizado correspondió a *DesignBuilder®*, en versión 6.1.2.005, con motor de cálculo de *EnergyPlus V8.9*.

a. Configuración inicial

Actividad	Descripción	Referencia
Código de Activación	<ul style="list-style-type: none">Solicitar la versión de prueba gratuita, por 30 días, en la siguiente página web: https://designbuilder.co.uk/software/free-30-day-evaluation	
Datos de Usuario	<ul style="list-style-type: none">Registrar los datos suministrados al correo electrónico para la activación de la licencia.(Ayuda>>Licencia...>>Evaluar>>Código de Activación>>Siguiete>>Datos de Usuario>>Siguiete>>Seleccionar Código>>Siguiete>>Finalizar)	

Asistente de Administración de Licencias

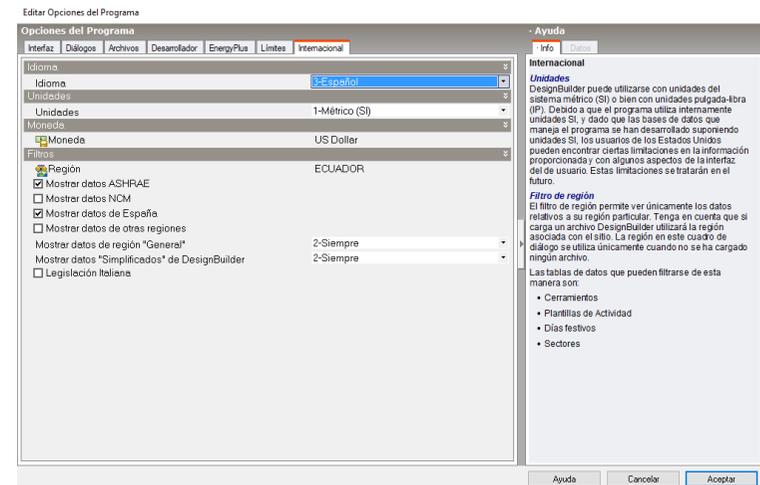
- Verificar que la licencia estudiantil se encuentre activa.
- Visitar el Asistente de Administración de Licencias: *(Ayuda>>Licencia...)*

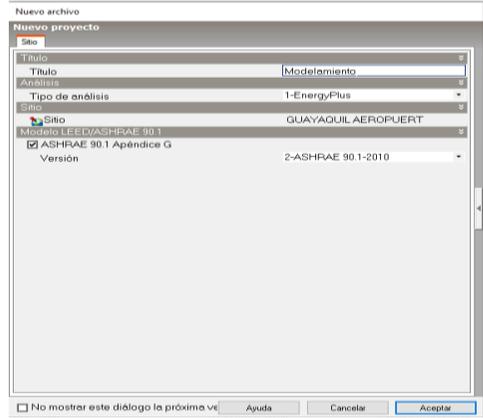
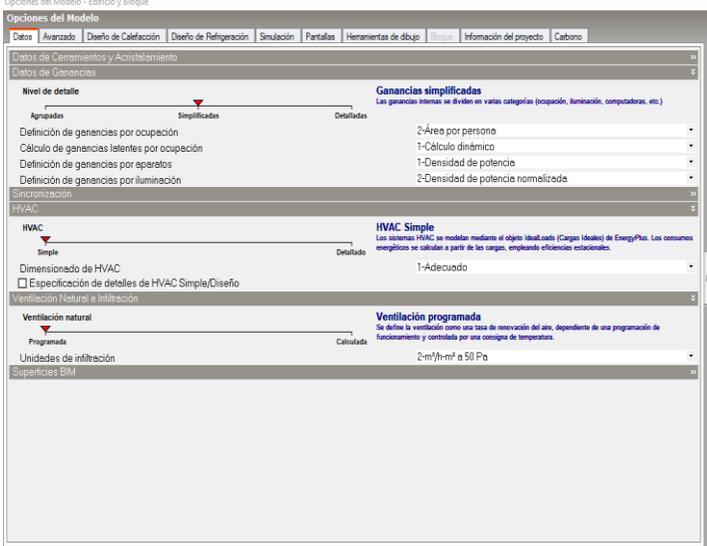


Opciones del Programa

Configurar la interfaz del programa de acuerdo con las siguientes preferencias: *(Herramientas>>Opciones del programa...>>Aceptar)*

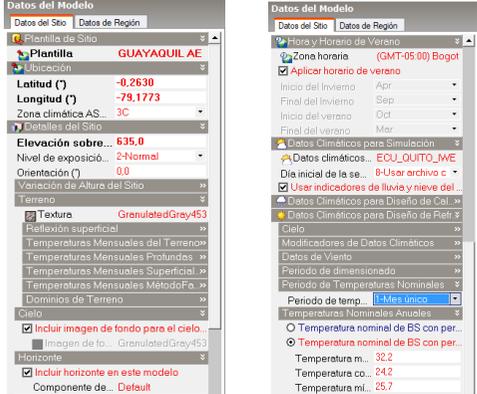
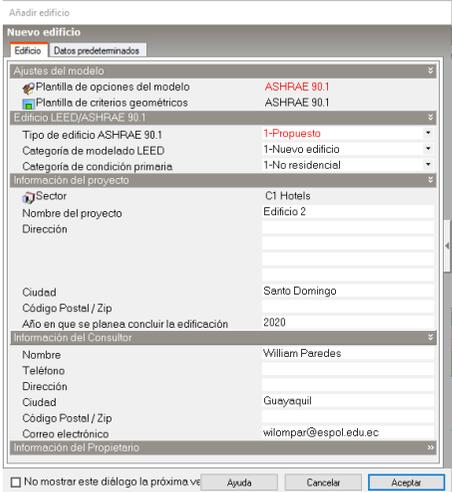
- **Interfaz:** Desactivar casilla “Modo aprendizaje”, Activar casillas “Ordenar listas”, “Suavizado de líneas”, “Actualizar automáticamente el Árbol del modelo”
- **Diálogos:** Desactivar casilla “Diseño de calefacción”, Destino predeterminado de informes-Añadir a informe.
- **Archivos:** Activar casilla “Copias de seguridad automáticas”, Intervalo-8 [min].
- **Internacional:** Idioma-Español, Unidades-Métrico, Moneda-US Dollar, Región-ECUADOR, Activar casilla “Mostrar datos ASHRAE”.

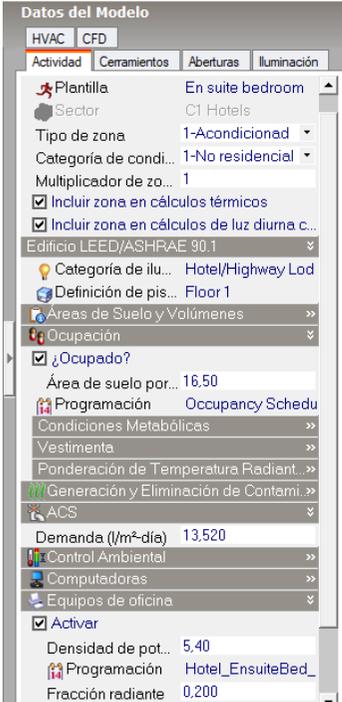
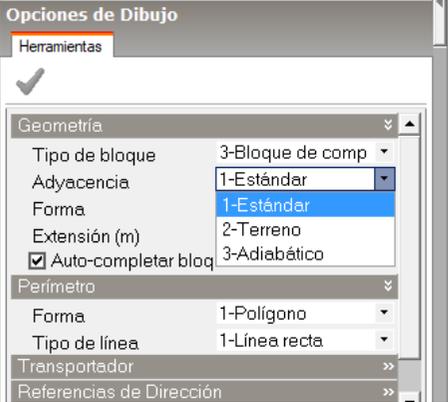


<p>Nuevo Proyecto</p>	<p>Configurar el archivo de acuerdo con las siguientes preferencias: <i>(Archivo>>Nuevo Archivo>>Aceptar)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sitio: Título-*Modelación*, Sitio Climático-Guayaquil, Activar casilla “ASHRAE 90.1 Apéndice G”, Versión-2010. 	
<p>Opciones del modelo</p>	<p>Configurar el modelo de acuerdo con las siguientes preferencias de diseño: <i>(Editar>>Opciones del modelo>>)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Datos: Cerramientos y Acristalamiento-Método General, Ganancias-Simplificadas (Ganancias por ocupación=área por persona, Ganancias latentes=cálculo dinámico, Ganancias por aparatos=densidad de potencia, Ganancias por iluminación- densidad de potencia), HVAC-Simple, Ventilación e infiltración-Programada. • Pantallas: Vista dinámica-Esquemática, Tamaño etiqueta-Mediana, Activar casillas “Mostrar muros exteriores y ventana” • Herramientas de dibujo: Activar todas las casillas de “Referencias de puntos” y “Guías de Dibujo”. 	

Fuente: [Elaboración propia].

b. Modelado del edificio

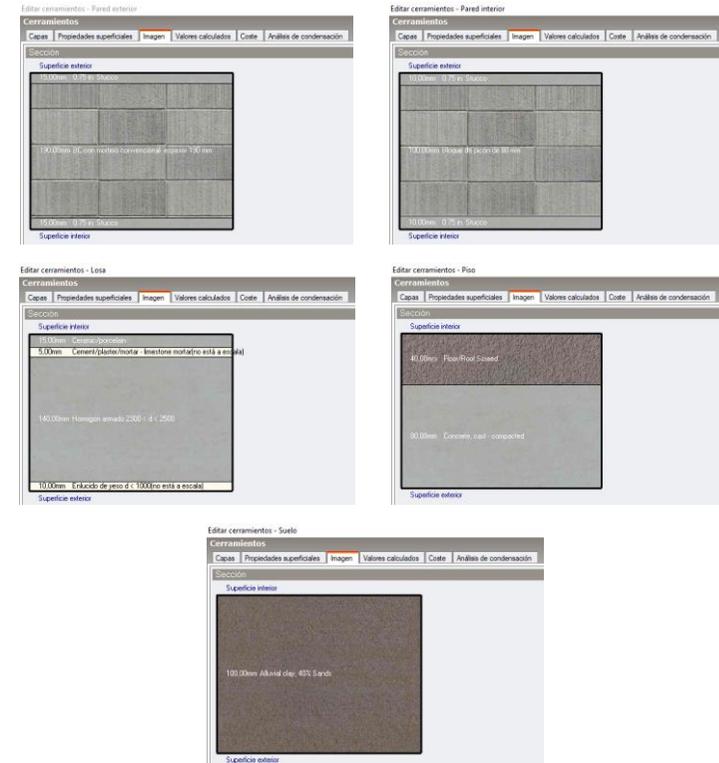
Actividad	Descripción	Referencia
<p>Datos del proyecto</p>	<p>Configurar la plantilla de acuerdo con las condiciones geográficas de la ciudad de Santo Domingo: <i>(Datos del sitio)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ubicación: Latitud=-0.2630 y Longitud=-79.1773. • Detalles del sitio: Elevación=635 [m.s.n.m.], Textura-Granulated Gray, Activar casillas “Cielo” y “Horizonte”, Temperatura del agua de la red=15 [°C]. • Hora: Zona horaria=(GMT-05:00) Bogotá, Lima, Quito. 	
<p>Añadir edificio</p>	<p>Seleccionar el ícono , y especificar las características primarias de la edificación.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Edificio ASHRAE 90.1: Tipo de edificio-Propuesto, Modelado LEED-Nuevo edificio, Condición primaria-No residencial. • Información del proyecto: Sector-C1 Hotels, Nombre del proyecto-Complejo Hotelero, Ciudad-Santo Domingo, Año-2020. • Información del consultor: Nombre-William Paredes, Ciudad-Guayaquil, Correo-wilompar@espol.edu.ec. 	

<p>Dibujar bloque de edificio</p>	<p>Seleccionar el ícono , y especificar las características de la zona. En particular, esta configuración se asignó a las habitaciones y la gerencia.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plantilla de actividad: En suite bedroom, tipo-acondionada. • Ocupación: Densidad=16,5 [m²/persona], Programación-Bedroom occupancy schedule, Tasa metabolismo-Bedroom. • ACS: Demanda=13,52 [L/m²-día]. • Temp. para refrigeración: Temperatura=25 [°C]. • Equipos: Densidad de equipos=5,40 [W/m²]. • Iluminación: Plantilla-Building area method=9,5 [W/m²]. <p>*Se recomienda crear un bloque por cada piso o zona térmica del edificio.</p>	
<p>Dibujar bloque de componente</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se recomienda para la creación de zonas adiabáticas que otorgan sombra y no requieren climatización. En particular, para establecer la bodega y escaleras de escape. Se representa con una capa de 0,140 [m] de BC con mortero aislante. (Gráficamente vista de color morado). • También para delimitar los patios como áreas de ingreso al parqueadero. Se representa con una capa de 0,170 [m] de asfalto. (Gráficamente de color verde). 	

Cerramientos

Configurar las plantillas de acuerdo con las especificaciones establecidas por el cliente. Las capas están representadas por su espesor desde la más externa hasta la más interna.

- **Pared exterior:** No. de Capas=3, C1=0,015 [m] de stucco, C2=0,190 [m] de BC con mortero convencional, C3=0,015 [m] de stucco.
- **Pared interior:** No. de Capas=3, C1=0,010 [m] de stucco, C2=0,100 [m] de bloque de picón, C3=0,010 [m] de stucco.
- **Losa:** No. de Capas=4, C1=0,010 [m] de enlucido de yeso, C2=0,140 [m] de hormigón armado, C3=0,005 [m] de limestone mortar, C4=0,015 [m] de cerámica.
- **Piso:** No. de Capas=2, C1=0,080 [m] de concreto compactado, C2=0,040 [m] de acabado.
- **Suelo:** No. de Capas=1, C1=0,100 [m] de arcilla.



Iluminación

Configurar el sistema general de iluminación de la siguiente manera:

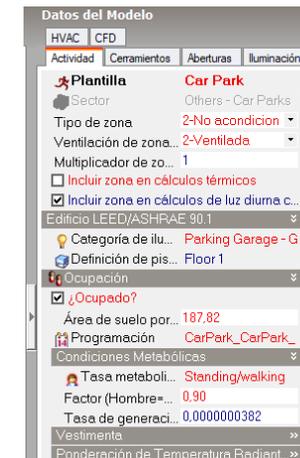
- **Método:** espacio-por-espacio.
- **Programación:** *Lighting Schedule*.
- **Tipo de luminaria:** Empotrada.
- **Fracción Radiante:** 0,370.

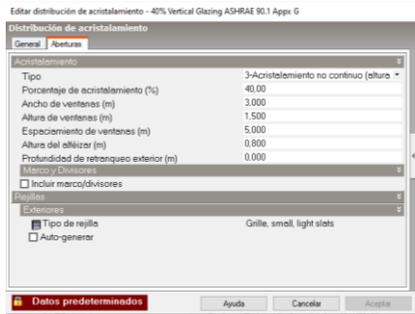
```
Perfiles
Schedule:Compact
Hotel_EnsuiteBed_Light
Fraction, Through: 31 Dec,
For: Weekdays SummerDesignDay,
Until: 03:00, 0,
Until: 07:00, 1,
Until: 08:00, 0,
Until: 11:00, 1,
Until: 15:00, 0,
Until: 19:00, 1,
Until: 23:00, 0,
Until: 24:00, 1,
```

Bloques
diferenciados

Configurar la zona del edificio con las especificaciones establecidas de acuerdo con su actividad. En particular, tenemos:

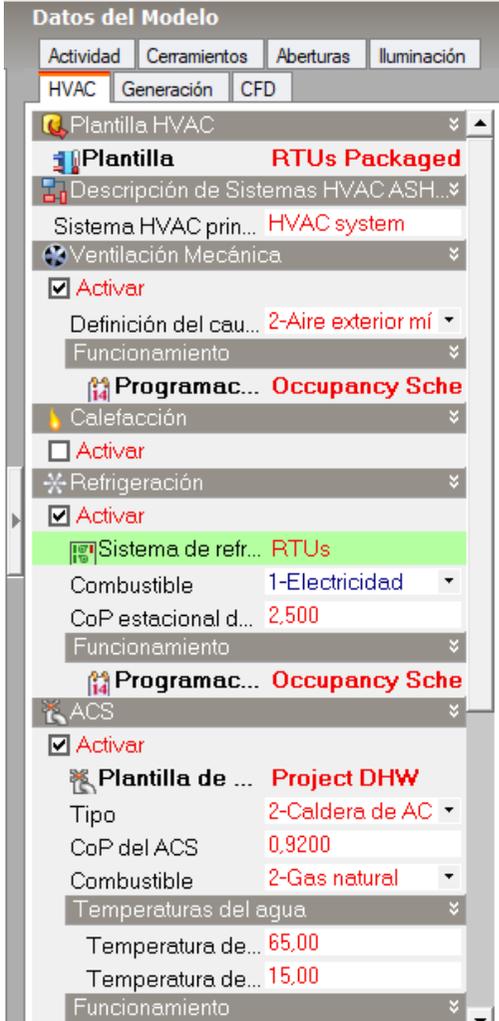
- **Cocina:** Plantilla-Food preparation, Tipo de zona-Acondicionada, Categoría-No residencial, Iluminación-Dining Area, Densidad de ocupación=8,20 [m²/persona], Tasa metabolismo-Light manual work, Demanda ACS=21,28 [L/m²-día], Equipos-densidad de potencia=42,24 [W/m²].
- **Pasillos:** Plantilla-Circulation area, Tipo de zona-Acondicionada, Categoría-No residencial, Iluminación-Corridor/Transition, Densidad de ocupación=8,20 [m²/persona], Tasa metabolismo- Standing/Walking, Equipos-densidad de potencia=2,00 [W/m²].
- **Parqueaderos:** Plantilla-Car Park, Tipo de zona-No acondicionada, Ventilación de zona-Ventilada, Iluminación-Parking Garage, Densidad de ocupación=187,82 [m²/persona], Tasa metabolismo-Standing/Walking.



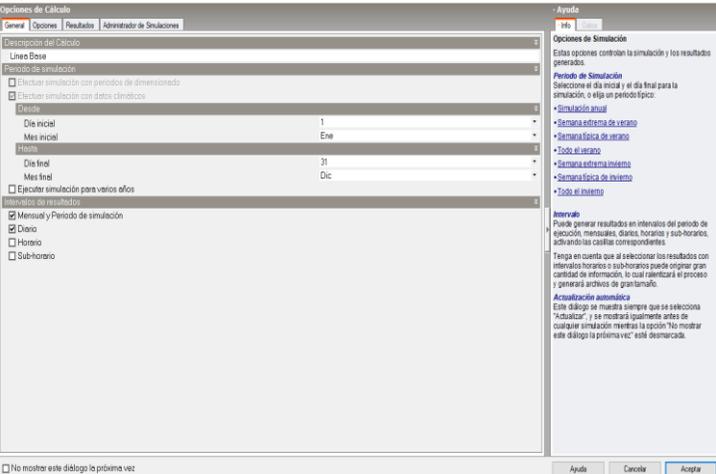
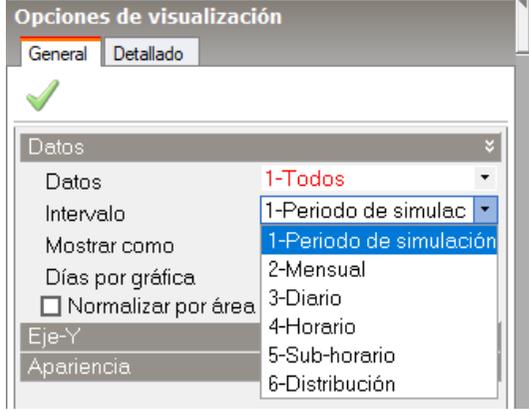
<p>Cubiertas</p>	<p>Seleccionar el ícono , y especificar las características del techo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plantilla: Ninguna. • Tipo de zona: No acondicionada. • Ventilación de zona: No ventilada. • Iluminación: No Lighting. <p>También, se debe especificar su composición y espesores.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capa externa: Tile, Terracota de 0,025 [m]. • Capa intermedia: Entrehierro (air gap) de 0,160 [m]. • Capa interna: Enlucido de gypsum de 0,015 [m]. 	
<p>Accesorios secundarios del modelo</p>	<p>Configurar las plantillas de acuerdo con las especificaciones establecidas por el cliente. Las capas están representadas por su espesor desde la más externa hasta la más interna.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ventana: 40% vertical glazing ASHRAE 90.1 Appx. G, dimensiones=3,00 [m] de ancho por 1,50 [m] de alto. • Puerta: Capa=0,0350 [m] de plywood, dimensiones=1,10 [m] de ancho por 2,00 [m] de alto. <p>*En este caso particular, se diseñó una única puerta y ventana modelo que sirvió de referencia para todo el modelado.</p>	 

Fuente: [Elaboración propia].

c. Simulación: Línea Base

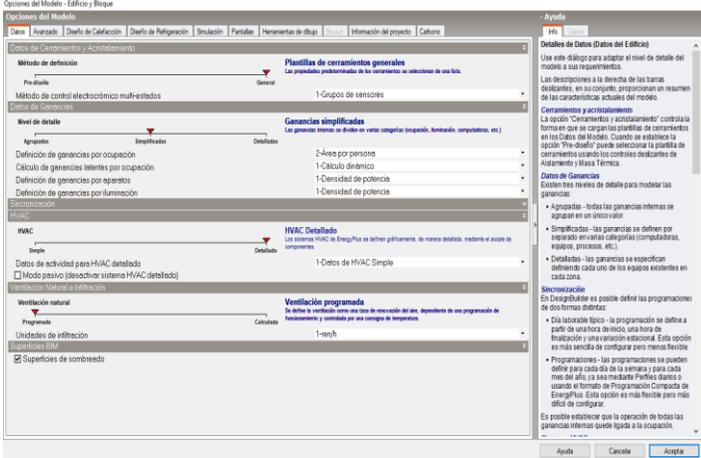
Actividad	Descripción	Referencia
HVAC	<p>A nivel de edificio, dentro del árbol del modelo, seleccionar la pestaña “Datos del Modelo”, luego, seleccionar la plantilla HVAC.</p> <p>Su configuración se realiza de acuerdo con las especificaciones establecidas por la ficha técnica proveída.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plantilla: Packaged DX. • Ventilación mecánica: Definición de caudal-Aire exterior mínimo (por persona + por área), Funcionamiento-Occupancy Schedule. • Refrigeración: Sistema-Multisplit system, Combustible-Electricidad, CoP estacional=2,500, Funcionamiento-Occupancy Schedule. • ACS: Tipo-Caldera de ACS, CoP=0,920, Combustible-Gasoil, Temp. final=65 [°C]. Funcionamiento-Occupancy Schedule. • Ventilación natural: Definición de caudal-Por zona, Aire exterior=5,00 [ren/h]. Funcionamiento-Occupancy Schedule. <p>*Occupancy Schedule se programó de la siguiente manera:</p> <pre data-bbox="689 1134 1034 1406"> Perfiles Schedule:Compact, Hotel_EnsuiteBed_Occ, Fraction, Through: 31 Dec, For: Weekdays SummerDesignDay, Until: 06:00, 1, Until: 08:00, 0.25, Until: 14:00, 1, Until: 16:00, 0.25, Until: 22:00, 1, Until: 24:00, 0.25, </pre>	

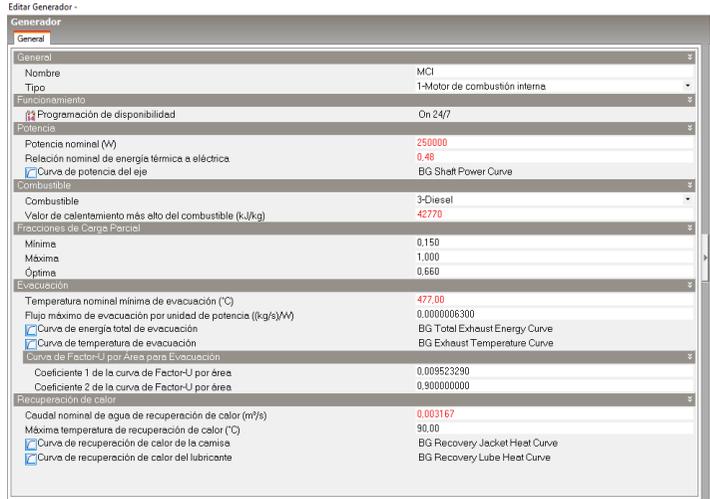
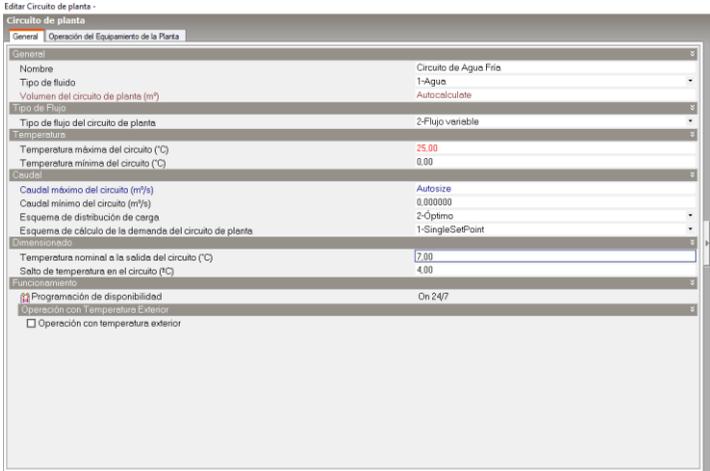
<p>Diseño de Refrigeración</p>	<p>Configurar la opción de simulación del sistema de climatización para el caso crítico, con respecto a las consideraciones aquí presentadas: <i>(Diseño de refrigeración>>Actualizar cálculos>>...>>Aceptar)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Descripción: Línea Base. • Opciones: Método-Energyplus, Tipo de temperatura-Del aire. • Día de Diseño: Según la información climatológica recogida. (Día=24, Mes=Abr., Tipo=SummerDesignDay) • Dimensionado: Coeficiente de seguridad=1,15, Método de dimensionamiento-ASHRAE, Método de cálculo de caudal-Sensible+Latente. • Resultados: Activar la casilla “Almacenar resultados de superficie”. 	
<p>Opciones de visualización</p>	<p>Con la finalidad de optimizar la búsqueda de información en los resultados simulados, se recomienda variar la siguiente información a conveniencia particular.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Datos: Alterna entre “Todos”, “Datos climáticos”, “Confort”, “Ganancias internas”, “Cerramientos y ventilación”. • Mostrar como: Alterna entre “Gráfica”, “Datos en celda”, “Gráfica y tabla” y “Tabla”. • Eje Y: Activar casilla “Separar ejes”. <p>*Se sugiere activar la casilla “Normalizar” en caso de requerir parametrizar con respecto al área total ocupada.</p>	

<p>Simulación</p>	<p>Configurar las opciones de simulación energética con respecto a las consideraciones aquí presentadas:</p> <p style="text-align: center;"><i>(Simulación>>Actualizar cálculos>>...>>Aceptar)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • General: Periodo de simulación-1 ene a 31 dic. • Opciones: Algoritmo solución-Función de transferencia por conducción, Método de diferencias finitas-<i>Fully implicit first order</i>, Algoritmo convección: Interna=TARP y Externa=Doe-2. • Resultados: Activar la casilla “Datos de zonas en edificios y bloques”, Energía=Ganancias internas y solares, cargas y consumo HVAC y cargas latentes, Tablas de resumen- Unidad=kWh, Activa la casilla “All summary”. • Administrador de simulaciones: Activar la casilla “Usar administrador de simulaciones” para manipular la información. 	
<p>Opciones de visualización</p>	<p>Para optimizar la búsqueda de información sobre los resultados simulados, se recomienda variar la siguiente información.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Datos: Alterna entre “Todos”, “Datos climáticos”, “Confort”, “Ganancias internas”, “Cerramientos/Ventilación”, “Consumos desglosados”, “Consumos totales”, “Emisiones de CO₂”. • Intervalo: Alterna entre “Periodo de simulación”, “Mensual”, “Diario”, “Horario”, etc. • Mostrar como: Alterna entre “Gráfica”, “Datos en celda”, “Gráfica y tabla” y “Tabla”. 	

Fuente: [Elaboración propia].

d. Simulación: Sistema de Trigeneración

Actividad	Descripción	Referencia
<p>Plantilla HVAC detallado</p>	<p>Para activar el diseño detallado del sistema HVAC se debe seleccionar el ícono  y modificar las opciones del modelo como sigue:</p> <ul style="list-style-type: none"> • HVAC: Detallado. • Datos de actividad: Datos de HVAC Simple. • Modo pasivo: Desactivado. 	
<p>Circuito Agua Caliente</p>	<p>Para añadir el circuito a la plantilla se debe seleccionar el ícono  y escoger “Añadir Circuito de Planta de Agua Caliente”. Luego, seleccionar “Editar datos de circuito” y realizar la siguiente configuración:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de fluido: Agua. • Tipo de flujo: Flujo variable. • Temp. máx. del circuito: 200 °C. • Caudal máx del circuito: Autosize. • Esquema: Óptimo. • Temp. nominal a salida: 90 °C. 	

<p>Generador (MCI)</p>	<p>Para añadir un generador al circuito, se selecciona el ícono . Luego, se escoge “Editar componente” y se realiza la siguiente configuración:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipo: Motor de combustión interna. • Potencia nominal: 250000 W. • Relación nominal: 0,480 → *De energía térmica a eléctrica* • Combustible: Diesel. • Energía calorífica: 42770 kJ/kg. • Temp. mín. evacuación: 477 °C. • Caudal agua recuperación: 0,003167 m³/s. • Temp. recuperación calor: 90 °C. 	
<p>Circuito de Agua Fría</p>	<p>Para añadir el circuito a la plantilla se debe seleccionar el ícono  y escoger “Añadir Circuito de Planta de Agua Fría”. Luego, seleccionar “Editar datos de circuito” y realizar la siguiente configuración:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de fluido: Agua. • Tipo de flujo: Flujo variable. • Temp. máx. del circuito: 25 °C. • Caudal máx del circuito: Autosize. • Esquema: Óptimo. • Temp. nominal a salida: 7 °C. 	

Enfriadora

Para modificar la configuración del componente se selecciona “Editar componente” y se realiza lo siguiente:

- **Plantilla:** EnergyPlus Absorption Chiller.
- **Capacidad nominal:** Autosize.
- **Potencia nominal de bombeo:** 250,0 W.
- **Modo de regulación caudal:** No regulado.
- **Tipo de Condensador:** Enfriamiento con agua.
 - *Temp. entrante: 30 °C.
 - *Caudal entrante: Autosize.
- **Caudal nom. agua fría:** Autosize.
- **Caudal nom. agua caliente:** Autosize.

Circuito de Condensación

Para añadir el circuito a la plantilla se debe seleccionar el ícono  y escoger “Añadir Circuito de Condensación”. Luego, seleccionar “Editar datos de circuito” y realizar la siguiente configuración:

- **Tipo de fluido:** Agua.
- **Tipo de flujo:** Flujo variable.
- **Temp. máx. del circuito:** 50 °C.
- **Caudal máx del circuito:** Autosize.
- **Esquema:** Óptimo.
- **Temp. nominal a la salida:** 32 °C.

Torre de enfriamiento

Para modificar la configuración del componente se selecciona “Editar componente” y se realiza lo siguiente:

- **Tipo de torre:** Una velocidad.
- **Caudal nom. aire:** Autosize.
- **Potencia ventilador:** Autosize.
- **Método def. rendimiento:** Capacidad nominal.
- **Capacidad nominal:** 100000,0 W.
- **Temp. entrada aire:** 35 °C.
- **Modo de purga:** Proporción de concentración.
- **Control capacidad:** Ciclado del ventilador.

Circuito de Aire

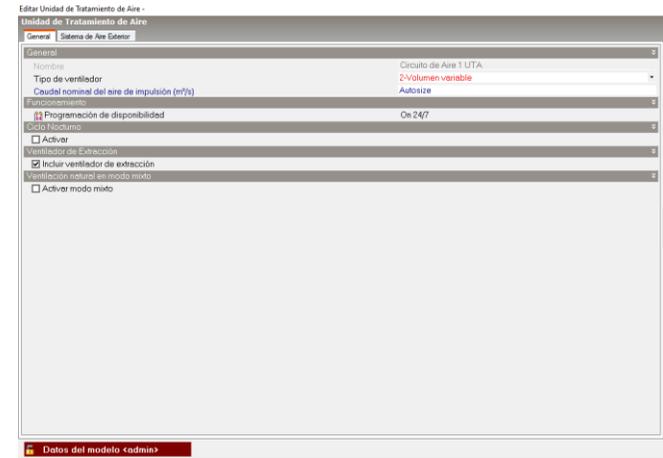
Para añadir el circuito a la plantilla se debe seleccionar el ícono  y escoger “Añadir Circuito de Aire Genérico”. Luego, seleccionar “Editar datos de circuito” y realizar la siguiente configuración:

- **Caudal aire exterior:** Autosize.
- **Opc. dimensionamiento:** Coincidente.
- **Tipo de carga:** Sensible.
- **Método de aire exterior:** Procedimiento de tasa ventilada.
- **Temp. nominal precalentamiento:** 20 °C.
- **Método caudal de aire para refrigeración:** Día de Diseño.

UTAs

Para modificar la configuración del componente se selecciona “Editar componente” y se realiza lo siguiente:

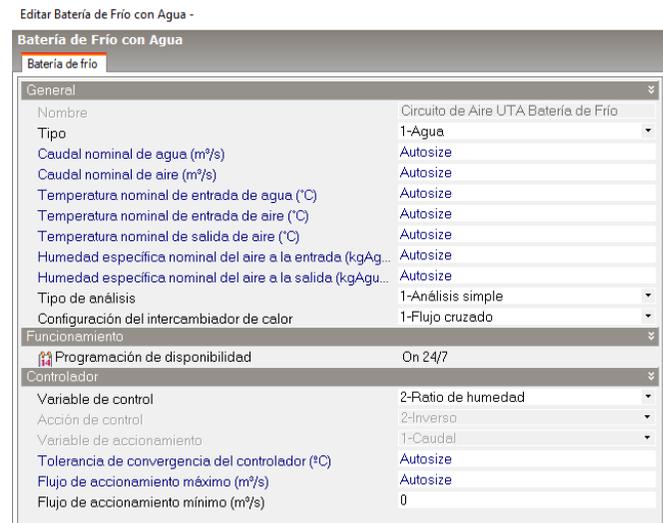
- **Tipo de ventilador:** Volumen variable.
- **Caudal nom. aire impulsión:** Autosize.
- **Programación:** On 24/7.
- **Recirculación:** Activado.
- **Ventilador de extracción:** Incluido.
- **Ventilación controlada por demanda:** Método de tasa de ventilación (VRP).



Batería de frío

Para modificar la configuración del componente se selecciona “Editar componente” y se realiza lo siguiente:

- **Tipo:** Agua.
- **Caudal nom. agua:** Autosize.
- **Caudal nom. aire:** Autosize.
- **Temp. entrada agua:** Autosize.
- **Temp. entrada aire:** Autosize.
- **Temp. salida aire:** Autosize.
- **Tipo de análisis:** Analisis simple.
- **Conf. Intercambiador de calor:** Flujo cruzado.
- **Variable de control:** Ratio de humedad.

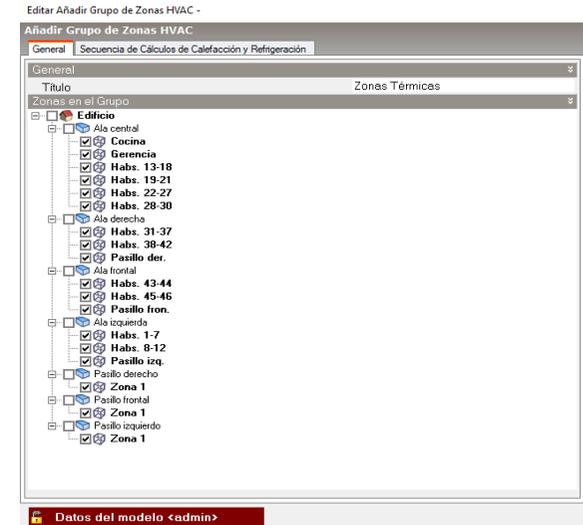


Zonas Térmicas

Se debe seleccionar todas aquellas zonas a ser climatizadas. Luego, se configura un cuarto modelo a las condiciones de confort deseadas, seleccionando “Editar zona HVAC”, como sigue:

- **Método de impulsión:** Temperatura del aire de impulsión.
- **Temp. de refrigeración:** 25 °C.
- **Ratio de humedad:** 0,009.
- **Factor de dimensionado:** 1,150.

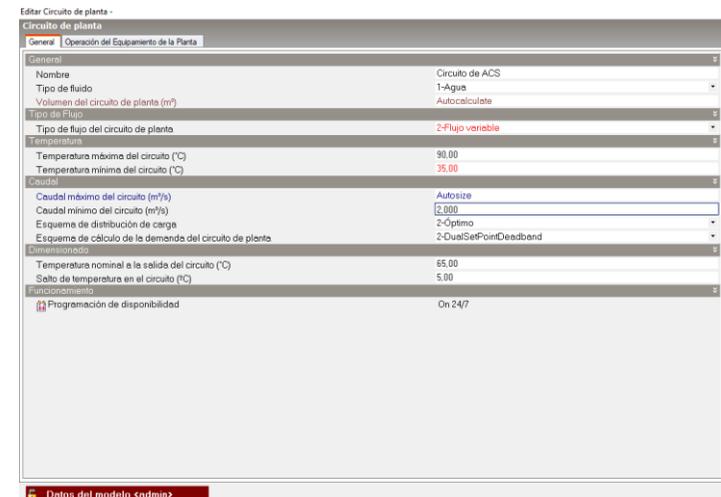
*Recordar añadir las unidades de distribución de aire climatizado.

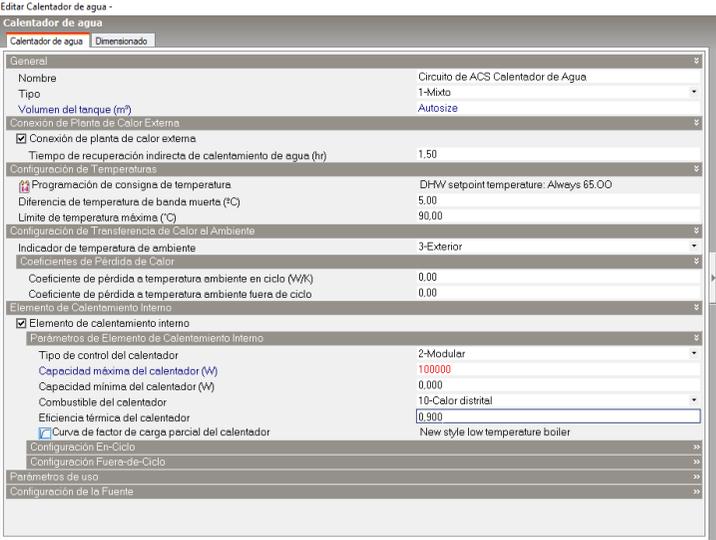
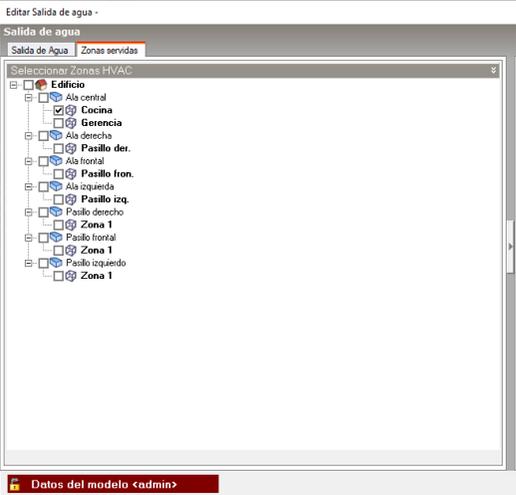


Circuito de ACS

Para añadir el circuito a la plantilla se debe seleccionar el ícono  y escoger “Añadir Circuito de ACS”. Luego, seleccionar “Editar datos de circuito” y realizar la siguiente configuración:

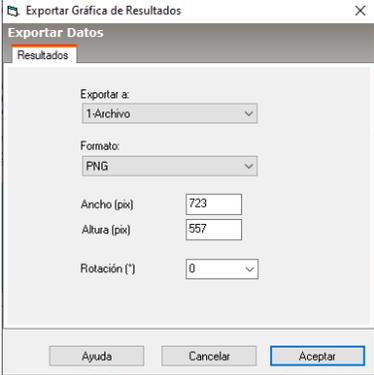
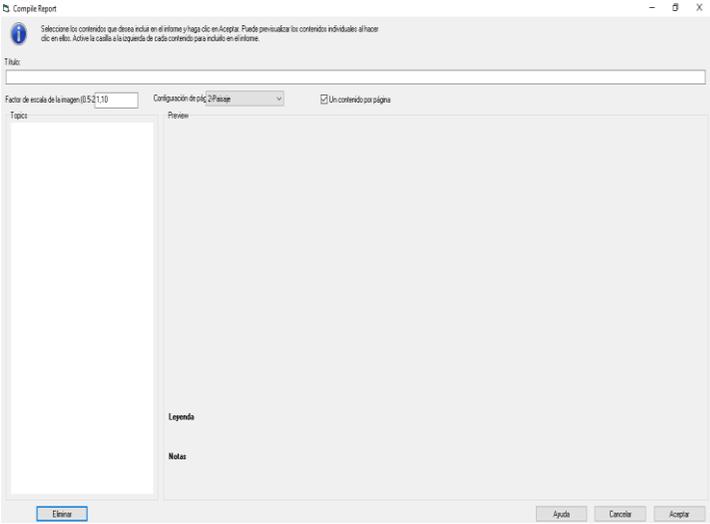
- **Tipo de fluido:** Agua.
- **Tipo de flujo:** Flujo variable.
- **Temp. máx. del circuito:** 90 °C.
- **Caudal máx del circuito:** 2,00 m³/s.
- **Esquema:** Óptimo.
- **Temp. nominal a la salida:** 65 °C.



<p>Calentador de agua</p>	<p>Para modificar la configuración del componente se selecciona “Editar componente” y se realiza lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipo: Mixto. • Volumen tanque: Autosize. • Activar casilla “fuente de calor externa”: • Consigna de temperatura: 65 °C. • Límite de temp. máxima: 90 °C. • Calentamiento interno: Activado. • Tipo de control: Modular. • Capacidad Máxima: 100000 W. • Combustible calentador: Calor distral. • Eficiencia térmica: 0,90. 	
<p>Conexiones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Conectar cada circuito utilizando el ícono  , recordando únicamente unir la parte de suministro con la parte de demanda de cada una de ellas. • En cuanto a la salida de agua caliente, seleccionar el ícono  y establecer las zonas del edificio que la requieran. 	

Fuente: [Elaboración propia].

e. Resultados

Actividad	Descripción	Referencia
Exportar datos	<p>Una vez generada las simulaciones es posible exportar gráficas y tablas seleccionadas. En primer lugar, se debe seleccionar el icono . Luego, realizar la siguiente configuración y aceptar.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exportar a: Informe. • Formato: bitmap. 	
Generar informe	<p>Una vez exportado los datos. Se debe seleccionar el icono  y realizar la siguiente configuración y aceptar.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Título: Informe “...” • Factor de escala: 1. • Configuración de página: Portarretrato. • Desactivar la casilla “Un contenido por página”. <p>*Realizar esto para cada simulación, el proceso se realiza indistintamente.</p>	

Fuente: [Elaboración propia].

APÉNDICE B

Informe de Resultados

A continuación, se muestran las gráficas de resultados más importantes obtenidas del proceso de simulación energética realizado al modelo tridimensional de la ilustración 1.

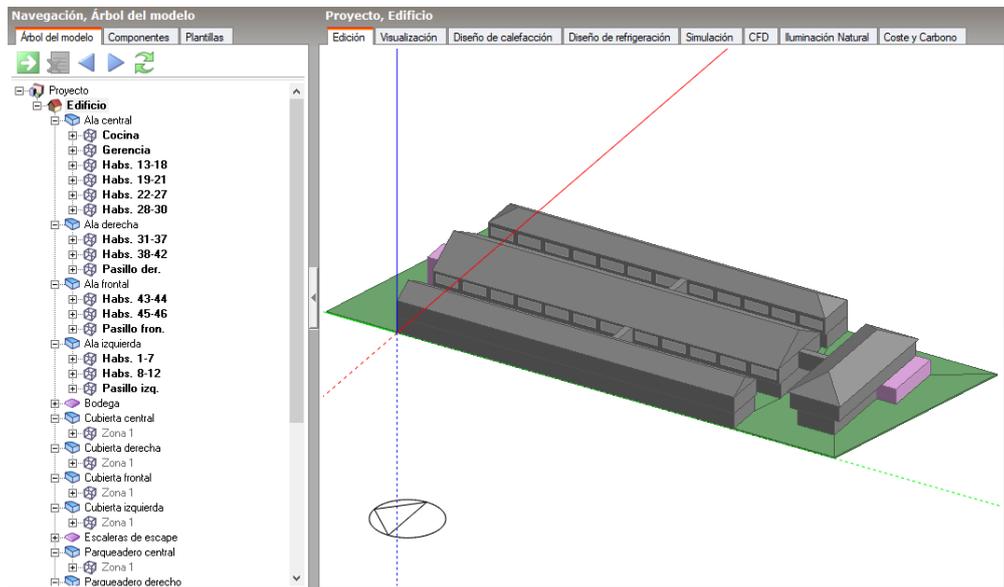


Ilustración 1. Modelo tridimensional del complejo hotelero.

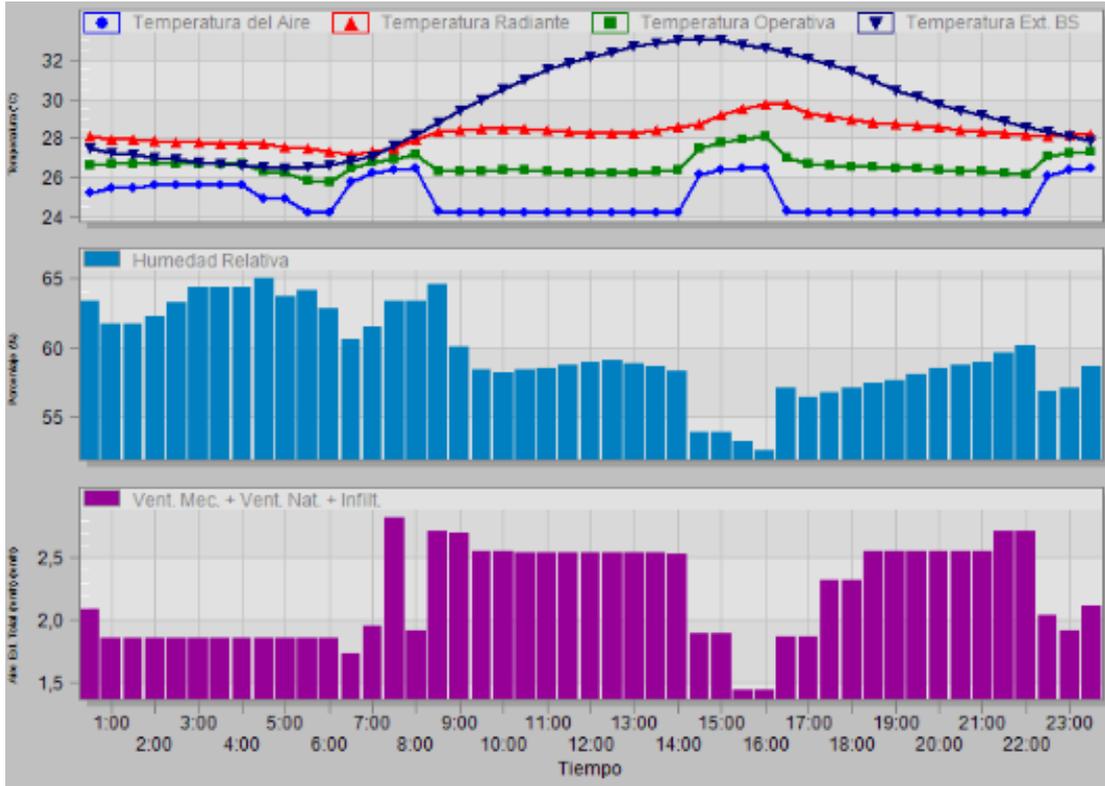
Fuente: DesignBuilder®. (2020). Tridimensional model - v6.1.2.005.

a. Sistema Línea Base



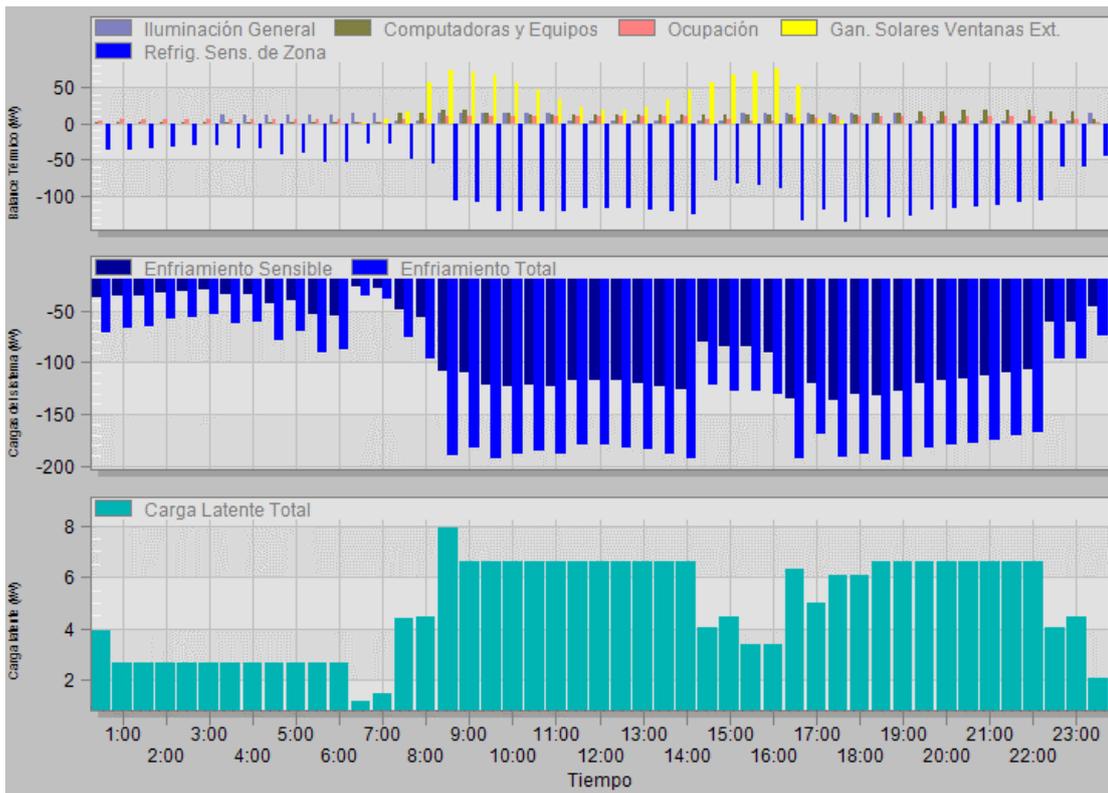
Gráfica 1. Datos climáticos – Año 2020.

Fuente: DesignBuilder®. (2020). Climatic data - v6.1.2.005.



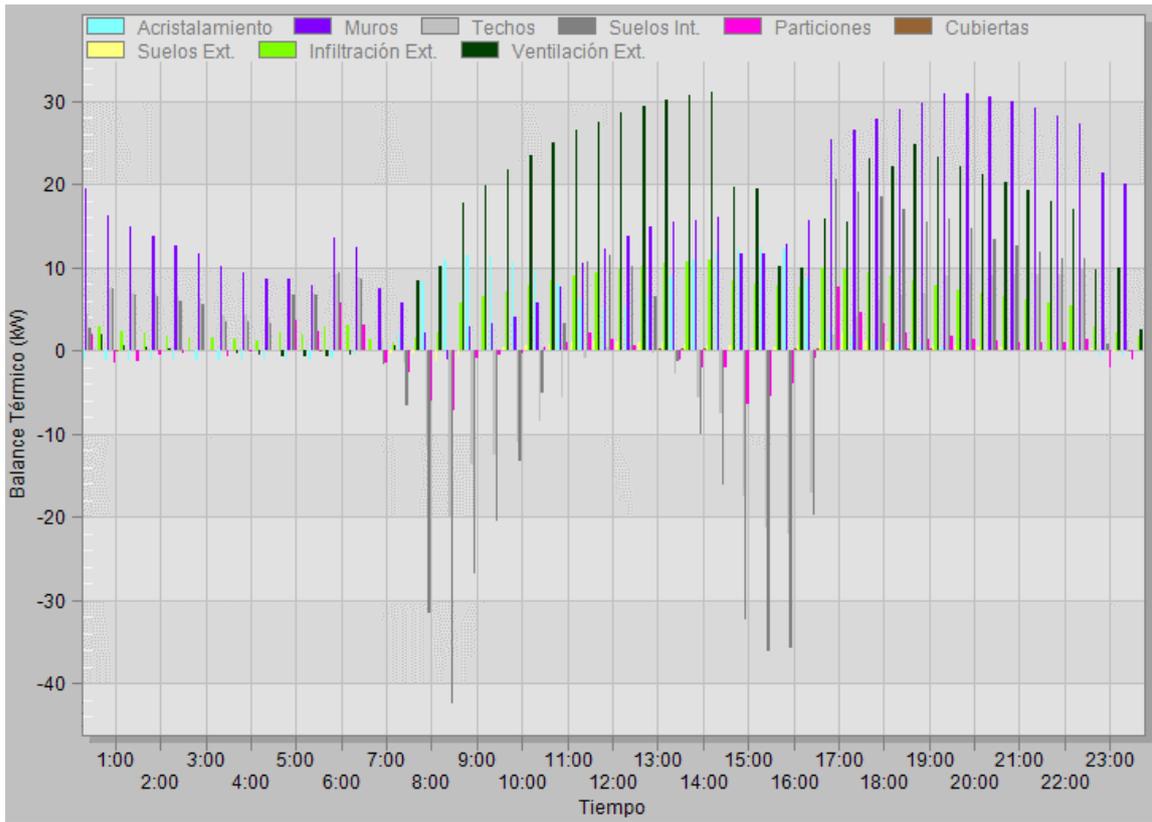
Gráfica 2. Confort térmico – Día Crítico.

Fuente: DesignBuilder®. (2020). Thermal comfort table - v6.1.2.005.



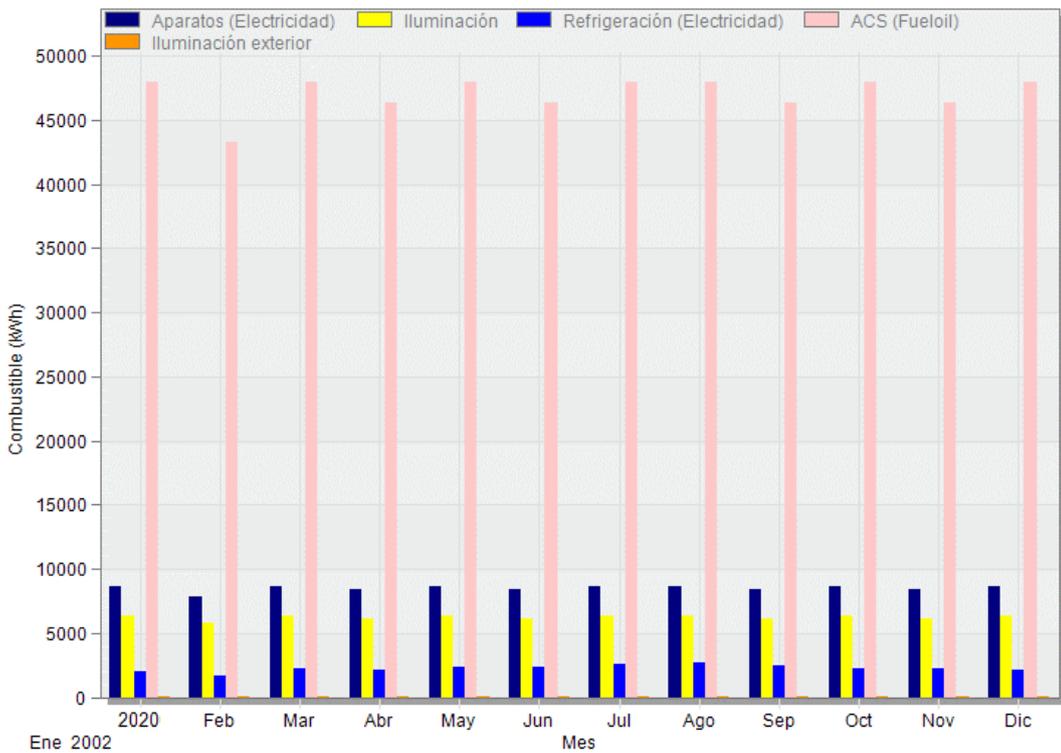
Gráfica 3. Ganancias Internas + Solares – Día Crítico.

Fuente: DesignBuilder®. (2020). Internal and solar earnings table - v6.1.2.005.



Gráfica 4. Elementos constructivos y ventilación – Día Crítico.

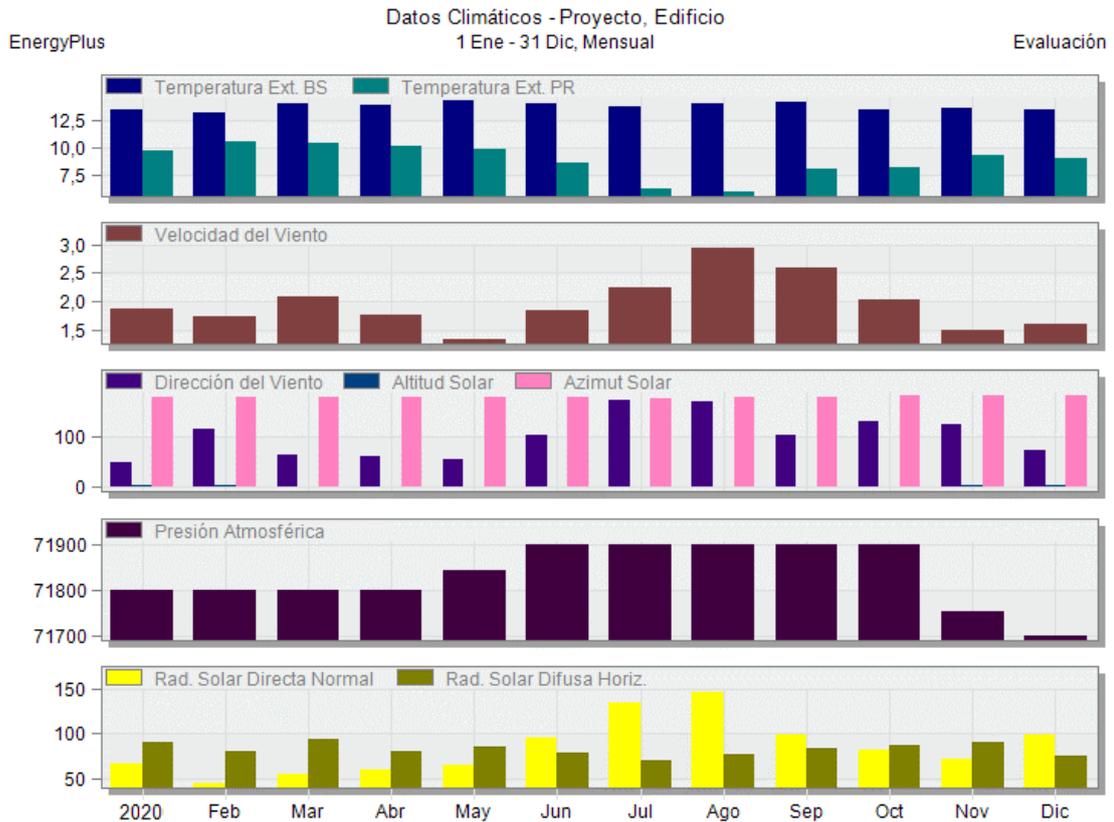
Fuente: DesignBuilder®. (2020). Construction elements and ventilation table - v6.1.2.005.



Gráfica 5. Consumo mensual desglosado.

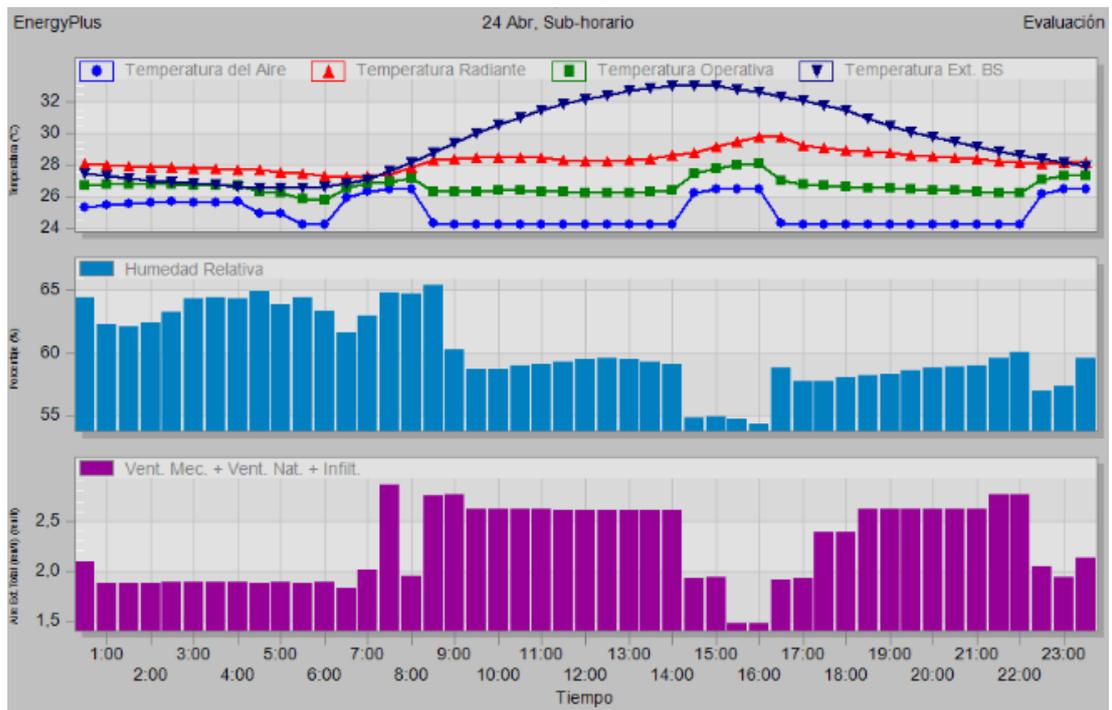
Fuente: DesignBuilder®. (2020). Monthly consumption table - v6.1.2.005.

b. Sistema de Trigeneración



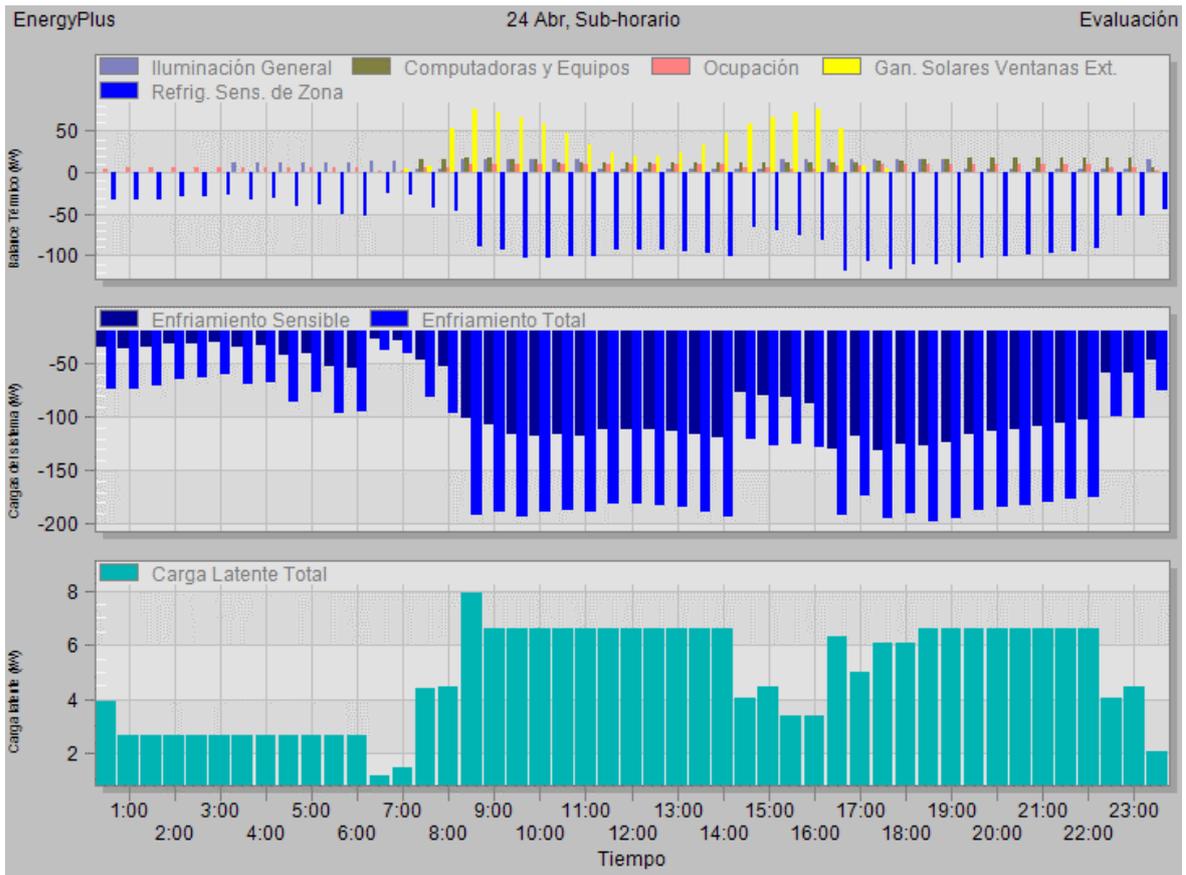
Gráfica 6. Datos climáticos – Año 2020.

Fuente: DesignBuilder®. (2020). Climatic data - v6.1.2.005.



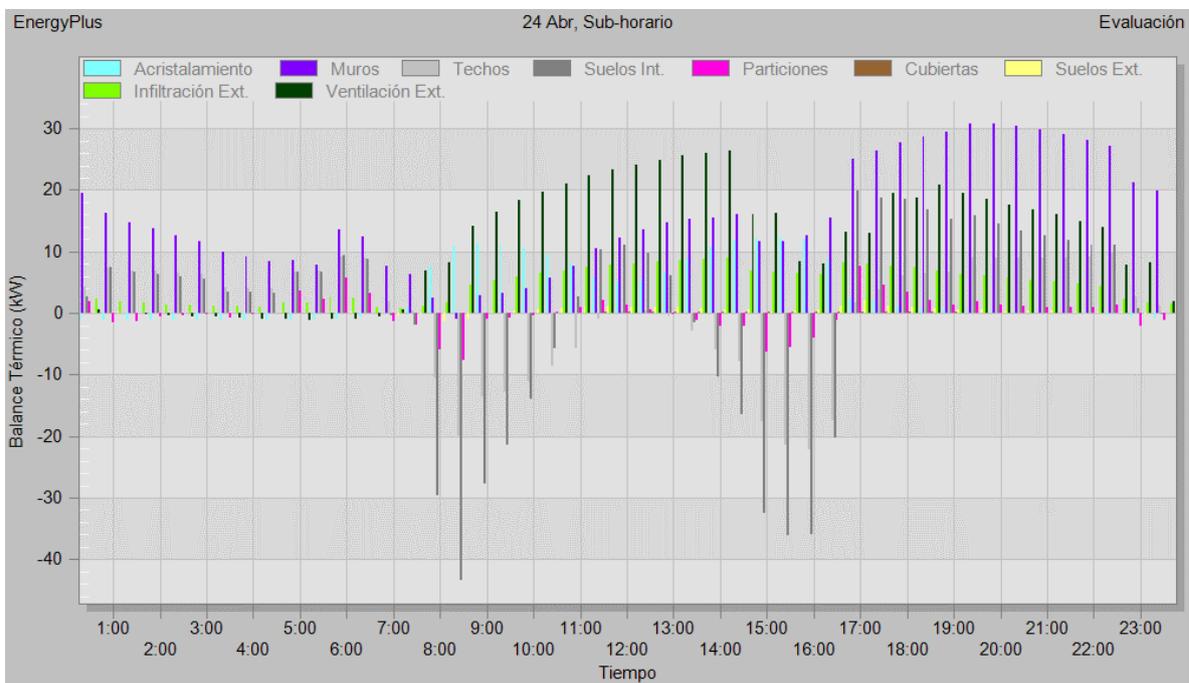
Gráfica 7. Confort térmico – Día Crítico.

Fuente: DesignBuilder®. (2020). Thermal comfort table - v6.1.2.005.



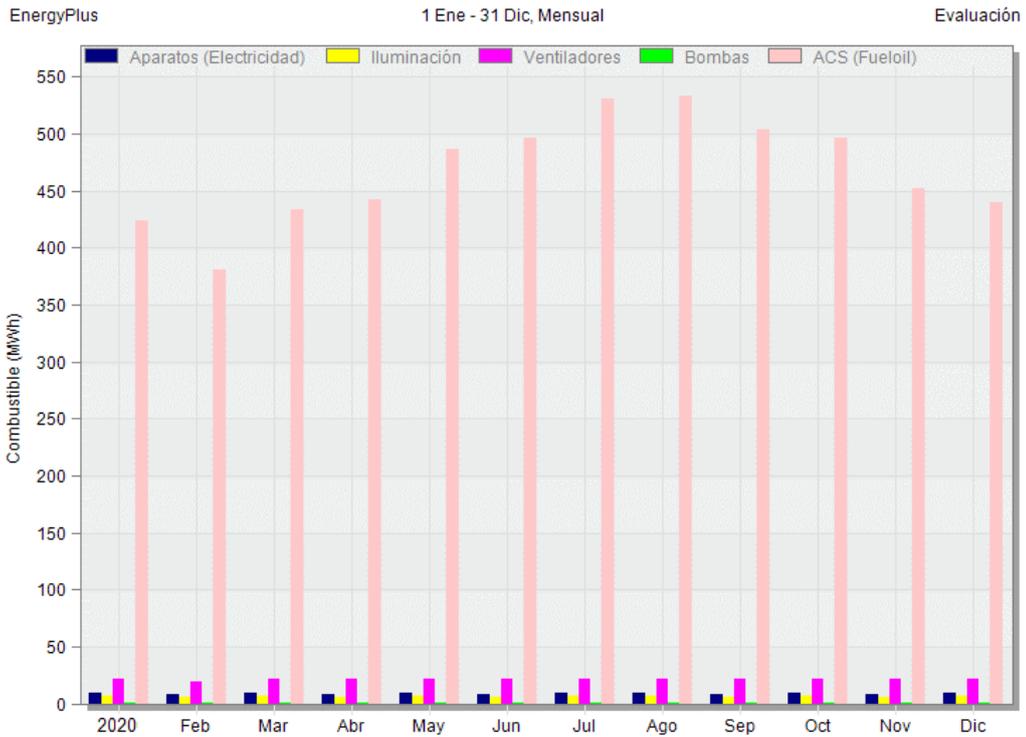
Gráfica 8. Ganancias Internas + Solares – Día Crítico.

Fuente: DesignBuilder®. (2020). Internal and solar earnings table - v6.1.2.005.



Gráfica 9. Elementos constructivos y ventilación – Día Crítico.

Fuente: DesignBuilder®. (2020). Construction elements and ventilation table - v6.1.2.005.

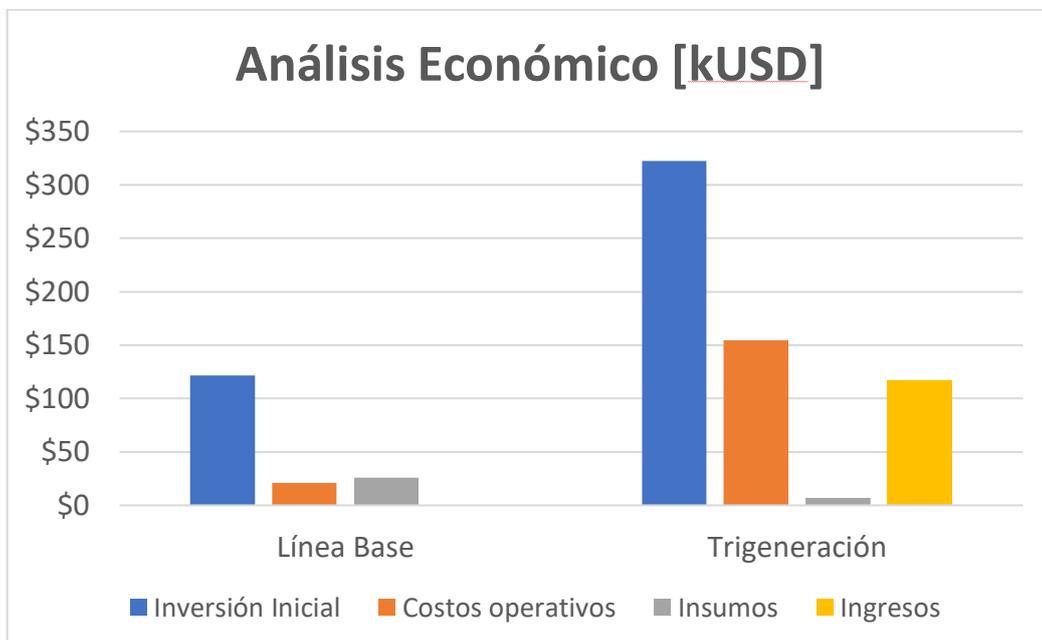


Gráfica 10. Consumo mensual desglosado.

Fuente: DesignBuilder®. (2020). Monthly consumption table - v6.1.2.005.

Estimación de costos

Además, se presenta la comparación económica de tecnologías considerando ingresos y egresos anuales durante el primer año de operaciones de los sistemas estudiados.



Gráfica 11. Tabla comparativa de tecnologías.

Fuente: [Elaboración propia].

APÉNDICE C

Validación de Resultados

A continuación, se realiza la validación de las variables de consumo del proyecto.

a. Agua potable

Considerando el valor mensual referencial mostrado en la Tabla 2.11, se tiene:

$$V = \frac{564 \text{ m}^3}{34 \text{ hab.}}$$
$$V = 16,6 \frac{\text{m}^3}{\text{hab.}}$$

Luego, del dato obtenido por simulación, se tiene:

$$V = \frac{745 \text{ m}^3}{46 \text{ hab.}}$$
$$V = 16,2 \frac{\text{m}^3}{\text{hab.}}$$

Finalmente, se calcula el error porcentual:

$$Error = \left| \frac{16,6 - 16,2}{16,6} \right| \times 100$$
$$Error = 2\%$$

b. Energía eléctrica

Considerando el valor mensual referencial mostrado en la Tabla 2.11, se tiene:

$$E = \frac{11092 \text{ kWh}}{34 \text{ hab.}}$$
$$E = 326 \frac{\text{kWh}}{\text{hab.}}$$

Luego, del dato obtenido por simulación en la Tabla 3.1, se tiene:

$$V = \frac{14767 \text{ kWh}}{46 \text{ hab.}}$$
$$V = 321 \frac{\text{kWh}}{\text{hab.}}$$

Finalmente, se calcula el error porcentual:

$$Error = \left| \frac{326 - 321}{326} \right| \times 100$$

$$Error = 2\%$$

c. Carga de refrigeración

Según (AC&CC Ingeniería, 2018) un valor típico de 12000 BTU/h puede corresponder a habitaciones de hasta 25 m², 18000 BTU/h para habitaciones de hasta 30 m² y 24000 BTU/h para habitaciones de hasta 35 m².

$$\dot{Q}_1 = 9 \text{ hab.} \left(\frac{12000 \text{ BTU/h}}{\text{hab.}} \right)$$

$$\dot{Q}_2 = 24 \text{ hab.} \left(\frac{18000 \text{ BTU/h}}{\text{hab.}} \right)$$

$$\dot{Q}_3 = 13 \text{ hab.} \left(\frac{24000 \text{ BTU/h}}{\text{hab.}} \right)$$

$$\dot{Q}_1 = 108000 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \cong 9 \text{ rt}$$

$$\dot{Q}_2 = 432000 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \cong 36 \text{ rt}$$

$$\dot{Q}_3 = 312000 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \cong 26 \text{ rt}$$

Luego, del dato obtenido por simulación en la Tabla 3.3, se tiene:

$$\dot{Q} = 231 \text{ kW} \times \frac{1 \text{ TRF}}{3,52 \text{ kW}} \times 1,15$$

$$\dot{Q} = 76 \text{ TRF}$$

Finalmente, se calcula el error porcentual:

$$Error = \left| \frac{71 - 76}{71} \right| \times 100$$

$$Error = 7\%$$

Seguidamente, se evalúa la correcta selección de los equipos de acuerdo con el siguiente análisis de ingeniería.

d. Caldera ACS

Teóricamente, se tiene:

$$Q = m * Cp * \Delta T$$

$$Q = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 10294 \text{ m}^3 * 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} * (65 - 15) \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q = 2,15 \times 10^{12} \text{ J} \cong 598461 \text{ kWh}$$

Del dato anual obtenido por simulación en la Tabla 3.2, se tiene:

$$Q = 519080 \text{ kWh} \times 1,15$$

$$\mathbf{Q = 596942 \text{ kWh}}$$

Luego, se calcula el error porcentual:

$$Error = \left| \frac{598461 - 596942}{598461} \right| \times 100$$

$$\mathbf{Error = 0,5\%}$$

Por otro lado, considerando el poder calorífico del diésel sugerido por (Perkins Engines Co. Ltd., 2015) y eficiencia de caldera, dicho resultado en términos másicos representa:

$$m = \frac{2,15 \times 10^{12} \text{ J}}{42770 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} = 50269 \text{ kg}$$

Luego, conociendo que el costo del diésel, a la fecha en Ecuador, se encuentra en \$0,274 por litro. Se tiene consumo total de combustible por año. (El Universo, 2019)

$$Costo \text{ anual} = \frac{50269 \text{ kg}}{0,850 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} \times 0,274 \frac{\$}{\text{L}}$$

$$\mathbf{Costo \text{ anual} = \$16.204,32}$$

e. Intercambiador de calor de placas

De acuerdo con la potencia calorífica estimada en la Tabla 3.2 y eficiencia en la transferencia de calor de 98%, se resuelve:

$$\dot{m} = \frac{72,5 \text{ kW}}{0,98 * 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} * (90 - 50) \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$\mathbf{\dot{m} = 0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}$$

*Valor que se encuentra dentro del rango de operación del intercambiador seleccionado, véase Tabla 3.8.

f. Enfriadora de absorción

Considerando las especificaciones de diseño de la Tabla 3.6, se tiene:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evaporador}}{\dot{Q}_{generador} + \dot{W}_{bomba}}$$

$$\dot{Q}_{generador} = \frac{281 \text{ kW}}{1,47} - 2,8 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{generador} = \mathbf{188 \text{ kW}}$$

**Valor que se encuentra dentro del margen de operación aportado por el grupo electrógeno a Prime Power @ 1800 rpm. (Perkins Engines Co. Ltd., 2015)*

g. Torre de enfriamiento

De acuerdo con el Standard 560-2000, se calcula la tolerancia de prueba. (AHRI, 2000)

$$Tolerancia = 10,5 - (0,07 * \%Carga) + \left(\frac{833,3}{\Delta T_{Agua_helada} + \%Carga} \right)$$

$$Tolerancia = 10,5 - \left(0,07 * \frac{264}{281} * 100 \right) + \left(\frac{833,3}{(12 - 7) + \frac{264}{281} * 100} \right)$$

$$\mathbf{Tolerancia = 5,7\%}$$

Luego, considerando la ecuación de equilibrio térmico porcentual. (AHRI, 2000)

$$HB = \frac{\dot{Q}_{gen} + \dot{Q}_{ev} - \dot{Q}_{cond}}{\dot{Q}_{cond}} * 100$$

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{188 \text{ kW} + 281 \text{ kW}}{1,057}$$

$$\dot{Q}_{cond} = \mathbf{444 \text{ kW}}$$

Además, se calcula el caudal teórico como sigue.

$$\dot{V} = \frac{444 \text{ kW}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} * (12 - 7) \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$\dot{m} = 0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}$$

$$\mathbf{\dot{m} = 76 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}$$

Finalmente, se obtiene el error porcentaje, tomando en cuenta el caudal de diseño sugerido en el capítulo 3.

$$Error = \left| \frac{76 - 80}{76} \right| \times 100$$

$$Error = 5\%$$

h. Grupo electrógeno

De acuerdo con el flujo de gases de escape especificado en la Tabla 3.9, y considerando la densidad de estos gases en $0,61 \text{ kg/m}^3$. (Gómez, 2005)

$$\dot{m} = 48,9 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times 0,61 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m} = 1790 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

**Valor que permite operar sin inconvenientes la enfriadora de absorción. Véase la Tabla 3.6 como referencia.*

Por otro lado, considerando el consumo de combustible especificado en la Tabla 3.9, operación máxima de 8760 horas al año y costo del diésel a la fecha en Ecuador según (El Universo, 2019), se tiene:

$$Costo \text{ anual} = 63,1 \frac{\text{L}}{\text{h}} \times 8760 \text{ h} \times 0,274 \frac{\$}{\text{L}}$$

$$Costo \text{ anual} = \$151,455,14$$

También, se calcula la energía eléctrica generada en un año de operaciones según (Perkins Engines Co. Ltd., 2015).

$$E = 225 \text{ kW}_e \times 8760 \text{ h}$$

$$E = 1971,00 \text{ MWh}$$

Luego, restando la electricidad requerida, mostrada en la Tabla 3.1, por operaciones del hotel y sistema de trigeneración.

$$E = 1538,03 \text{ GWh}$$

Finalmente, en términos económicos y considerando un costo de venta del kilovatio-hora a la red eléctrica nacional en 0,114 USD según (ARCONEL, 2016), se tiene:

$$E = 1'538.032 \text{ kWh} \times \frac{0,114 \text{ USD}}{\text{kWh}}$$

$$\mathbf{Retorno\ anual = \$175.335,65}$$

APÉNDICE D

Análisis Financiero

*De acuerdo con información recabada del Banco Central del Ecuador y la (ARCONEL, 2019), se presenta la **Matriz Financiera: Sistema Línea Base**, considerando:

Tasa de interés:	11%	Inflación anual:	3,0%	Costo del kWh (Compra):	\$0.0928
------------------	-----	------------------	------	-------------------------	----------

INGRESOS ANUALES										
	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Electricidad	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
TOTAL	\$0,00									
	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13	AÑO 14	AÑO 15	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19	AÑO 20
Electricidad	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
TOTAL	\$0,00									
	AÑO 21	AÑO 22	AÑO 23	AÑO 24	AÑO 25	AÑO 26	AÑO 27	AÑO 28	AÑO 29	AÑO 30
Electricidad	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
TOTAL	\$0,00									

COSTOS ANUALES										
	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
COMBUSTIBLE	\$16.204,32									
Diesel	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32
INSUMOS	\$30.627,86	\$31.546,69	\$32.493,09	\$33.467,89	\$34.471,92	\$35.506,08	\$36.571,26	\$37.668,40	\$38.798,45	\$39.962,41
Electricidad	\$18.942,34	\$19.510,61	\$20.095,92	\$20.698,80	\$21.319,77	\$21.959,36	\$22.618,14	\$23.296,68	\$23.995,58	\$24.715,45
Agua potable	\$7.085,52	\$7.298,09	\$7.517,03	\$7.742,54	\$7.974,82	\$8.214,06	\$8.460,48	\$8.714,30	\$8.975,72	\$9.245,00
Mantenimiento equipos	\$4.600,00	\$4.738,00	\$4.880,14	\$5.026,54	\$5.177,34	\$5.332,66	\$5.492,64	\$5.657,42	\$5.827,14	\$6.001,96
COSTOS TOTALES	\$46.832,18	\$47.751,01	\$48.697,41	\$49.672,21	\$50.676,24	\$51.710,40	\$52.775,58	\$53.872,72	\$55.002,77	\$56.166,73
UTILIDAD BRUTA	-\$46.832,18	-\$47.751,01	-\$48.697,41	-\$49.672,21	-\$50.676,24	-\$51.710,40	-\$52.775,58	-\$53.872,72	-\$55.002,77	-\$56.166,73
	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13	AÑO 14	AÑO 15	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19	AÑO 20
COMBUSTIBLE	\$16.204,32									
Diesel	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32
INSUMOS	\$41.161,28	\$42.396,12	\$43.668,00	\$44.978,04	\$46.327,38	\$47.717,20	\$49.148,72	\$50.623,18	\$52.141,87	\$53.706,13
Electricidad	\$25.456,92	\$26.220,62	\$27.007,24	\$27.817,46	\$28.651,98	\$29.511,54	\$30.396,89	\$31.308,80	\$32.248,06	\$33.215,50
Agua potable	\$9.522,35	\$9.808,02	\$10.102,26	\$10.405,32	\$10.717,48	\$11.039,01	\$11.370,18	\$11.711,28	\$12.062,62	\$12.424,50
Mantenimiento equipos	\$6.182,02	\$6.367,48	\$6.558,50	\$6.755,26	\$6.957,91	\$7.166,65	\$7.381,65	\$7.603,10	\$7.831,19	\$8.066,13
COSTOS TOTALES	\$57.365,60	\$58.600,44	\$59.872,32	\$61.182,36	\$62.531,70	\$63.921,52	\$65.353,04	\$66.827,50	\$68.346,19	\$69.910,45
UTILIDAD BRUTA	-\$57.365,60	-\$58.600,44	-\$59.872,32	-\$61.182,36	-\$62.531,70	-\$63.921,52	-\$65.353,04	-\$66.827,50	-\$68.346,19	-\$69.910,45
	AÑO 21	AÑO 22	AÑO 23	AÑO 24	AÑO 25	AÑO 26	AÑO 27	AÑO 28	AÑO 29	AÑO 30
COMBUSTIBLE	\$16.204,32									
Diesel	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32
INSUMOS	\$55.317,31	\$56.976,83	\$58.686,14	\$60.446,72	\$62.260,13	\$64.127,93	\$66.051,77	\$68.033,32	\$70.074,32	\$72.176,55
Electricidad	\$34.211,97	\$35.238,32	\$36.295,47	\$37.384,34	\$38.505,87	\$39.661,05	\$40.850,88	\$42.076,40	\$43.330,69	\$44.638,86
Agua potable	\$12.797,24	\$13.181,15	\$13.576,59	\$13.983,89	\$14.403,40	\$14.835,51	\$15.280,57	\$15.738,99	\$16.211,16	\$16.697,49
Mantenimiento equipos	\$8.308,11	\$8.557,36	\$8.814,08	\$9.078,50	\$9.350,85	\$9.631,38	\$9.920,32	\$10.217,93	\$10.524,47	\$10.840,20
COSTOS TOTALES	\$71.521,63	\$73.181,15	\$74.890,46	\$76.651,04	\$78.464,45	\$80.332,25	\$82.256,09	\$84.237,64	\$86.278,64	\$88.380,87

Fuente: [Elaboración propia].

INVERSIÓN*	
EQUIPOS	\$108.000,00
Paquetes A/C	\$60.000,00
Caldera ACS	\$48.000,00
INSTALACIONES	\$13.440,00
Tuberías & Ductos	\$12.000,00
Mano de obra & Puesta en marcha	\$1.440,00
TOTAL	\$121.440,00

DEPRECIACIÓN DE ACTIVOS						
ACTIVOS FIJOS	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL (USD)	VIDA (años)	DEPRECIACIÓN	DEPRECIACION ANUAL
Paquetes A/C	3	\$20.000,00	\$60.000,00	10	10,00%	\$6.000,00
Caldera ACS	1	\$48.000,00	\$48.000,00	30	3,33%	\$1.600,00
TOTAL						\$7.600,00

*El sistema línea base debe implementarse por tres ocasiones debido a su baja vida útil.

INDICADORES ECONÓMICOS	
VAN	-\$713.018,59
TIR	#¡NUM!

FLUJO DE CAJA										
RUBROS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Flujo de Ingresos	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Flujo de Egresos	\$66.906,21	\$67.825,05	\$68.771,45	\$69.746,24	\$70.750,28	\$71.784,43	\$72.849,62	\$73.946,75	\$75.076,81	\$76.240,76
Combustible	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32
Insumos	\$30.627,86	\$31.546,69	\$32.493,09	\$33.467,89	\$34.471,92	\$35.506,08	\$36.571,26	\$37.668,40	\$38.798,45	\$39.962,41
Amortización (principal del préstamo)	\$7.064,78	\$7.882,30	\$8.794,43	\$9.812,12	\$10.947,33	\$12.205,80	\$13.604,88	\$15.164,33	\$16.902,54	\$18.839,98
Pago de intereses (préstamo)	\$13.009,26	\$12.191,73	\$11.279,60	\$10.261,92	\$9.126,71	\$7.868,24	\$6.469,15	\$4.909,70	\$3.171,50	\$1.234,05
Depreciación	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00
Flujo de Efectivo Neto	-\$121.440,00	-\$59.306,21	-\$60.225,05	-\$61.171,45	-\$62.146,24	-\$63.150,28	-\$64.184,43	-\$65.249,62	-\$66.346,75	-\$67.476,81
RUBROS	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13	AÑO 14	AÑO 15	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19	AÑO 20
Flujo de Ingresos	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Flujo de Egresos	\$77.439,63	\$78.674,47	\$79.946,35	\$81.256,39	\$82.605,73	\$83.995,56	\$85.427,07	\$86.901,53	\$88.420,23	\$89.984,48
Combustible	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32
Insumos	\$41.161,28	\$42.396,12	\$43.668,00	\$44.978,04	\$46.327,38	\$47.717,20	\$49.148,72	\$50.623,18	\$52.141,87	\$53.706,13
Amortización (principal del préstamo)	\$7.064,78	\$7.882,30	\$8.794,43	\$9.812,12	\$10.947,33	\$12.205,80	\$13.604,88	\$15.164,33	\$16.902,54	\$18.839,98
Pago de intereses (préstamo)	\$13.009,26	\$12.191,73	\$11.279,60	\$10.261,92	\$9.126,71	\$7.868,24	\$6.469,15	\$4.909,70	\$3.171,50	\$1.234,05
Depreciación	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00
Flujo de Efectivo Neto	-\$69.839,63	-\$71.074,47	-\$72.346,35	-\$73.656,39	-\$75.005,73	-\$76.395,56	-\$77.827,07	-\$79.301,53	-\$80.820,23	-\$82.384,48
RUBROS	AÑO 21	AÑO 22	AÑO 23	AÑO 24	AÑO 25	AÑO 26	AÑO 27	AÑO 28	AÑO 29	AÑO 30
Flujo de Ingresos	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Flujo de Egresos	\$91.595,67	\$93.255,19	\$94.964,49	\$96.725,08	\$98.538,48	\$100.406,28	\$102.330,12	\$104.311,67	\$106.352,67	\$108.454,90
Combustible	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32	\$16.204,32
Insumos	\$55.317,31	\$56.976,83	\$58.686,14	\$60.446,72	\$62.260,13	\$64.127,93	\$66.051,77	\$68.033,32	\$70.074,32	\$72.176,55
Amortización (principal del préstamo)	\$7.064,78	\$7.882,30	\$8.794,43	\$9.812,12	\$10.947,33	\$12.205,80	\$13.604,88	\$15.164,33	\$16.902,54	\$18.839,98
Pago de intereses (préstamo)	\$13.009,26	\$12.191,73	\$11.279,60	\$10.261,92	\$9.126,71	\$7.868,24	\$6.469,15	\$4.909,70	\$3.171,50	\$1.234,05
Depreciación	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00	\$7.600,00
Flujo de Efectivo Neto	-\$83.995,67	-\$85.655,19	-\$87.364,49	-\$89.125,08	-\$90.938,48	-\$92.806,28	-\$94.730,12	-\$96.711,67	-\$98.752,67	-\$100.854,90

Fuente: [Elaboración propia].

*De acuerdo con información recabada del Banco Central del Ecuador y la (ARCONEL, 2019), se presenta la **Matriz Financiera: Sistema de Trigeneración**, considerando el primer escenario. “*Subsidio permanente al diésel*”

Tasa de interés:	11%	Inflación anual:	3,0%	Costo del kWh (Venta):	\$0,114
------------------	-----	------------------	------	------------------------	---------

INGRESOS ANUALES										
	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Electricidad	\$175.335,65	\$180.595,72	\$186.013,59	\$191.594,00	\$197.341,82	\$203.262,07	\$209.359,93	\$215.640,73	\$222.109,95	\$228.773,25
TOTAL	\$175.335,65	\$180.595,72	\$186.013,59	\$191.594,00	\$197.341,82	\$203.262,07	\$209.359,93	\$215.640,73	\$222.109,95	\$228.773,25
	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13	AÑO 14	AÑO 15	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19	AÑO 20
Electricidad	\$235.636,45	\$242.705,54	\$249.986,71	\$257.486,31	\$265.210,90	\$273.167,23	\$281.362,24	\$289.803,11	\$298.497,20	\$307.452,12
TOTAL	\$235.636,45	\$242.705,54	\$249.986,71	\$257.486,31	\$265.210,90	\$273.167,23	\$281.362,24	\$289.803,11	\$298.497,20	\$307.452,12
	AÑO 21	AÑO 22	AÑO 23	AÑO 24	AÑO 25	AÑO 26	AÑO 27	AÑO 28	AÑO 29	AÑO 30
Electricidad	\$316.675,68	\$326.175,95	\$335.961,23	\$346.040,07	\$356.421,27	\$367.113,91	\$378.127,33	\$389.471,15	\$401.155,28	\$413.189,94
TOTAL	\$316.675,68	\$326.175,95	\$335.961,23	\$346.040,07	\$356.421,27	\$367.113,91	\$378.127,33	\$389.471,15	\$401.155,28	\$413.189,94

COSTOS ANUALES										
	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
COMBUSTIBLE	\$151.455,14									
Diesel	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14
INSUMOS	\$10.085,52	\$10.388,09	\$10.699,73	\$11.020,72	\$11.351,34	\$11.691,88	\$12.042,64	\$12.403,92	\$12.776,03	\$13.159,32
Mantenimiento equipos	\$3.000,00	\$3.090,00	\$3.182,70	\$3.278,18	\$3.376,53	\$3.477,82	\$3.582,16	\$3.689,62	\$3.800,31	\$3.914,32
Agua potable	\$7.085,52	\$7.298,09	\$7.517,03	\$7.742,54	\$7.974,82	\$8.214,06	\$8.460,48	\$8.714,30	\$8.975,72	\$9.245,00
COSTOS TOTALES	\$161.540,66	\$161.843,23	\$162.154,87	\$162.475,86	\$162.806,48	\$163.147,02	\$163.497,78	\$163.859,06	\$164.231,17	\$164.614,46
UTILIDAD BRUTA	\$13.794,99	\$18.752,49	\$23.858,72	\$29.118,14	\$34.535,33	\$40.115,05	\$45.862,15	\$51.781,67	\$57.878,78	\$64.158,80
	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13	AÑO 14	AÑO 15	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19	AÑO 20
COMBUSTIBLE	\$151.455,14									
Diesel	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14
INSUMOS	\$13.554,10	\$13.960,72	\$14.379,54	\$14.810,93	\$15.255,25	\$15.712,91	\$16.184,30	\$16.669,83	\$17.169,92	\$17.685,02
Mantenimiento equipos	\$4.031,75	\$4.152,70	\$4.277,28	\$4.405,60	\$4.537,77	\$4.673,90	\$4.814,12	\$4.958,54	\$5.107,30	\$5.260,52
Agua potable	\$9.522,35	\$9.808,02	\$10.102,26	\$10.405,32	\$10.717,48	\$11.039,01	\$11.370,18	\$11.711,28	\$12.062,62	\$12.424,50
COSTOS TOTALES	\$165.009,24	\$165.415,86	\$165.834,68	\$166.266,07	\$166.710,39	\$167.168,05	\$167.639,44	\$168.124,97	\$168.625,06	\$169.140,16
UTILIDAD BRUTA	\$70.627,21	\$77.289,68	\$84.152,03	\$91.220,24	\$98.500,51	\$105.999,18	\$113.722,80	\$121.678,14	\$129.872,14	\$138.311,96
	AÑO 21	AÑO 22	AÑO 23	AÑO 24	AÑO 25	AÑO 26	AÑO 27	AÑO 28	AÑO 29	AÑO 30
COMBUSTIBLE	\$151.455,14									
Diesel	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14
INSUMOS	\$18.215,57	\$18.762,04	\$19.324,90	\$19.904,65	\$20.501,79	\$21.116,84	\$21.750,34	\$22.402,85	\$23.074,94	\$23.767,19
Mantenimiento equipos	\$5.418,33	\$5.580,88	\$5.748,31	\$5.920,76	\$6.098,38	\$6.281,33	\$6.469,77	\$6.663,87	\$6.863,78	\$7.069,70
Agua potable	\$12.797,24	\$13.181,15	\$13.576,59	\$13.983,89	\$14.403,40	\$14.835,51	\$15.280,57	\$15.738,99	\$16.211,16	\$16.697,49
COSTOS TOTALES	\$169.670,71	\$170.217,18	\$170.780,04	\$171.359,79	\$171.956,93	\$172.571,98	\$173.205,48	\$173.857,99	\$174.530,08	\$175.222,33
UTILIDAD BRUTA	\$147.004,97	\$155.958,78	\$165.181,19	\$174.680,28	\$184.464,35	\$194.541,93	\$204.921,84	\$215.613,15	\$226.625,20	\$237.967,61

Fuente: [Elaboración propia].

INVERSION	
EQUIPOS	\$271.500,00
Motor combustión interna	\$30.000,00
Intercambiador de calor	\$7.500,00
Chiller abs. + Torre enf.	\$192.000,00
UMAs	\$42.000,00
INSTALACIONES	\$51.040,00
Tuberías & Ductos	\$44.000,00
Mano de obra & Puesta en marcha	\$7.040,00
TOTAL	\$322.540,00

DEPRECIACIÓN DE ACTIVOS						
ACTIVOS FIJOS	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL (USD)	VIDA (años)	DEPRECIACIÓN	DEPRECIACION ANUAL
Motor combustión interna	1	\$30.000,00	\$30.000,00	30	3,33%	\$1.000,00
Intercambiador de calor	1	\$7.500,00	\$7.500,00	30	3,33%	\$250,00
Chiller abs. + Torre enf.	1	\$192.000,00	\$192.000,00	30	3,33%	\$6.400,00
UMAs	6*	\$14.000,00	\$84.000,00	15	6,67%	\$5.600,00
TOTAL						\$13.250,00

*El circuito de aire requiere un cambio de equipos (UMAs) a los 15 años de operaciones del sistema.

INDICADORES ECONÓMICOS	
VAN	\$7.525,50
TIR	11%

FLUJO DE CAJA										
RUBROS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Flujo de Ingresos	\$175.335,65	\$180.595,72	\$186.013,59	\$191.594,00	\$197.341,82	\$203.262,07	\$209.359,93	\$215.640,73	\$222.109,95	\$228.773,25
Flujo de Egresos	\$209.127,50	\$209.430,06	\$209.741,71	\$210.062,70	\$210.393,32	\$210.733,86	\$211.084,62	\$211.445,90	\$211.818,01	\$212.201,30
Combustible	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14
Insumos	\$10.085,52	\$10.388,09	\$10.699,73	\$11.020,72	\$11.351,34	\$11.691,88	\$12.042,64	\$12.403,92	\$12.776,03	\$13.159,32
Amortización (principal del préstamo)	\$12.736,90	\$14.210,80	\$15.855,25	\$17.690,01	\$19.736,65	\$22.005,51	\$24.527,88	\$27.339,38	\$30.473,14	\$33.966,11
Pago de intereses (préstamo)	\$34.849,94	\$33.376,04	\$31.731,59	\$29.896,83	\$27.850,19	\$25.581,33	\$23.058,96	\$20.247,46	\$17.113,70	\$13.620,73
Depreciación	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00
Flujo de Efectivo Neto	-\$322.540,00	-\$20.541,85	-\$15.584,35	-\$10.478,12	-\$5.218,70	\$198,50	\$5.778,21	\$11.525,32	\$17.444,83	\$23.541,94
RUBROS	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13	AÑO 14	AÑO 15	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19	AÑO 20
Flujo de Ingresos	\$235.636,45	\$242.705,54	\$249.986,71	\$257.486,31	\$265.210,90	\$273.167,23	\$281.362,24	\$289.803,11	\$298.497,20	\$307.452,12
Flujo de Egresos	\$212.596,07	\$213.002,70	\$189.390,21	\$166.266,07	\$166.710,39	\$167.168,05	\$167.639,44	\$168.124,97	\$168.625,06	\$169.140,16
Combustible	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14
Insumos	\$13.554,10	\$13.960,72	\$14.379,54	\$14.810,93	\$15.255,25	\$15.712,91	\$16.184,30	\$16.669,83	\$17.169,92	\$17.685,02
Amortización (principal del préstamo)	\$37.859,46	\$42.199,08	\$22.880,19	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Pago de intereses (préstamo)	\$9.727,38	\$5.387,76	\$675,33	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Depreciación	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00
Flujo de Efectivo Neto	\$36.290,37	\$42.952,85	\$73.846,50	\$104.470,24	\$111.750,51	\$119.249,18	\$126.972,80	\$134.928,14	\$143.122,14	\$151.561,96
RUBROS	AÑO 21	AÑO 22	AÑO 23	AÑO 24	AÑO 25	AÑO 26	AÑO 27	AÑO 28	AÑO 29	AÑO 30
Flujo de Ingresos	\$316.675,68	\$326.175,95	\$335.961,23	\$346.040,07	\$356.421,27	\$367.113,91	\$378.127,33	\$389.471,15	\$401.155,28	\$413.189,94
Flujo de Egresos	\$169.670,71	\$170.217,18	\$170.780,04	\$171.359,79	\$171.956,93	\$172.571,98	\$173.205,48	\$173.857,99	\$174.530,08	\$175.222,33
Combustible	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14	\$151.455,14
Insumos	\$18.215,57	\$18.762,04	\$19.324,90	\$19.904,65	\$20.501,79	\$21.116,84	\$21.750,34	\$22.402,85	\$23.074,94	\$23.767,19
Amortización (principal del préstamo)	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Pago de intereses (préstamo)	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Depreciación	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00
Flujo de Efectivo Neto	\$160.254,97	\$169.208,78	\$178.431,19	\$187.930,28	\$197.714,35	\$207.791,93	\$218.171,84	\$228.863,15	\$239.875,20	\$251.217,61

Fuente: [Elaboración propia].

*Del mismo modo, ahora se presenta la **Matriz Financiera: Sistema de Trigeneración**, considerando el segundo escenario. “Sin subsidio al diésel”.

Tasa de interés:	11%	Inflación anual:	3,0%	Costo del kWh (Venta):	\$0,198
------------------	-----	------------------	------	------------------------	---------

INGRESOS ANUALES										
	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Electricidad	\$304.530,34	\$313.666,25	\$323.076,23	\$332.768,52	\$342.751,58	\$353.034,12	\$363.625,15	\$374.533,90	\$385.769,92	\$397.343,02
TOTAL	\$304.530,34	\$313.666,25	\$323.076,23	\$332.768,52	\$342.751,58	\$353.034,12	\$363.625,15	\$374.533,90	\$385.769,92	\$397.343,02
	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13	AÑO 14	AÑO 15	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19	AÑO 20
Electricidad	\$409.263,31	\$421.541,21	\$434.187,44	\$447.213,07	\$460.629,46	\$474.448,34	\$488.681,79	\$503.342,24	\$518.442,51	\$533.995,79
TOTAL	\$409.263,31	\$421.541,21	\$434.187,44	\$447.213,07	\$460.629,46	\$474.448,34	\$488.681,79	\$503.342,24	\$518.442,51	\$533.995,79
	AÑO 21	AÑO 22	AÑO 23	AÑO 24	AÑO 25	AÑO 26	AÑO 27	AÑO 28	AÑO 29	AÑO 30
Electricidad	\$550.015,66	\$566.516,13	\$583.511,61	\$601.016,96	\$619.047,47	\$637.618,90	\$656.747,46	\$676.449,89	\$696.743,38	\$717.645,69
TOTAL	\$550.015,66	\$566.516,13	\$583.511,61	\$601.016,96	\$619.047,47	\$637.618,90	\$656.747,46	\$676.449,89	\$696.743,38	\$717.645,69

COSTOS ANUALES										
	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
COMBUSTIBLE	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19
Diesel	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19
INSUMOS	\$10.085,52	\$10.388,09	\$10.699,73	\$11.020,72	\$11.351,34	\$11.691,88	\$12.042,64	\$12.403,92	\$12.776,03	\$13.159,32
Mantenimiento equipos	\$3.000,00	\$3.090,00	\$3.182,70	\$3.278,18	\$3.376,53	\$3.477,82	\$3.582,16	\$3.689,62	\$3.800,31	\$3.914,32
Agua potable	\$7.085,52	\$7.298,09	\$7.517,03	\$7.742,54	\$7.974,82	\$8.214,06	\$8.460,48	\$8.714,30	\$8.975,72	\$9.245,00
COSTOS TOTALES	\$326.814,71	\$327.117,27	\$327.428,92	\$327.749,91	\$328.080,53	\$328.421,07	\$328.771,83	\$329.133,11	\$329.505,22	\$329.888,50
UTILIDAD BRUTA	-\$22.284,37	-\$13.451,03	-\$4.352,68	\$5.018,61	\$14.671,05	\$24.613,05	\$34.853,32	\$45.400,80	\$56.264,70	\$67.454,51
	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13	AÑO 14	AÑO 15	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19	AÑO 20
COMBUSTIBLE	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19
Diesel	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19
INSUMOS	\$13.554,10	\$13.960,72	\$14.379,54	\$14.810,93	\$15.255,25	\$15.712,91	\$16.184,30	\$16.669,83	\$17.169,92	\$17.685,02
Mantenimiento equipos	\$4.031,75	\$4.152,70	\$4.277,28	\$4.405,60	\$4.537,77	\$4.673,90	\$4.814,12	\$4.958,54	\$5.107,30	\$5.260,52
Agua potable	\$9.522,35	\$9.808,02	\$10.102,26	\$10.405,32	\$10.717,48	\$11.039,01	\$11.370,18	\$11.711,28	\$12.062,62	\$12.424,50
COSTOS TOTALES	\$330.283,28	\$330.689,91	\$331.108,73	\$331.540,11	\$331.984,44	\$332.442,10	\$332.913,49	\$333.399,02	\$333.899,11	\$334.414,21
UTILIDAD BRUTA	\$78.980,02	\$90.851,30	\$103.078,71	\$115.672,95	\$128.645,02	\$142.006,24	\$155.768,30	\$169.943,23	\$184.543,40	\$199.581,58
	AÑO 21	AÑO 22	AÑO 23	AÑO 24	AÑO 25	AÑO 26	AÑO 27	AÑO 28	AÑO 29	AÑO 30
COMBUSTIBLE	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19
Diesel	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19
INSUMOS	\$18.215,57	\$18.762,04	\$19.324,90	\$19.904,65	\$20.501,79	\$21.116,84	\$21.750,34	\$22.402,85	\$23.074,94	\$23.767,19
Mantenimiento equipos	\$5.418,33	\$5.580,88	\$5.748,31	\$5.920,76	\$6.098,38	\$6.281,33	\$6.469,77	\$6.663,87	\$6.863,78	\$7.069,70
Agua potable	\$12.797,24	\$13.181,15	\$13.576,59	\$13.983,89	\$14.403,40	\$14.835,51	\$15.280,57	\$15.738,99	\$16.211,16	\$16.697,49
COSTOS TOTALES	\$334.944,76	\$335.491,23	\$336.054,09	\$336.633,83	\$337.230,97	\$337.846,03	\$338.479,53	\$339.132,04	\$339.804,13	\$340.496,38
UTILIDAD BRUTA	\$215.070,90	\$231.024,90	\$247.457,53	\$264.383,13	\$281.816,50	\$299.772,87	\$318.267,93	\$337.317,84	\$356.939,26	\$377.149,31

Fuente: [Elaboración propia].

INVERSIÓN	
EQUIPOS	\$271.500,00
Motor combustión interna	\$30.000,00
Intercambiador de calor	\$7.500,00
Chiller abs. + Torre enf.	\$192.000,00
UMAs	\$42.000,00
INSTALACIONES	\$51.040,00
Tuberías & Ductos	\$44.000,00
Mano de obra & Puesta en marcha	\$7.040,00
TOTAL	\$322.540,00

DEPRECIACIÓN DE ACTIVOS						
ACTIVOS FIJOS	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL (USD)	VIDA (años)	DEPRECIACIÓN	DEPRECIACION ANUAL
Motor combustión interna	1	\$30.000,00	\$30.000,00	30	3,33%	\$1.000,00
Intercambiador de calor	1	\$7.500,00	\$7.500,00	30	3,33%	\$250,00
Chiller abs. + Torre enf.	1	\$192.000,00	\$192.000,00	30	3,33%	\$6.400,00
UMAs	6*	\$14.000,00	\$84.000,00	15	6,67%	\$5.600,00
TOTAL						\$13.250,00

*El circuito de aire requiere un cambio de equipos (UMAs) a los 15 años de operaciones del sistema.

INDICADORES ECONÓMICOS	
VAN	\$14.369,94
TIR	11%

FLUJO DE CAJA										
RUBROS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Flujo de Ingresos	\$304.530,34	\$313.666,25	\$323.076,23	\$332.768,52	\$342.751,58	\$353.034,12	\$363.625,15	\$374.533,90	\$385.769,92	\$397.343,02
Flujo de Egresos	\$374.401,55	\$374.704,11	\$375.015,76	\$375.336,75	\$375.667,37	\$376.007,91	\$376.358,67	\$376.719,94	\$377.092,06	\$377.475,34
Combustible	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19
Insumos	\$10.085,52	\$10.388,09	\$10.699,73	\$11.020,72	\$11.351,34	\$11.691,88	\$12.042,64	\$12.403,92	\$12.776,03	\$13.159,32
Amortización (principal del préstamo)	\$12.736,90	\$14.210,80	\$15.855,25	\$17.690,01	\$19.736,65	\$22.005,51	\$24.527,88	\$27.339,38	\$30.473,14	\$33.966,11
Pago de intereses (préstamo)	\$34.849,94	\$33.376,04	\$31.731,59	\$29.896,83	\$27.850,19	\$25.581,33	\$23.058,96	\$20.247,46	\$17.113,70	\$13.620,73
Depreciación	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00
Flujo de Efectivo Neto	-\$322.540,00	-\$56.621,21	-\$47.787,87	-\$38.689,52	-\$29.318,23	-\$19.665,79	-\$9.723,79	\$516,48	\$11.063,96	\$21.927,86
Flujo de Efectivo Neto	\$44.643,18	\$56.514,46	\$92.773,19	\$128.922,95	\$141.895,02	\$155.256,24	\$169.018,30	\$183.193,23	\$197.793,40	\$212.831,58
Flujo de Efectivo Neto	\$550.015,66	\$566.516,13	\$583.511,61	\$601.016,96	\$619.047,47	\$637.618,90	\$656.747,46	\$676.449,89	\$696.743,38	\$717.645,69
Flujo de Egresos	\$334.944,76	\$335.491,23	\$336.054,09	\$336.633,83	\$337.230,97	\$337.846,03	\$338.479,53	\$339.132,04	\$339.804,13	\$340.496,38
Combustible	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19	\$316.729,19
Insumos	\$18.215,57	\$18.762,04	\$19.324,90	\$19.904,65	\$20.501,79	\$21.116,84	\$21.750,34	\$22.402,85	\$23.074,94	\$23.767,19
Amortización (principal del préstamo)	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Pago de intereses (préstamo)	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Depreciación	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00	\$13.250,00
Flujo de Efectivo Neto	\$228.320,90	\$244.274,90	\$260.707,53	\$277.633,13	\$295.066,50	\$313.022,87	\$331.517,93	\$350.567,84	\$370.189,26	\$390.399,31

Fuente: [Elaboración propia].