

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



EVALUACION DE SISTEMA TERMOSOLAR-BIOMASA PARA PRODUCIR ACS Y
TEMPERAR PISCINA CUBIERTA EN COMPLEJO DEPORTIVO DE CONCEPCION

Informe de Habilitación Profesional
presentado en conformidad a los requisitos
para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Sr. Reinaldo Sánchez Arriagada

ALFREDO ENRIQUE ARRIAGADA ARCE
CONCEPCION – CHILE
2013

Sumario

En el marco de la presente habilitación profesional se realiza una evaluación del suministro de energía térmica para un complejo deportivo en la ciudad de Concepción, utilizando de manera separada, concentradores solares parabólicos y una caldera a pellets de madera.

Se da a conocer el recurso solar disponible en la zona y el recurso de pellets a nivel nacional. El recurso solar se evalúa a partir de una metodología de cálculo, desarrollada para el trabajo debido a que no existen datos para superficies con seguimiento solar y además, el concentrador utiliza sólo radiación directa. El recurso del pellets se obtendrá a partir datos aportados por la Comisión Nacional de Energía.

Conocidos los recursos de ambas tecnologías, se determinan las demandas energéticas para agua caliente sanitaria y piscina temperada cubierta en un complejo deportivo ubicado en Concepción, para un consumo de $8.400 [l / día]$ y para una piscina semi-olímpica, de dimensiones 25×10 y $2 [m]$ de profundidad promedio.

Para satisfacer las demandas anteriores se considerarán 3 alternativas de evaluación. La alternativa 1 supone que el sistema ya se encuentra funcionando con la energía convencional, esto es, mediante una caldera a gas licuado. La alternativa 2 supone la instalación del sistema termosolar, utilizando concentradores solares ABSOLICON modelo X10T apoyado por la caldera a gas para suplir la energía térmica faltante. Por último, la alternativa 3 supone la instalación de un sistema de biomasa que opera con una caldera a pellets TUERO-100 y cubre el total de la energía térmica demandada. Finalmente se desarrolla la ingeniería básica para el diseño de los sistemas de las alternativas 2 y 3.

La evaluación económica se realiza utilizando la metodología de “Análisis del ciclo de vida de instalaciones y sistemas”, Norma ASTM E917. Para un período de 20 años y comparándolos con la alternativa 1, la alternativa 2 presenta un ahorro de $392.543,5 [US\$]$ mientras que la alternativa 3 presenta un ahorro de $892.221,7 [US\$]$, siendo de esta manera la alternativa más atractiva desde el punto de vista económico.

Sumario

Contenidos

Capítulo 1: Introducción	11
1.1 Problemática y origen del proyecto	11
1.2 Objetivos del proyecto.....	11
1.2.1 Generales.....	11
1.2.2 Específicos	11
1.3 Alcances del tema a desarrollar	12
Capítulo 2: Recurso solar para Concepción.....	13
2.1 Generalidades	13
2.1.2 Recurso solar para el observador terrestre	14
2.1.3 Hora solar	14
2.2 Ángulos solares.....	16
2.2.1 Declinación (δ)	16
2.2.2 Ángulo de hora solar (ω).....	17
2.2.3 Ángulos solares Principales	17
2.2.3.1 Zenit (φ)	18
2.2.3.2 Altitud solar (α)	18
2.2.3.3 Azimut solar (A_z)	18
2.2.4 Ángulos solares complementarios	18
2.2.4.1 Azimut de superficie (A_{zs}).....	19
2.2.4.2 Inclinación (β)	19
2.2.4.3 Ángulo de incidencia (θ).....	19
2.2.5 Duración astronómica del día	20
2.2.6 Ángulos para superficies de seguimiento	20

2.3 Radiación Solar Extraterrestre.....	22
2.3.1 Radiación Extraterrestre sobre superficie Horizontal.....	24
2.4 Radiación total terrestre sobre una superficie horizontal	25
2.4.1 Radiación media mensual directa y difusa.....	26
2.5 Evaluación del recurso solar en Concepción.....	27
Capítulo 3: Biomasa y recurso del Pellet Nacional	29
3.1 Generalidades de la biomasa	29
3.1.1 Definición	29
3.1.2 Biomasa como energía renovable	29
3.1.3 Fuentes de Biomasa para combustión directa.....	30
3.2 Pellets de madera.....	31
3.2.1 Características físicas según normas internacionales	32
3.2.2 Proceso productivo del pellets	32
3.2.2.1 Recepción y preparación de la fibra.....	32
3.2.2.2 Secado	34
3.2.2.3 Triturado.....	34
3.2.2.4 Pelletizado	34
3.2.2.5 Separación de finos o tamizado.....	35
3.2.2.6 Enfriamiento y Almacenado.....	35
3.2.3 Ventajas generales en la utilización de pellets como combustible	35
3.3 Pellets en la zona Centro-Sur de Chile	35
3.3.1 Empresas productoras de Pellets.....	36
3.3.2 Características del pellets nacional	37
Capítulo 4: Requerimientos energéticos para piscinas Temperadas cubiertas y Agua Caliente Sanitaria en Polideportivo.....	39
4.1 Demanda Energética de ACS	39

4.2 Consumo de energía en Piscina temperada cubierta	42
Capítulo 5: Tecnología Termosolar-Biomasa a utilizar	44
5.1 Concentrador Solar Parabólico	44
5.1.1 Generalidades.....	44
5.1.2 Concentrador solar parabólico comercial ABSOLICON	46
5.1.2.1 Principales Componentes	46
5.1.2.2 Rendimiento del concentrador Solar parabólico	49
5.1.2.2.1 Norma Americana.....	49
5.1.2.2.2 Norma Europea.....	52
5.1.2.3 Características técnicas del concentrador.....	52
5.2 Caldera a pellets.....	53
5.2.1 Funcionamiento y partes principales	53
5.2.2 Rendimiento de las calderas a pellets	55
5.2.3 Características técnicas de calderas comerciales	57
Capítulo 6: Cobertura energética para alternativas a evaluar.....	59
6.1 Alternativa 1: Cobertura con la caldera a GLP.....	59
6.2 Alternativa 2: Cobertura de la energía Termosolar	60
6.2.1 Método de la Carta F (curvas F-Chart).....	60
6.2.2 Cuantificación de concentradores solares ABSOLICON	63
6.3 Alternativa 3: Cobertura de la caldera a Pellets	66
Capítulo 7: Cálculo del circuito para los sistemas Termosolar y Biomasa	68
7.1 Generalidades de los circuitos de energía termosolar y biomasa	68
7.1.1 Subsistema de generación térmica	69
7.1.1.1 Captación Solar	69
7.1.1.2 Caldera a pellets	70

7.1.2 Subsistema de acumulación	70
7.1.2.1 Energía Termosolar	70
7.1.2.2 Caldera de biomasa	71
7.1.3 Subsistema auxiliar	72
7.1.4 Subsistema de circulación.....	72
7.1.4.1 Cañerías	72
7.1.4.2 Bombas de circulación	72
7.1.4.3 Válvulas de regulación.....	73
7.1.4.4 Vaso de expansión.....	76
7.1.5 Subsistema de Control	76
7.2 Diseño de circuito con energía termosolar	77
7.2.1 Subsistema captación	79
7.2.2 Subsistema de Acumulación.....	79
7.2.3 Subsistema auxiliar	83
7.2.4 Subsistema de circulación.....	84
7.2.4.1 Caudal de los circuitos	85
7.2.4.2 Diámetros y pérdidas de carga	87
7.2.4.3 Bombas de circulación	90
7.2.4.4 Aislación.....	91
7.2.4.5 Válvulas y tanque de expansión.....	92
7.3 Diseño del circuito que utiliza energía de Biomasa	94
7.3.1 Generación térmica	95
7.3.2 Subsistema de Acumulación e intercambiador de calor	96
7.3.3 Subsistema auxiliar	97
7.3.4 Subsistema de circulación.....	97
7.3.4.1 Caudal de los circuitos	98

7.3.4.2 Diámetros y pérdidas de carga	99
7.3.4.3 Bombas de circulación	100
7.3.4.4 Aislación.....	100
7.3.4.5 Válvulas y tanque de expansión	101
Capítulo 8: Evaluación económica	103
8.1 Análisis del ciclo de vida: Norma ASTM E917	103
8.2 Evaluación económica de la alternativa 1	105
8.3 Evaluación económica de la alternativa 2	106
8.4 Evaluación económica de la alternativa 3	107
Capítulo 9: Discusión y Conclusiones.....	109
Bibliografía.....	112
ANEXOS	113
ANEXO I: Ajuste diario único del concentrador durante los días del año.....	113
ANEXO II: Características técnicas de los principales equipos evaluados.....	114
ANEXO III: Detalle de los costos de inversión para ambos sistemas.....	121
Índice de tablas y figuras	
Tabla 2.1: Valores medios de los días y la declinación durante el año	25
Tabla 2.2: Duración del día y horas de Sol con cielo despejado mensual.....	27
Tabla 2.3: Índice de transparencia atmosférica, Irradiación media diaria y mensual sobre una superficie horizontal en Concepción	28
Tabla 2.4: Irradiación difusa y directa para Concepción.....	28
Tabla 3.1: Propiedades físicas de los pellets según diversas normas por país	33
Tabla 3.2: Propiedades del Pellets producido en la zona Centro-Sur de Chile.	37
Tabla 4.1: Criterios de consumo de ACS a 45°C en algunas instalaciones.....	40
Tabla 4.2: Temperatura media del agua en la Red	41

Tabla 4.3: Demanda energética para producción de ACS.....	41
Tabla 4.4: Temperatura del agua según el uso de la piscinas.....	42
Tabla 4.5: Demanda energética para piscina temperada cubierta	43
Tabla 4.6: Demanda total de energía mensual y anual.	43
Tabla 5.1: Tipos de colectores solares.....	45
Tabla 5.2: Concentradores parabólicos comerciales de ABSOLICON.....	46
Tabla 5.3: Inclinación media mensual del concentrador al medio día solar.....	48
Tabla 5.4: Radiación horaria directa sobre superficie y temperatura exterior en Concepción.....	52
Tabla 5.5: Características térmicas del Concentrador solar parabólico.....	53
Tabla 5.6: Rendimiento global del concentrador x10 T.	53
Tabla 5.7: Características de calderas a Pellets.	58
Tabla 6.1: Consumo y costos GLP mensual y anual	60
Tabla 6.2: Cobertura y aporte de energía solar.....	64
Tabla 6.3: Consumos y ahorro de GLP con proyecto Solar	66
Tabla 6.4: Consumos y ahorros de caldera a pellets.....	67
Tabla 7.1: Características de Acumulador para ACS	81
Tabla 7.2: Características de los Intercambiadores de placa.	83
Tabla 7.3: Diámetros normalizados y velocidades de fluido caloportador	88
Tabla 7.4: Pérdidas de carga para sistema de captación.....	89
Tabla 7.5: Diámetros y velocidades de cañerías destinados a Piscina y acumulación.....	89
Tabla 7.6: Pérdidas de carga para circuito de acumulación y piscina	90
Tabla 7.7: Pérdidas de carga para sistema auxiliar.....	90
Tabla 7.8: Modelo de bombas a utilizar en subsistemas	91
Tabla 7.9: Espesores referenciales de aislante respecto a la temperatura de trabajo.....	92
Tabla 7.10: Espesores de aislación de cañerías para diversos subsistemas.....	92
Tabla 7.11: Cuantificación de válvulas a utilizar	93

Tabla 7.12: Diámetros normalizados y velocidad del fluido de trabajo	99
Tabla7.13: Pérdidas de carga regulares y singulares en diversos circuitos	100
Tabla 7.14: Bombas de circulación a utilizar	100
Tabla 7.15: Espesores de aislación para los diversos circuitos del sistema	101
Tabla 7.16: Válvulas para el sistema de biomasa.....	101
Tabla 8.1: Costo total del proyecto utilizando caldera a gas	106
Tabla 8.2: Costo total del sistema termosolar.....	107
Tabla 8.3: Costo total del sistema de biomasa.....	108
Figura 2.1: Desplazamiento anual de la tierra.	13
Figura 2.2: Meridianos y Paralelos.....	14
Figura 2.3: Ecuación del tiempo solar con respecto a los meses del año.	15
Figura 2.4: Declinación solar en los solsticios, referidos al hemisferio Sur.	17
Figura 2.5: Ángulos Solares Principales medidos del hemisferio Norte.....	17
Figura 2.6: Diagrama de Ángulos complementarios.....	19
Figura 2.7: Radiación Extraterrestre de superficies con seguimiento y fijas en los solsticios de invierno (líneas segmentadas) y verano (líneas sólidas).	21
Figura 2.8: Variación de la radiación solar extraterrestre durante el año.....	24
Figura 3.1: Biomasa vegetal como energía renovable.....	30
Figura 3.2: Pellets de madera a granel.....	31
Figura 3.3: Esquema simplificado de la producción de Pellets.....	32
Figura 3.4: Empresas productoras de Pellets.....	36
Figura 3.5: Costo de diversos tipos de energía.....	38
Figura 5.1: Esquema básico de un colector solar plano y concentrador para líquidos.....	44
Figura 5.2: Principales componentes del concentrador ABSOLICON	46
Figura 5.3: Reflector y tubo receptor del colector x10 T	47

Figura 5.4: Actuadores de giro y bastidores de sujeción del colector x10 T.....	48
Figura 5.5: Balances de energía en el PTC.....	49
Figura 5.6: Principales componentes de una caldera a Pellets.	54
Figura 5.7: alternativas de almacenaje para Biomasa.....	55
Figura 5.8: Esquema simplificado de una caldera.	55
Figura 6.1: VAN respecto a la cantidad de concentradores.	65
Figura 7.1: Configuración básica que conforma el sistema solar.....	69
Figura 7.2: Configuración básica de sistema con biomasa.....	69
Figura 7.3: Interacumulador (a) y acumulador (b) de ACS.....	70
Figura 7.4 Intercambiador de calor de placas.....	71
Figura 7.5: Bomba de circulación.....	73
Figura 7.6: Válvula motorizada.....	73
Figura 7.7: Válvula de bola	74
Figura 7.8: Válvula termostática	74
Figura 7.9: Válvula Check.....	74
Figura 7.10: Válvula de seguridad.....	75
Figura 7.11: Válvula de equilibrado.....	75
Figura 7.12: Válvula eliminadora de aire	75
Figura 7.13: Vaso de expansión.	76
Figura 7.14: Demanda energética media durante un día.	77
Figura 7.15: Sistema Termosolar a evaluar.	78
Figura 7.16: Vista superior de concentradores con conexión serie-paralelo.....	79
Figura 7.17: Sistema térmico utilizando caldera a pellets.	95
Figura 8.1: Flujos de dinero durante en el horizonte de evaluación.....	103
Figura 8.2: Precio del GLP durante un periodo de 15 años.....	105

Capítulo 1: Introducción

1.1 Problemática y origen del proyecto

El mundo de hoy se caracteriza por poseer un constante incremento en el desarrollo y la modernidad a nivel personal, social y global. Por ello vivimos en un mundo globalizado, eso conlleva que, a medida que aumenta la población y la modernidad, los recursos energéticos sean cada vez más necesarios para llevar una vida con normalidad. Por esa causa, cada día se requiere generar mayor cantidad de energía ya sea eléctrica y/o térmica, o como en este caso, calentar un fluido para aplicaciones de agua caliente de consumo sanitario y piscina temperada cubierta para satisfacer demandas en viviendas u edificios, hoteles, centros deportivos entre otros.

Para producir dicha energía térmica se utilizan sistemas convencionales, los cuales son muy cuestionados a nivel social puesto que utilizan combustibles fósiles, son de fuentes agotables, cada día son más costosos y los cuales generan un impacto negativo a su entorno y al medio ambiente.

Debido a la problemática de las energías convencionales para producir energía, se está implementando en Chile el uso de energías no convencionales como lo son la energía termosolar y la biomasa, la primera de fuente inagotable y la segunda apoyada de la gran actividad forestal en la zona Centro-Sur del país.

1.2 Objetivos del proyecto

1.2.1 Generales

Evaluar el suministro de energía para producir ACS¹ y para operar una piscina temperada cubierta a partir se sistema termosolar utilizando concentradores solares parabólicos o biomasa, utilizando caldera a pellets de madera para un complejo deportivo ubicado en la ciudad de Concepción.

1.2.2 Específicos

Con respecto a la energía Termosolar:

¹ Agua Caliente Sanitaria

- Conocer y evaluar el recurso solar disponible en Concepción.
- Evaluar, mediante método de Carta-F, la cobertura solar de concentradores solares parabólicos ABSOLICON para satisfacer requerimientos de ACS y Piscina temperada cubierta.
- Desarrollar ingeniería básica de la instalación propuesta.

Con respecto a la Biomasa:

- Conocer y determinar los recursos de pellets a nivel nacional.
- Dimensionar capacidad de la caldera a pellets, para los requerimientos energéticos de ACS y piscina temperada cubierta.
- Desarrollar ingeniería básica de la instalación propuesta.

Para ambos casos:

- A través del método de ciclo de vida, Norma ASTM E917, determinar cuál es la alternativa más viable para ambos propósitos.

1.3 Alcances del tema a desarrollar

El presente proyecto de habilitación profesional tiene como finalidad analizar y determinar qué tipo de energía presenta mayores ventajas técnicas y principalmente económicas a la hora de implementarlas en un complejo deportivo que ya opera con energía tradicional.

Cabe señalar que este proyecto no está asociado a un recinto físico existente, por lo cual la demanda energética y algunos costos de instalación simplemente se estimaron en base a criterios de cursos anteriores y/o literatura, ya que la finalidad es obtener un resultado tangible.

Capítulo 2: Recurso solar para Concepción

2.1 Generalidades

La tierra se desplaza a través de un eje elíptico alrededor del Sol en aproximadamente 365 días Julianos (ver figura 2.1), la cual implica que la distancia de esta al sol varía según el día del año. La distancia media de la tierra al sol según la distancia más larga (Afelio) y la más corta (Perihelio) es aproximadamente $149,6 \times 10^6 [km]$. También la tierra presenta un movimiento de rotación sobre su eje terrestre la cual demora aproximadamente 24 horas.

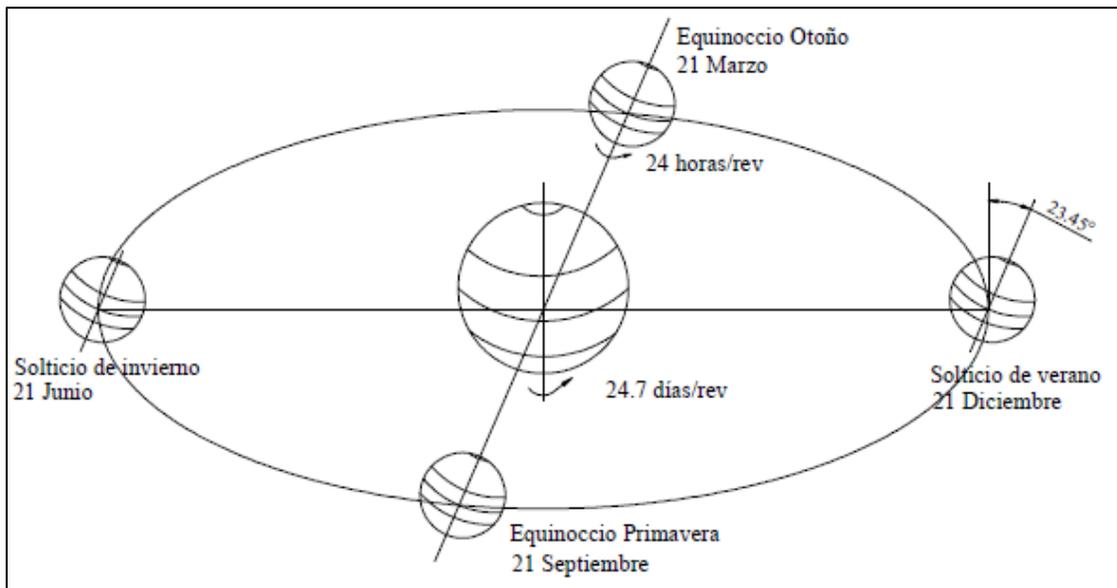


Figura 2.1: Desplazamiento anual de la tierra.

Según la figura 2.2 la tierra se divide en Paralelos de Latitud, en el hemisferio Norte se considera Latitud positiva variando entre 0° y 90° , en el hemisferio Sur se considera negativa variando entre 0° y -90° . El paralelo de 0° se le llama ecuador terrestre.

La tierra también se divide en Meridianos de Longitud, se considera como 0° el que pasa por Greenwich, Inglaterra. Hacia el Este como para el Oeste, los meridianos avanzan de 0° a 180° .

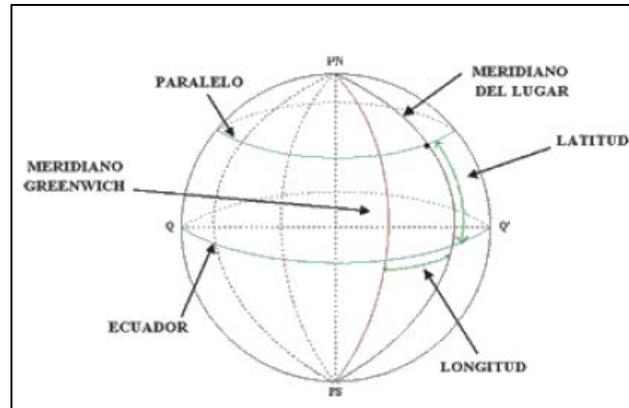


Figura 2.2: Meridianos y Paralelos.

2.1.1 Recurso solar para el observador terrestre

Cuando se habla de recurso solar, se refiere a la radiación total recibida sobre una superficie horizontal durante un período de tiempo, esta radiación resulta ser la suma de las radiaciones directa (recibida directamente desde el sol) y difusa (posee dirección cambiada debido a la dispersión atmosférica y reflexión en objetos). Estos valores de radiación se pueden obtener de fuentes externas (bases de datos de la NASA o WRDC², software etc.) o la estimación mediante el uso de modelos matemáticos (ver sección 2.3 en adelante)

2.1.2 Hora solar

Es aquel tiempo que se basa en el movimiento angular del sol a través del cielo, por ello es usado para obtener el ángulo horario solar, donde el medio día ocurre cuando el sol cruza el meridiano local. Sin embargo, esta medida no coincide necesariamente con el tiempo local del observador.

Por lo anterior es necesario realizar 3 correcciones para convertir la hora local (h_l) a la hora solar (h_s), estas son:

- Corrección de Longitud: Esta se debe a la diferencia de longitud entre el meridiano local del observador y el meridiano sobre el cual está basada la hora local que es el meridiano de Greenwich, para ello se debe saber que el sol toma 4 minutos en recorrer 1° .
- Corrección de Tiempo: Es necesario considerar que a pesar que la tierra gira aproximadamente sobre su eje polar 24 horas, sufre varias perturbaciones en su recorrido a través del Sol debido a su excentricidad e inclinación del eje polar, provocando así diferencias de velocidad orbital durante un

² Centro mundial de datos de Radiación

año y con ello variaciones en el tiempo. Estas variaciones se consideran en la ecuación del tiempo (E) y se puede calcular como:

$$E = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \text{ [min]} \quad (2.1)$$

Donde

$$B = \frac{360(n-81)}{364} ; 1 \leq n \leq 365 \quad (2.2)$$

Cabe destacar que la ecuación del tiempo depende de los días del año (n) e indica el tiempo que este se atrasa o adelanta a la hora solar media. Según el gráfico de la ecuación del tiempo (figura 2.3), a finales de octubre el tiempo solar difiere en aprox. 16 minutos, con respecto a la hora sol (h_s)

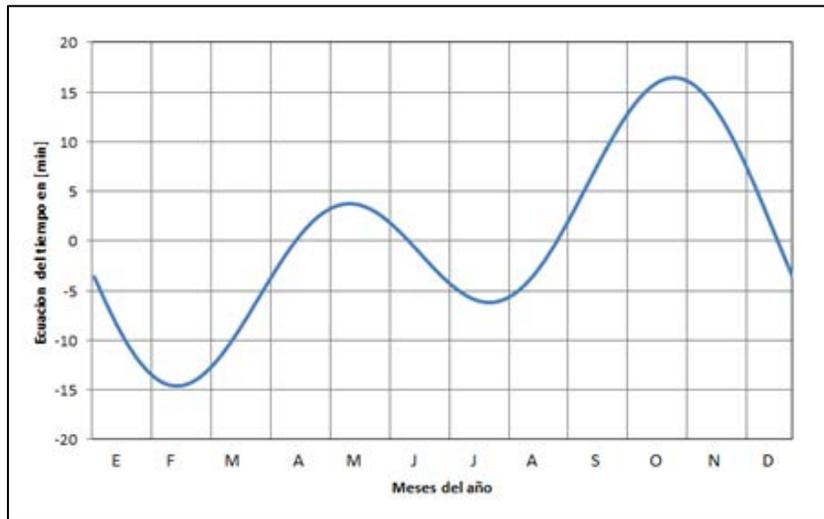


Figura 2.3: Ecuación del tiempo solar con respecto a los meses del año.

- Corrección por horario verano: En nuestro país, al igual que en otros a nivel mundial se utiliza un cambio de hora en verano para así obtener un mejor aprovechamiento de la luz solar y por lo tanto un ahorro de energía.

Luego, la ecuación para obtener la hora solar (h_s) corresponde a:

$$h_s = h_l - X + \frac{E}{60} + \frac{4(m_{con} - m_{loc})}{60} \quad (2.3)$$

Donde

h_l : Hora local medida en [hr].

X: Corrección horario de verano. X=1 hr en verano; X=0 hr en invierno.

E: Ecuación del tiempo, medido en [min]

m_{con} : Meridiano convencional en grados medidos al oeste de Greenwich, para Chile equivale a 60° Oeste.

m_{loc} : Meridiano local, en grados medidos al Oeste de Greenwich.

2.2 Ángulos solares

Las aplicaciones de energía solar requieren información de la ubicación del Sol en el cielo durante un momento determinado. Las relaciones geométricas entre un plano de orientación arbitraria y la radiación directa incidente o en otras palabras, la posición relativa entre el sol y el plano en cuestión pueden ser descritas en términos de ángulos.

Para analizar los ángulos solares, es necesario conocer los conceptos de declinación y ángulo de hora solar.

2.2.1 Declinación (δ)

Corresponde a la posición angular del sol al mediodía con respecto al plano del ecuador (centro de la tierra). Esta puede ser descrita por la ecuación de Cooper (1969):

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.4)$$

La declinación depende de los días Julianos del año, $1 \leq n \leq 365$

Este ángulo se mide para un sistema de referencia con el eje z en el eje Norte-Sur. Debido a la inclinación propia de la tierra, este ángulo tiene un valor de 23,45° en solsticio de invierno y -23,45° en solsticio de verano, como se muestra en la figura 2.4.

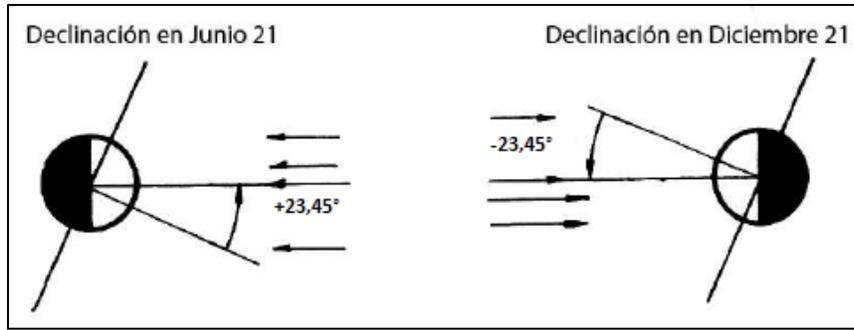


Figura 2.4: Declinación solar en los solsticios, referidos al hemisferio Sur.

2.2.2 Ángulo de hora solar (ω)

Es el desplazamiento angular Este u Oeste del Sol con respecto al meridiano local debido a la rotación de la tierra en su eje a una velocidad angular de 15° por hora ($\pi / 43200 \text{ rad} / \text{s}$). Se toma como referencia $\omega = 0$ al mediodía solar, en la mañana este ángulo es negativo y durante la tarde, positivo.

Para obtener este ángulo se utiliza la hora solar, obtenida de la ecuación (2.3). Así:

$$\omega = 15 \times (h_s - 12) \tag{2.5}$$

2.2.3 Ángulos solares Principales

Son los ángulos básicos que nos permiten conocer la ubicación del Sol en el cielo, según la figura 2.5 estos son el Azimut Solar (A_z), la altitud (α) y el Zenit (φ).

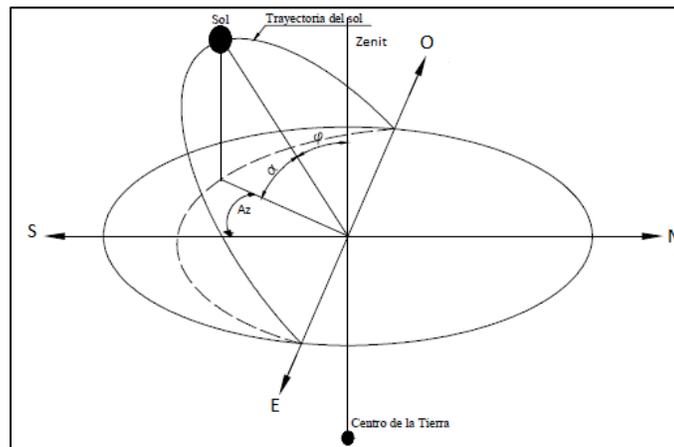


Figura 2.5: Ángulos Solares Principales medidos del hemisferio Norte.

2.2.3.1 Zenit (φ)

Consiste en una línea perpendicular al plano horizontal del observador, el ángulo entre el rayo solar y el Zenit se denomina ángulo del Zenit (φ).

2.2.3.2 Altitud solar (α)

Es el ángulo que se forma entre el rayo solar y el plano horizontal del observador, como se observa en la figura 2.5. Este es medido desde planos paralelos al Zenit. Además, este ángulo se complementa con el zenit, formando un ángulo recto, así:

$$\alpha + \varphi = 90^\circ \quad (2.6)$$

Para obtener la altitud Solar, se puede emplear la siguiente expresión:

$$\sin(\alpha) = \cos(\varphi) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\omega) \cos(\delta) \quad (2.7)$$

Donde

L : Latitud.

2.2.3.3 Azimut solar (A_z)

Es el ángulo formado en el plano horizontal por la proyección del rayo solar, medido desde el Sur en el hemisferio Norte y en nuestro caso, medido desde el norte para el hemisferio Sur. El Azimut Solar depende de la hora del día (relacionado al ángulo horario), de la Latitud (ubicación geográfica) y de la declinación (Solsticios), por lo tanto, el Azimut lo podemos obtener como:

$$\sin(A_z) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(\alpha)} \quad (2.8)$$

2.2.4 Ángulos solares complementarios

Son aquellos ángulos que relacionan los rayos solares con respecto a un plano de dirección e inclinación arbitraria. Estos son, Azimut de superficie (A_{zs}), Inclinación (β), y el ángulo de incidencia (θ), como se muestra en la figura 2.6.

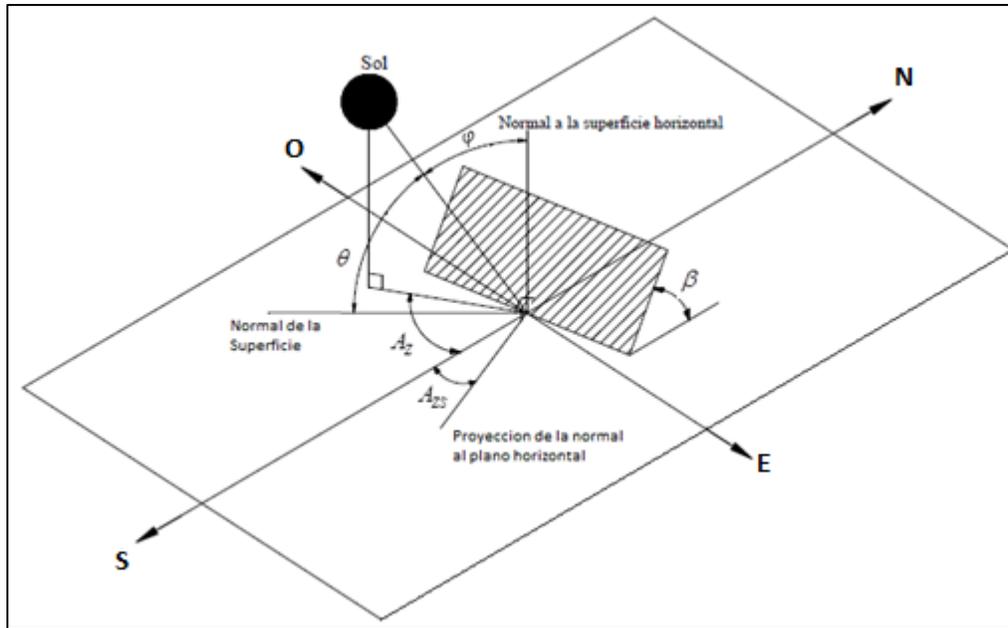


Figura 2.6: Diagrama de Ángulos complementarios.

2.2.4.1 Azimut de superficie (A_{zs})

Corresponde al ángulo de desviación de la proyección en el plano horizontal de la normal de la superficie con respecto al meridiano local, con cero hacia el Sur, al Este negativo y al Oeste positivo.

2.2.4.2 Inclinación (β)

Es el ángulo de inclinación que posee una superficie arbitraria con respecto al plano horizontal. Cuando $\beta = 0^\circ$, la superficie será horizontal cuya normal es paralela al zenit, esto implica que el ángulo del zenit (φ) con el de incidencia (θ), son los mismos.

2.2.4.3 Ángulo de incidencia (θ)

Es el ángulo que se forma entre el haz de radiación directa y la normal de una superficie arbitraria. Este relaciona los ángulos básicos y los complementarios ilustrados en las figuras 2.5 y 2.6, así la ecuación corresponde a:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta)\sin(L)\cos(\beta) - \sin(\beta)\cos(L)\sin(\beta)\cos(A_{zs}) + \cos(\delta)\cos(L)\cos(\beta)\cos(\omega) \\ & + \cos(\delta)\sin(L)\sin(\beta)\cos(A_{zs})\cos(\omega) + \cos(\delta)\sin(\beta)\sin(A_{zs})\sin(\omega) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Esta ecuación es general para obtener el ángulo de incidencia del haz de radiación sobre una superficie de cualquier dirección e inclinación.

2.2.5 Duración astronómica del día

En el ámbito del recurso solar, conocer el tiempo que el sol se encuentra visible y por ende la duración del día toma relevancia cuando se trata de aprovechar al máximo la radiación que incide directamente sobre la tierra.

Según la ecuación (2.6) cuando el Zenit vale 90° es debido a que la altitud solar es igual a cero. Ello ocurre en la salida y en la puesta del Sol. Si consideramos (ω_s) como el ángulo horario a la puesta del sol, resolviendo la ecuación (2.7), se tiene:

$$\cos(\omega_s) = \frac{-\sin(L)\sin(\delta)}{\cos(L)\cos(\delta)} = -\tan(L)\tan(\delta) \quad (2.10)$$

Donde el ángulo horario a la salida del sol es negativo y a la puesta positivo, avanzando a 15° por hora, se puede decir que las horas de luz solar en un día equivalen a:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1} [-\tan(L)\tan(\delta)] \quad (2.11)$$

Donde

N: Duración del día en [hr]

2.2.6 Ángulos para superficies de seguimiento

Algunos colectores realizan un seguimiento solar para poder maximizar la radiación del haz incidente. Los ángulos utilizados para ese efecto son el azimut de superficie (A_{zs}) y el ángulo de incidencia (θ). Los movimientos generalmente son del tipo rotacional, ya sea, sobre un eje o sobre 2 ejes.

En la práctica se utilizan con mayor frecuencia los que rotan sobre un eje, estos podrían tener cualquier orientación, ya sea vertical o paralela a los ejes de la tierra, pero usualmente es horizontal al eje Oeste-Este o al eje Norte-Sur. La figura 2.7 muestra la radiación extraterrestre sobre una superficie fija con una pendiente igual a la latitud ($\beta = L = 45^\circ$) en la dirección Norte-Sur (N-S) y

superficies que siguen el Sol sobre el eje horizontal Este-Oeste (E-W), en los solsticios de invierno y verano.

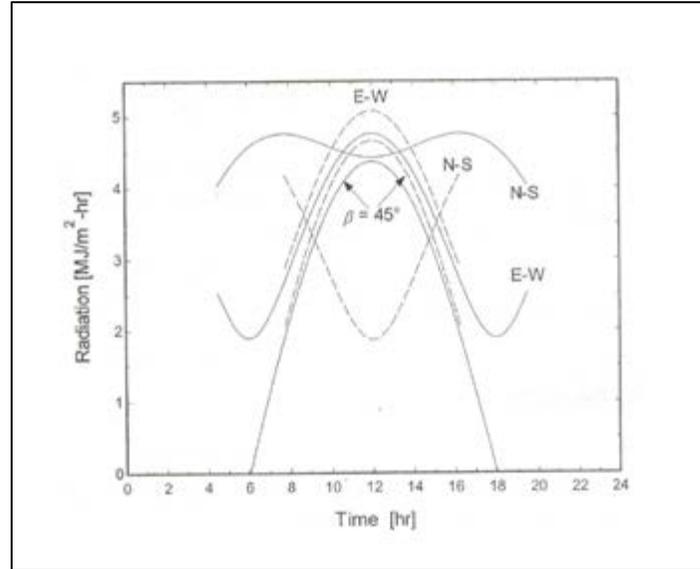


Figura 2.7: Radiación Extraterrestre de superficies con seguimiento y fijas en los solsticios de invierno (líneas segmentadas) y verano (líneas sólidas).

Para poder maximizar el haz de radiación incidente, se deben realizar ajustes para disminuir el ángulo de incidencia, estos ajustes pueden ser aplicados una vez al día o de forma continua.

Para realizar un ajuste único al mediodía, en un plano que rota sobre los ejes Este-Oeste, y además para que el haz de radiación sea normal a la superficie, se tiene entonces:

$$\cos(\theta) = \sin^2(\delta) + \cos^2(\delta) \cos(\omega) \quad (2.12a)$$

Donde la pendiente de la superficie será fija para cada día,

$$\beta = |L - \delta| \quad (2.12b)$$

El azimut de superficie para cada día dependerá de la latitud y la declinación y puede ser 0° o 180°, entonces

$$A_{zs} = \begin{cases} 0^\circ & \text{si, } L - \delta > 0 \\ 180^\circ & \text{si, } L - \delta \leq 0 \end{cases} \quad (2.12c)$$

Para minimizar el ángulo de incidencia con un ajuste continuo sobre los ejes Este-Oeste, se tiene:

$$\cos(\theta) = \left[1 - \cos^2(\delta) \sin^2(\omega)\right]^{1/2} \quad (2.13a)$$

La pendiente de esta superficie viene dada por:

$$\tan(\beta) = \tan(\varphi) |\cos(A_z)| \quad (2.13b)$$

El azimut de superficie para este modo de orientación cambiará entre 0° y 180° si el Azimut solar pasa a través de $\pm 90^\circ$. Para cualquiera de los 2 hemisferios:

$$A_{zs} = \begin{cases} 0^\circ & \text{si, } |A_z| < 90 \\ 180^\circ & \text{si, } |A_z| \geq 90 \end{cases} \quad (2.13c)$$

De la figura 2.7 es evidente que el seguimiento solar puede cambiar significativamente la distribución en el tiempo del haz de radiación incidente. En la práctica, las diferencias será menor que la indicada por la figura debido a las nubes y al índice de transparencia atmosférica.

2.3 Radiación Solar Extraterrestre

Según las leyes del Planck se puede obtener la distribución del espectro de radiación emitida de un cuerpo negro. Si integramos este espectro de radiación respecto a la longitud de onda, se obtiene el total de energía emitida por un cuerpo negro, esta se conoce como la ecuación de Stefan-Boltzmann (E_b):

$$E_b = \sigma T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.14)$$

Donde

σ : Constante de Stefan-Boltzmann es igual a $5,6697 \times 10^{-8} \left[W / m^2 K^4 \right]$

T^4 : Temperatura del cuerpo que emite radiación térmica en $\left[K^4 \right]$

Según la ecuación anterior es válido afirmar que todo cuerpo (independiente del estado físico que posea su materia), sobre el cero absoluto, emite radiación térmica en forma de ondas electromagnéticas, de modo que el Sol también se rige bajo esta ley emitiendo radiación térmica.

El Sol es una estrella de forma esférica, se encuentra en combustión continua y está compuesta principalmente por Hidrógeno (73,46%) y Helio (24,85%), posee un diámetro de $1,39 \times 10^9 [m]$ y una temperatura efectiva como cuerpo negro de $5777 [K]$. Si aplicamos la ecuación (2.14) tendremos:

$$E = 5,6697 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right] \times 5777^4 [K^4] = 63,149 \times 10^6 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Si luego multiplicamos por el área esférica del Sol:

$$E = 63,149 \times 10^6 \left[\frac{W}{m^2} \right] \times 6,06 \times 10^{18} [m^2] = 3,831 \times 10^{26} [W]$$

Luego la radiación térmica por unidad de tiempo emitida por el Sol equivale aproximadamente a $3,831 \times 10^{20} [MW]$ emitiéndose a todas las direcciones en el espacio.

La energía solar medida fuera de la atmósfera terrestre en un plano perpendicular a la radiación incidente y a una distancia media entre el Sol y la tierra se le conoce como constante solar (G_{sc})

Como la órbita de la tierra es elíptica, la radiación que incide en un plano normal fuera de la atmósfera terrestre varía en el enésimo día del año. Esta se le conoce como radiación extraterrestre (G_{on}) y se puede obtener como:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad (2.15)$$

Dónde:

G_{on} : Radiación extraterrestre medida desde un plano normal a la radiación, variando en un rango de $\pm 3,3\%$ en $[W / m^2]$

G_{sc} : Constante Solar $[W / m^2]$. Según el Centro de Radiación Mundial, el valor de la constante solar equivale a $1367 [W / m^2]$ con un porcentaje de error del 1%.

Luego el gráfico de esta relación se puede ver a continuación:

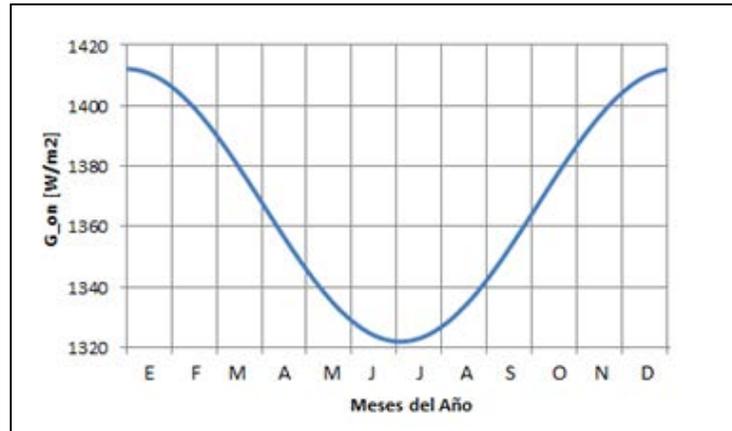


Figura 2.8: Variación de la radiación solar extraterrestre durante el año.

Parte de esta radiación incidente es reflejada por la atmósfera de vuelta al espacio, otra parte es absorbida por la humedad presente en el aire o es dispersada por las nubes u otros objetos en su paso, llegando así a la tierra, se le conoce como radiación difusa. La radiación que alcanza directamente la tierra se le conoce como radiación directa y la suma de ambas radiaciones se conoce como radiación total.

2.3.1 Radiación Extraterrestre sobre superficie horizontal

En un plano horizontal a nivel de suelo los cálculos de radiación se hacen más convenientes usando la radiación teóricamente posible que estaría disponible si no hubiera atmósfera, luego la radiación incidente sobre el plano horizontal para cualquier momento entre la salida y puesta del Sol resulta combinando las ecuaciones (2.7) y (2.15), así:

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \times [\sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\omega) \cos(\delta)] \quad (2.16)$$

Donde

G_o : Radiación incidente sobre un plano horizontal fuera de la atmósfera en $[W / m^2]$.

La energía radiante por unidad de área y expresada en $[W / m^2]$ también se le conoce como Irradiancia, y que integrándola durante un intervalo de tiempo específico se obtiene lo que se conoce como la Irradiación, que corresponde a la energía que incide por unidad de área medida en $[J / m^2]$

o $[kWh/m^2]$. Esto se obtiene integrando la ecuación (2.16) durante el periodo entre la salida y la puesta del sol (duración del día), así:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{3,6 \pi \times 10^6} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \times \left[\cos(L) \sin(\omega_s) \cos(\delta) + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin(L) \sin(\delta) \right] \quad (2.17)$$

Dónde:

H_0 : Irradiación solar sobre un plano horizontal diario en $[kWh/m^2 \text{ dia}]$

De la ecuación (2.17) resulta útil obtener el valor diario promedio mensual de la Irradiación sobre un plano horizontal, donde se utiliza para latitudes que varían entre -60° y $+60^\circ$: Para ello se modifican las variables (n) y (δ) por el valor medio del enésimo día de cada mes (\bar{n}_0) y su respectivo valor de la declinación $(\bar{\delta})$, que son mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 2.1: Valores medios de los días y la declinación durante el año. Fuente [1]

Mes	Dias al mes	Fecha(día del mes)	\bar{n}_0	$\bar{\delta}$
Enero	31	17	17	-20,9
Febrero	28	16	47	-13,0
Marzo	31	16	75	-2,4
Abril	30	15	105	9,4
Mayo	31	15	135	18,8
Junio	30	11	162	23,1
Julio	31	17	198	21,2
Agosto	31	16	228	13,5
Septiembre	30	15	258	2,2
Octubre	31	15	288	-9,6
Noviembre	30	14	318	-18,9
Diciembre	31	10	344	-23,0

2.4 Radiación total terrestre sobre una superficie horizontal

Los datos de radiación son los mejores para obtener un promedio sobre la radiación incidente en la superficie terrestre. Cuando se carece de dichos datos, se debe recurrir a relaciones empíricas para obtenerlo. Para ello se utiliza la ecuación de regresión de Angström modificada por Page (1964), esta ecuación permite relacionar la radiación promedio diaria en la tierra con la transparencia atmosférica y la radiación extraterrestre:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \quad (2.18)$$

Dónde:

\bar{H}/\bar{H}_0 : Índice de transparencia atmosférica, \bar{K}_T

\bar{H} : Irradiación media mensual horizontal terrestre en $[kWh/m^2 \text{ dia}]$.

\bar{H}_0 : Irradiación extraterrestre media mensual a partir de la ecuación (2.17) en $[kWh/m^2 \text{ dia}]$.

a, b : Constantes que varían según la ubicación, vale decir, el tipo de clima.

\bar{n} : Media mensual de horas de Sol con cielo despejado en $[hr]$. (Ver tabla 2.2).

\bar{N} : Media mensual de la duración del día obtenido de la ecuación (2.11) en $[hr]$ (Ver tabla 2.2)

2.4.1 Radiación media mensual directa y difusa

Como se menciona anteriormente (secciones 2.1.2 y 2.3), la radiación total disponible en la tierra está compuesta principalmente por la suma entre la radiación directa y difusa, ya que una pequeña parte corresponde a la radiación albedo (reflejada). Para obtener la radiación difusa a menudo se utiliza el modelo empírico de Liu and Jordan (1977), el cual fue modificado por Collares-Pereira and Rabl (1979), donde el modelo matemático a utilizar dependerá del ángulo horario a la puesta del Sol (ω_s) como se puede observar en la tabla 2.2:

Para $\omega_s \leq 81,4^\circ$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,56\bar{K}_T + 4,189\bar{K}_T^2 - 2,137\bar{K}_T^3 \quad (2.19a)$$

Para $\omega_s > 81,4^\circ$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 1,821\bar{K}_T^3 \quad (2.19b)$$

Luego la Irradiación difusa (\bar{H}_d) es el producto entre el valor del polinomio (en función del índice de transparencia atmosférica) y la radiación terrestre total, visto en la sección 2.4 (ver tabla 2.3). Así la radiación directa corresponde a:

$$\bar{H}_D = \bar{H} - \bar{H}_d \tag{2.20}$$

Donde

\bar{H}_D : Irradiación directa media mensual en $[kWh/m^2 \text{ dia}]$

2.5 Evaluación del recurso solar en Concepción.

Conocido los conceptos de energía solar descritos anteriormente, es posible evaluar el recurso solar para cualquier ciudad ubicada tanto en Chile como en el mundo.

El lugar donde se desarrollará el proyecto, corresponde a Concepción. Esta ciudad se encuentra en la VIII región de Chile y posee una Latitud de $-36,46^\circ$ y Longitud de $-73,06^\circ$.

Tabla 2.2: Duración del día y horas de Sol con cielo despejado mensual. Fuente [Propia]

Mes	ω_s	\bar{N} horas	\bar{n}^* horas
Enero	106,1	14,15	9,5
Febrero	99,6	13,28	8,8
Marzo	91,8	12,23	7,5
Abril	83,1	11,08	5,6
Mayo	75,7	10,09	3,5
Junio	72,0	9,59	2,6
Julio	73,6	9,82	3,2
Agosto	80,0	10,67	4,4
Septiembre	88,4	11,79	5,6
Octubre	97,1	12,94	6,7
Noviembre	104,4	13,92	7,8
Diciembre	108,0	14,40	9,0

(*): Fuente [2]

Concepción al tratarse de una ciudad húmeda y de frecuente lluvia para el invierno, los valores de a y b de la ecuación (2.18) se considerarán como 0,22 y 0,5 respectivamente. De esa manera, se obtiene el índice de transparencia atmosférica. Si luego se aplica la ecuación (2.17) ajustado a los valores promedio mensual (tabla 2.1), se obtiene la Irradiación media ya sea diaria o mensual, como se muestra a continuación:

Tabla 2.3: Índice de transparencia atmosférica, Irradiación media diaria y mensual sobre una superficie horizontal en Concepción. Fuente [Propia]

Mes	\bar{K}_T	H kWh/m ² día	\bar{H} kWh/m ² mes
Enero	0,56	6,67	206,9
Febrero	0,55	5,93	165,9
Marzo	0,53	4,70	145,8
Abril	0,47	3,20	96,0
Mayo	0,39	1,98	61,2
Junio	0,36	1,50	45,1
Julio	0,38	1,75	54,1
Agosto	0,43	2,54	78,7
Septiembre	0,46	3,66	109,8
Octubre	0,48	4,83	149,7
Noviembre	0,50	5,81	174,4
Diciembre	0,53	6,55	202,9

Como se verá más adelante, se utilizará un concentrador solar donde la inclinación de la superficie varía en el tiempo, a éste se le aplicará un ajuste promedio al mediodía. Debido a que este tipo de colector utiliza sólo la radiación directa, resulta necesario conocer su valor.

Como no existen datos de radiación difusa y directa exacta para los ángulos de inclinación (expuestos en la tabla 5.3) se deben evaluar. Conocido \bar{K}_T se aplica en las ecuaciones (2.19), donde se puede conocer qué porcentaje de la radiación disponible es difusa, y por ende conocer el valor aproximado de la radiación directa durante un período de tiempo (ecuación 2.20).

Tabla 2.4: Irradiación difusa y directa para Concepción. Fuente [Propia]

Mes	\bar{H}_d kWh/m ² mes	\bar{H}_D kWh/m ² mes
Enero	78,08	128,78
Febrero	63,29	102,63
Marzo	58,92	86,88
Abril	43,74	52,21
Mayo	31,16	30,09
Junio	25,22	19,91
Julio	28,25	25,86
Agosto	36,92	41,78
Septiembre	51,76	58,08
Octubre	67,31	82,35
Noviembre	74,83	99,60
Diciembre	80,87	122,03

Capítulo 3: Biomasa y recurso del Pellet Nacional

3.1 Generalidades de la biomasa

3.1.1 Definición

En términos generales, el término biomasa define el conjunto de la materia vegetal, considerando tanto los árboles, plantas, arbustos y hierbas (biomasa vegetal), como también a la materia orgánica procedente del ciclo alimentario de las especies animales vegetarianas (biomasa animal). Para el presente trabajo, se hará referencia a la biomasa vegetal. En términos energéticos, la biomasa es la energía solar captada por los organismos fotosintéticos y almacenados en su estructura molecular.

La utilización de la biomasa para obtener calor es tan antigua como las primeras hogueras de leña que utilizaron los hombres prehistóricos como sistema único de calefacción en sus cuevas. Después de miles de años, parece que esta tecnología puede ser parte de la solución al grave problema que plantea la utilización de combustibles fósiles.

3.1.2 Biomasa como energía renovable

La característica esencial de la biomasa como combustible, es que constituye un ciclo cerrado energético y por tanto renovable, según se muestra en la figura 3.1.

Las especies vegetales absorben la energía solar mediante la fotosíntesis, energía que se fija y almacena en forma de carbono mediante la transformación del CO_2 ambiental, el agua y diversos minerales, en materias orgánicas altamente energéticas. La combustión directa de esta “biomasa” vegetal se realiza mediante su oxidación total en contacto con el oxígeno del aire, liberándose en el proceso energía térmica y productos de combustión como agua, CO_2 y cenizas. El CO_2 liberado es igual o menor al absorbido, por lo que se asegura su equilibrio en la atmósfera (ciclo neutro). A su vez, las cenizas servirán de abono en el proceso de fotosíntesis de nuevas plantaciones, cerrándose así el ciclo. Es muy importante resaltar que en todo éste proceso no se liberan productos nocivos, lo que supone una gran ventaja medioambiental frente a los combustibles fósiles.

Gracias al ciclo descrito anteriormente, podemos catalogar a la biomasa como una energía renovable. A esto debemos añadir que el cómputo final energético es positivo, dado que la energía

convencional necesaria para la obtención de la biomasa y su posterior procesamiento y transporte, es muy inferior a la energía obtenida en su combustión.

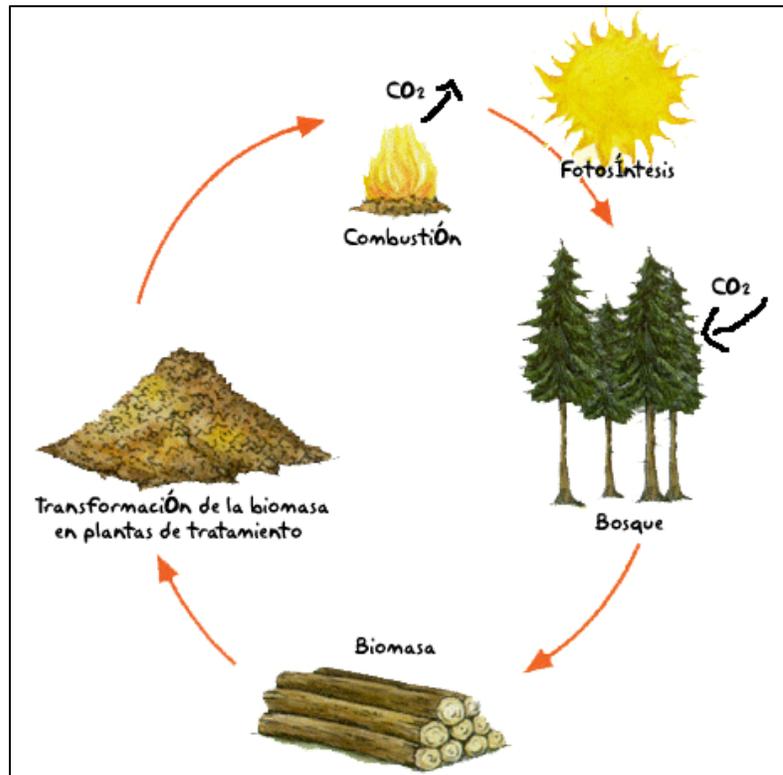


Figura 3.1: Biomasa vegetal como energía renovable.

3.1.3 Fuentes de Biomasa para combustión directa

Existen especies vegetales con un mayor contenido energético que otras, pero sin embargo existen otros criterios que determinan cuáles son las más adecuadas en función de su localización y extensión, el coste de su procesamiento, y el impacto medioambiental que supone su explotación a gran escala. Básicamente existen dos grupos: los residuos y los cultivos energéticos.

- *Los residuos* pueden producirse de forma espontánea en la naturaleza, pero sobre todo debidos a la actividad industrial del hombre, que se pueden clasificar en residuos agrarios e industriales. Dentro de los residuos agrícolas, tenemos los que se obtienen con las podas de olivos, árboles frutales y viñedos como también residuos agrícolas herbáceos, que están compuestos básicamente por paja de cereal y cabellera de maíz, donde su utilización sólo es aconsejable cuando su retirada no afecte a la fertilidad del suelo.

Los residuos industriales se obtienen de la transformación maderera (explotación y manufacturación) y de la industria agroalimentaria (aceite de oliva, frutos secos, conservas vegetales, etc.)

- *Los cultivos energéticos* son materia vegetal que procede de cultivos realizados para su combustión y conversión en energía térmica. Están muy cuestionados dado que muchos de éstos cultivos se utilizan en la industria alimentaria, por lo que podría aumentar su precio. En cualquier caso, la rentabilidad es baja, por lo que son cuestionados como alternativa energética.

Actualmente se da prioridad a la utilización de los recursos excedentes o residuos frente a la producción de cultivos energéticos debido a que constituyen una biomasa que ya existe, y por lo tanto no es necesario producirla, y cuya eliminación (muchas veces necesaria) constituye un problema grave además de suponer un proceso costoso. Este aspecto confiere a la utilización de residuos como combustible un gran beneficio desde el punto de vista medioambiental.

3.2 Pellets de madera

La utilización de productos manufacturados de biomasa obliga al procesamiento previo de la materia vegetal, con el objeto de disponer de partículas pequeñas de tamaño regular, que permitan su buen almacenamiento y obtener la máxima eficiencia en el proceso de combustión dentro de una caldera.

El pellets de madera es un producto de biomasa que se utiliza como combustible orgánico, consiste en fibras de madera prensada y proviene generalmente de los residuos agrarios e industriales (ver sección 3.1.3).



Figura 3.2: Pellets de madera a granel.

3.2.1 Características físicas según normas internacionales

En la actualidad, no existen estándares de calidad obligatorios para la elaboración de pellets. Pese a ello, las diferentes empresas productoras han decidido tomar de manera voluntaria las especificaciones y estándares de calidad propuestas por el PFI³ a nivel americano u otras similares de origen europeo, principalmente de Austria, Suecia y Alemania, según como se ilustra en la tabla 3.1, con el fin de lograr un producto de alta calidad y de gran eficiencia al momento de la combustión.

3.2.2 Proceso productivo del pellets

El pellets al tratarse de un producto manufacturado se obtiene luego de un proceso de fabricación, que se dividen básicamente en las etapas expuestas en la figura 3.3 y son descritas a continuación:

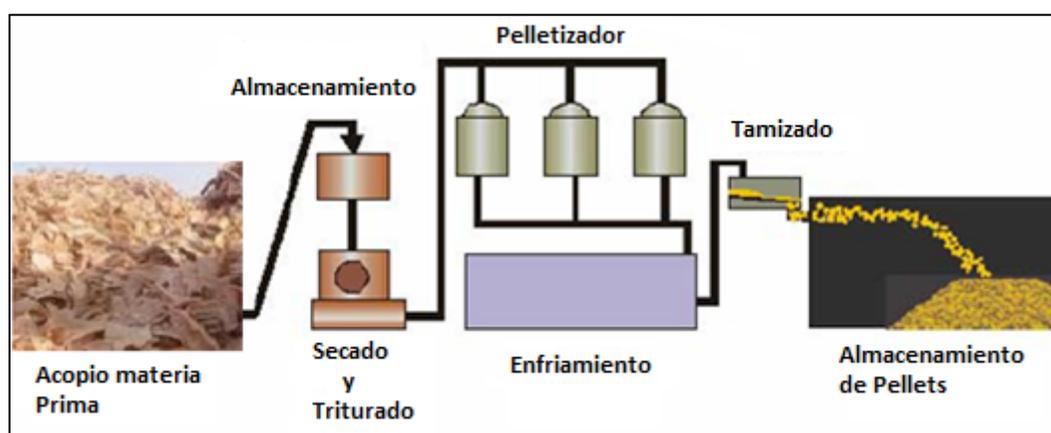


Figura 3.3: Esquema simplificado de la producción de Pellets.

3.2.2.1 Recepción y preparación de la fibra

La recepción de la materia prima se lleva a cabo en silos o canchas de acopio, destinados exclusivamente para este propósito. Los silos pueden estar conectados con el secador por medio de bandas, donde se lleva a cabo la etapa de secado. La materia prima debe estar libre de cualquier tipo de material contaminante como piedras, vidrio, metales etc. para evitar fallas y averías en los equipos, principalmente los rodillos de presión.

³ Pellet Fuels Institute de EE UU.

Tabla 3.1: Propiedades físicas de los pellets, según diversas normas por país. Fuente [5]

<i>País - Norma</i>	<i>Especificaciones</i>	Dimensiones	Densidad a granel kg / m ³	Densidad Unitaria kg / dm ³	Durabilidad/ finos %	Humedad en base humedad %	Contenido de cenizas %	PCI kCal / kg	Cloruros %
Austria ONORM M 7135	Madera comprimida	Pellet: φ: 4-20mm; Lmax: 100mm		≥ 1		≤ 12	≤ 0,5	≥ 24299,2	≤ 0,02
	Corteza comprimida	Briqueta: φ: 20-120mm; Lmax: 400mm		≥ 1		≤ 18	≤ 6	≥ 24299,2	≤ 0,04
Suecia SS 18 71 20	Grupo 1	Lmax=4 φ	2600		≤ 0,8	≤ 10	≤ 0,7	24037	≤ 0,03
	Grupo 2	Lmax=5 φ	2500		≤ 1,5	≤ 10	≤ 1,5		≤ 0,03
	Grupo 3	Lmax=6 φ	2500		≤ 1,4	≤ 12	> 1,5		a indicar
Alemania DIN 51731	HP1	L>30mm; φ>10mm						4179,8- 4657,5	< 0,03
	HP2	L: 15-30mm; φ:6-10mm		1-1,4	< 2,3	< 12	< 1,5		
	HP3	L:10-16mm; φ:3-7mm							
	HP4	L<10mm; φ:1-4mm							
EE UU Pellet Fuels Institute	Standard	L<36mm;	609-737		< 1	≤ 10	< 2	4030	< 0,03
	Premium	φ:6-7,5mm	641-737		< 0,5	≤ 8	< 1	4133	< 0,03

Donde

L: Longitud; Lmax: Longitud máxima; φ: Diámetro exterior

3.2.2.2 Secado

La materia prima inicialmente presenta alto contenido de humedad, que puede estar sobre el 50% b.h⁴, por ello es necesario previo al pelletizado bajar los contenidos de humedad hasta un 8 u 12% b.h. mediante secado forzado. El equipo de secado más utilizado es el Tambor Rotatorio o Drum Dryer, el que dependiendo de sus características técnicas, seca la materia prima por medio de un flujo continuo de aire caliente. Para calentar el aire se puede utilizar como combustible leña, gas natural, petróleo o bien electricidad, cuyo consumo será proporcional a la magnitud del equipo y la producción.

3.2.2.3 Triturado

Esta etapa consiste principalmente en una homogeneización y disminución del tamaño de la materia prima. Esta tarea es llevada a cabo mediante la utilización de un Martillo Triturador o Hammer Mill el que funciona por medio de un motor eléctrico. Las partículas resultantes posterior al proceso de homogeneizado deben presentar una granulometría de alrededor de 1mm para poder ser procesadas.

3.2.2.4 Pelletizado

La madera una vez triturada y con un porcentaje de humedad dentro del rango establecido por la empresa (entre 8 a 12% b.h.), es llevada a la siguiente etapa para el proceso de pelletizado. Una vez que el aserrín entra en el pelletizador es acondicionado mediante el uso de vapor, el que contribuye a su humectación superficial, actuando como lubricante. Además la adición de vapor contribuye a que el aglutinante natural de las fibras de la madera, la lignina, actúe con mayor facilidad sobre las fibras que compondrán los pellets.

Posteriormente el aserrín es sometido a una presión mecánica constante por medio de la utilización de rodillos que se encuentran dispuestos dentro de una matriz o troquel, el cual cuenta con una serie de perforaciones en su superficie, por las que debe salir el material que está siendo empujado. Mediante este proceso es que el material finalmente se aglutina.

El troquel tiene perforaciones de 6-12 mm, por donde el material sale. Una vez fuera, es cortado por medio de cuchillos ajustables, dando a los pellets su forma y largo definitivo

⁴ Humedad en base húmeda

3.2.2.5 Separación de finos o tamizado

Una vez que los pellets están terminados, se lleva a cabo una separación de las partículas. Los finos residuales o partículas sobrantes que puedan haber escapado del proceso de pelletizado, son reingresados al proceso de manera automática. Para este efecto se utiliza una pantalla o tamiz.

3.2.2.6 Enfriamiento y Almacenado

El enfriado es una parte importante del Pelletizado debido a que durante todo el proceso la materia prima está expuesta a altas temperaturas y además esta etapa contribuye a que la lignina de la madera alcance su mayor potencial aglutinante, asegurando así que estos se mantengan en su nueva forma. El enfriador consiste en una cámara en donde los pellets caen por un flujo de contracorrientes, las que permiten disminuir su temperatura. Esta corriente es generada por ventiladores mecánicos.

Una vez enfriado los pellets son almacenados para su distribución a granel y/o empaquetado.

3.2.3 Ventajas generales en la utilización de pellets como combustible

- Reduce la dependencia en combustibles tales como el carbón, la leña, el petróleo y sus derivados de origen fósil.
- Constituye una fuente de energía renovable.
- Es producido a partir de desechos de la industria forestal, por lo que su elaboración no ejerce presión sobre el medio ambiente y sus recursos naturales.
- No presenta grandes variaciones en términos de precios de comercialización en el mercado internacional, a diferencia de lo que ocurre con otros combustibles de uso más tradicional.
- A diferencia de la biomasa “verde”, el uso de pellets en calderas presenta ventajas por su homogeneidad, densidad, baja humedad y aumento en la vida útil del equipo y componentes.
- Constituye una alternativa en la generación de energía y calefacción en calderas tanto a nivel residencial, comercial e industrial.

3.3 Pellets en la zona Centro-Sur de Chile

Según la CORMA⁵ en el año 2010 las plantaciones forestales de Chile se ubican principalmente entre la VI y X región y están constituidas en su mayoría por dos especies: Pino radiata, con el 68%

⁵ Corporación Chilena de la Madera.

del total de bosques plantados y eucaliptus con el 23%, las que han demostrado una excelente adaptabilidad al clima y suelo, el resto corresponde a nativos y plantaciones exóticas.

A nivel de los aserraderos que operan en el país, para procesar la madera, la especie más utilizada es el Pino Radiata, con un 96,7% del consumo, donde se produce un volumen total de 5.542.649 [m^3_{ssc}], vale decir, en unidades de peso equivale a 3.253.724 toneladas de RAE⁶, de los cuales el 56,6% son destinados a la comercialización para su combustión directa o manufactura de productos como materia prima de pellet, el 33,8% es utilizado por las empresas para su autoconsumo y el resto se acumula o regala. (CNE⁷ 2007)

Por lo anterior, se utiliza con mayor frecuencia el aserrín, chips, despuntes y desechos de pino radiata como materia prima para producir Pellets a nivel nacional.

3.3.1 Empresas productoras de Pellets

Como se ilustra en la figura 3.4, en Chile existen diversas empresas que producen y comercializan pellets concentrándose en la zona Centro-Sur del país.



Figura 3.4: Empresas productoras de Pellets.

⁶ Residuos para el Aprovechamiento Energético

⁷ Comisión Nacional de Energía

A nivel nacional, la producción de pellets supera las 100 mil toneladas, es decir, solo utiliza un 5,5% del recurso total disponible de RAE. Dicha producción se concentra básicamente en 3 empresas que son Ecopellets S.A (financiada por Forestal del Sur y Fundación Chile y otros inversionistas), Andes Bio-Pellets (holding de JCE) y Ecomass S.A (financiada principalmente por Promasa).

De las empresas antes mencionadas, Andes Bio-Pellets se posiciona como uno de los mayores productores de pellets con una primera etapa que supera las 50 mil toneladas anuales. Además la ubicación que posee la planta (Los Ángeles) con respecto a Concepción es óptima para fines de abastecimiento y así evitar costos extras en logística y distribución con respecto a plantas de otras regiones o extranjeras.

3.3.2 Características del pellets nacional

Como se mencionó anteriormente, no existen normas obligatorias para producir pellets, sino que son adoptadas de manera voluntaria por las diversas empresas (ver tabla 3.1). En el caso del pellets producido en la zona, este posee las características expuestas en la tabla 3.2.

Cabe destacar que el poder calorífico del pellets de la zona es de $4063 \text{ kCal} / \text{kg}$, si lo comparamos con otros combustibles utilizados a nivel nacional, en términos de poder calorífico (según CNE, 2011) tenemos que los pellets equivalen al 54% de la energía del carbón y coque, un 34% del GLP⁸, un 43% del Gas Natural, un 37% del Petróleo crudo nacional y un 116% de la leña (30 % b.h.).

Tabla 3.2: Propiedades del Pellets producido en la zona Centro-Sur de Chile. Fuente [6]

Propiedad	Valor
Dimensiones	L: 20-40mm; ϕ :10mm
Poder Calorifico	4063 kCal / kg 4,725 kWh / kg
Densidad granel	600-750 kg / m^3
Humedad b.h.	10%
Polvo de madera	5%
Costo Pellets	0,34 US\$/kg

⁸ Gas Licuado de Petróleo

Según CNE, en la figura 3.5 se ilustra otra de las características del pellets, que es su bajo costo para producir energía con respecto a otras alternativas, como es el caso de los derivados del petróleo, electricidad y leña húmeda.

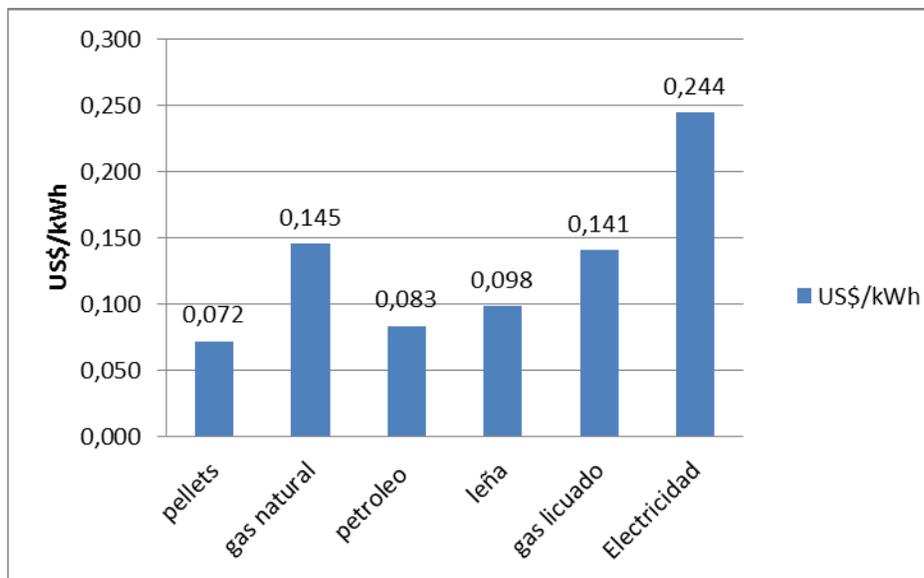


Figura 3.5: Costo de diversos tipos de energía.

En síntesis, la producción de pellets constituye una forma de aprovechamiento de los residuos generados en la industria forestal. El abastecimiento de un alto consumo de pellets usados ya sea para sistemas de calefacción como para el calentamiento de agua, resulta óptimo para proyectos ubicados en la región del Bío-Bío, proporcionando una alternativa real de energía limpia y económica.

Capítulo 4: Requerimientos energéticos para piscinas temperadas cubiertas y Agua Caliente Sanitaria en Polideportivo

En el siguiente capítulo se determinará la demanda energética de ACS y piscina temperada cubierta de un recinto. Dentro de la ciudad tenemos un variado número de instalaciones, de carácter público o privado, estos son por ejemplo Hospitales y/o clínicas, hoteles de diversas categorías, colegios, recintos deportivos, entre otros.

Para efectos de evaluación, este proyecto estará enfocado en satisfacer las demandas energéticas de un complejo deportivo que se ubique en la ciudad. Debido a que no todos los centros deportivos poseen piscina temperada, resulta más frecuente satisfacer principalmente las demandas de ACS utilizada por duchas y lavamanos.

4.1 Demanda Energética de ACS

La energía térmica para producir ACS es aquella que se utiliza para calentar el agua que proviene de la red hasta una temperatura deseada.

Como la temperatura del agua de la red es variable a lo largo del año, la energía térmica necesaria para producir A.C.S. varía mensualmente ($Q_{mensual}$). Esta corresponde a:

$$Q_{mensual} = \dot{m}_{agua_{dia}} \cdot C_{p_{agua}} \cdot (T_{Salida} - T_{red}) \cdot N_{dias/mes} \left[\frac{kWh}{mes} \right] \quad (4.1)$$

Donde

$\dot{m}_{agua_{dia}}$: Masa de agua caliente que se requiere al día en [l/día] (considerando una densidad del agua de 1000 [kg/m³])

$C_{p_{agua}}$: Calor específico del agua, que corresponde a $1,163 \cdot 10^{-3}$ [kWh / (kg K)]

T_{Salida} : Temperatura del agua deseada en [°C]

T_{red} : Temperatura media del agua en la red de Concepción en [°C] (Ver tabla 4.2)

$N_{dias/mes}^{\circ}$: Número de días en un mes [*días/mes*]

Para obtener la cantidad de agua que se requiere en el recinto, se estimará que al día asisten en promedio unas 280 personas. Para conocer la cantidad de agua que consume cada persona existen valores aportados por la UNE 94002-2005 que indican criterios de consumo promedio de diversas instalaciones, como se observa en la tabla 4.1. Así:

$$\dot{m}_{agua_{dia}} = N_{usuarios}^{\circ} \cdot Consumo_{c/usuario} \left[\frac{l}{dia} \right] \tag{4.2}$$

$$\dot{m}_{agua_{dia}} = 280 \text{ usuarios} \cdot 30 \frac{\text{litros}}{\text{usuario} - \text{dia}} \Rightarrow \dot{m}_{agua_{dia}} = 8400 [l / dia]$$

Para determinar el consumo medio mensual, multiplicamos la masa de agua diaria por los días del mes, variando así a lo largo del año.

Tabla 4.1: Criterios de consumo de ACS a 45°C en algunas instalaciones. Fuente [9]

Consumo	A.C.S. Litros/día	Criterio
Vivienda Unifamiliar	40	por persona
Vivienda multifamiliar	30	por persona
Hospitales y Clinicas	80	por cama
Hoteles ****	80	por cama
Hoteles ***	60	por cama
Hoteles**/hostal	50	por cama
Camping	30	por emplazamiento
Escuelas	6	por alumno
Gimnasios	30	por usuario
Residencias	60	por cama
Fabricas y talleres	30	por persona
Oficinas	3	por persona
Cuarteles	40	por persona
Lavanderias	5 a 7	por kilo de ropa
Vestuarios/duchas	20	por servicio

La temperatura de salida del agua se considerará fija a 45 [°C], debido a que es un valor muy usado para la producción de ACS. La temperatura media del agua en la red dependerá de la ubicación geográfica donde nos encontremos, los valores promedio para Concepción se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.2: Temperatura media del agua en la Red. Fuente [10]

Mes	T° agua Red °C
Enero	15,7
Febrero	16,4
Marzo	16,0
Abril	14,7
Mayo	13,0
Junio	11,4
Julio	10,2
Agosto	9,8
Septiembre	10,1
Octubre	11,1
Noviembre	12,5
Diciembre	14,2
AÑO	12,93

Luego al obtener los valores anteriormente explicados, aplicamos la ecuación (4.1) para determinar la demanda energética mensual y anual, como se ilustra en la tabla 4.3. Cabe destacar que al tratarse de un polideportivo, el uso de ACS durante la noche es nulo, por lo tanto se considerará un tiempo de funcionamiento desde las 6:00 a 0:00 a.m. (18 horas aprox.)

Tabla 4.3: Demanda energética para producción de ACS Fuente [Propia]

Mes	Total Energia kWh/mes
Enero	8.873,4
Febrero	7.823,2
Marzo	8.782,5
Abril	8.880,2
Mayo	9.691,0
Junio	9.847,4
Julio	10.539,0
Agosto	10.660,2
Septiembre	10.228,4
Octubre	10.266,5
Noviembre	9.525,0
Diciembre	9.327,6
AÑO	114.444,2

4.2 Consumo de energía en Piscina temperada cubierta

Las demandas energéticas en una piscina temperada cubierta son principalmente para cubrir las pérdidas de calor del agua al ambiente. Estas pérdidas son producidas con un 70-80% por efectos evaporación, un 15-20% por efectos de la radiación y las pérdidas de conducción a través de las paredes de la piscina se consideran despreciables.

Para determinar los requerimientos energéticos, es necesario conocer las dimensiones de la piscina. Los centros deportivos utilizan con mayor frecuencia medidas semi-olímpicas, las cuales corresponden a 25 [m] de largo, 10 [m] de ancho y una profundidad promedio de 2 [m]. Con estos valores, se puede obtener el volumen de agua y la superficie de evaporación.

Para determinar las pérdidas térmicas (P), se utiliza la siguiente expresión empírica:

$$P = (130 - 3 \cdot T_{\text{agua}} + 0,2 \cdot T_{\text{agua}}^2) \cdot (S_{\text{agua}} / 1000) \text{ [kW]} \quad (4.3)$$

Donde

T_{agua} : Temperatura del agua en la piscina [°C]

S_{agua} : Superficie de evaporación de la piscina en [m^2]

Para piscinas temperadas cubiertas, la temperatura del agua se fija según el tipo de recinto y el uso en particular que tendrá la piscina, como se observa en la tabla 4.4. Cabe destacar que los centros deportivos en Concepción utilizan las piscinas para diversos usos, pero principalmente para fines de enseñanza y recreacionales. Por ello se fijará una temperatura en el agua de 26 [°C]. Se recomienda que la condición del ambiente para la piscina posea una temperatura de bulbo seco de 2 a 3 [°C] por sobre la temperatura del agua y que la humedad relativa sea un 60% para controlar la evaporación.

Tabla 4.4: Temperatura del agua según el uso de la piscinas. Fuente [3]

Uso principal	Temperatura °C
Competicion	24
Enseñanza	25
Privadas	25-28
publicas	24-25

Para obtener las pérdidas térmicas que se observan en la tabla 4.5, se debe multiplicar el valor de la ecuación (4.3) por el tiempo de funcionamiento de la piscina al día que generalmente son de 7am a 22pm (15 horas aprox.) y luego multiplicar por el número de días de un mes particular, de esa manera se obtendrá el requerimiento energético mensual expresado en $[kWh/mes]$. Luego la demanda energética anual corresponde a la sumatoria de los requerimientos energéticos mensuales de la piscina que se pretende evaluar expresada en $[kWh/año]$

Tabla 4.5: Demanda energética para piscina temperada cubierta. Fuente [Propia]

Meses	Consumo de Energía kW-h/mes
Enero	21.762
Febrero	19.656
Marzo	21.762
Abril	21.060
Mayo	21.762
Junio	21.060
Julio	21.762
Agosto	21.762
Septiembre	21.060
Octubre	21.762
Noviembre	21.060
Diciembre	21.762
AÑO	256.230

Luego de determinada la demanda energética para piscina temperada cubierta y producción de ACS se puede determinar la demanda total de energía térmica sumando de manera algebraica los consumos de cada mes.

Tabla 4.6: Demanda total de energía mensual y anual. Fuente [Propia]

Mes	Total Energía kWh/mes
Enero	30.635,4
Febrero	27.479,2
Marzo	30.544,5
Abril	29.940,2
Mayo	31.453,0
Junio	30.907,4
Julio	32.301,0
Agosto	32.422,2
Septiembre	31.288,4
Octubre	32.028,5
Noviembre	30.585,0
Diciembre	31.089,6
AÑO	370.674,2

Capítulo 5: Tecnología Termosolar-Biomasa a utilizar

Para poder satisfacer la demanda energética descrita en el capítulo anterior se necesita un aporte de energía externa para calentar el agua hasta la temperatura deseada, para ello se utiliza un sistema de energía solar con concentradores solares parabólicos, apoyado de energía tradicional y un sistema con caldera a pellets de madera que aportará la energía térmica total demandada.

5.1 Concentrador Solar Parabólico

5.1.1 Generalidades

Los captadores solares están constituidos de manera análoga por un absorbedor que recoge la energía solar, una cubierta transparente y un tubo o tubos por los que circula el fluido calo-portador, como se observa en la siguiente figura.

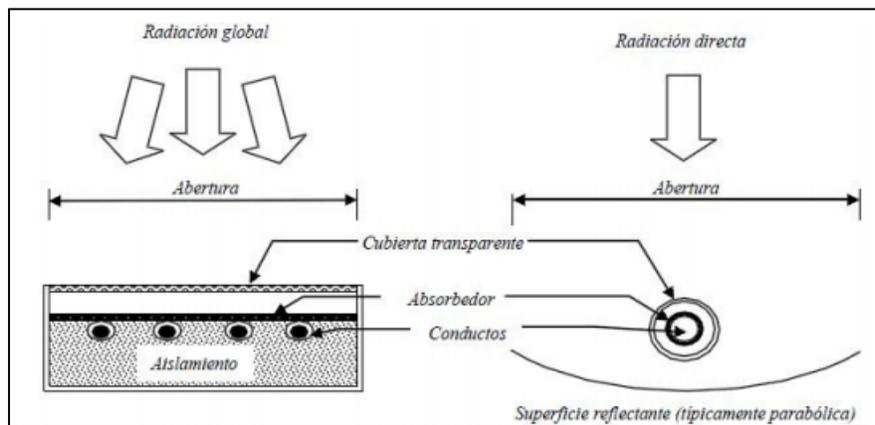


Figura 5.1: Esquema básico de un colector solar plano y concentrador para líquidos.

El absorbedor es el elemento más importante del sistema captador, pues es el encargado de recibir y absorber primero la radiación solar y transformarla después en radiación térmica, de forma que por conducción esta energía se transfiera al fluido circulante. Por otro lado, la cubierta evita en gran medida las pérdidas térmicas por convección desde el absorbedor al ambiente, debido a que la radiación proveniente del Sol posee una longitud de onda corta comportándose como un cristal transparente y opaco para la radiación de onda larga que es emitida desde el absorbedor, simulando así el “efecto invernadero” además de proteger el tubo absorbedor de agentes externos como las condiciones climáticas.

Existen básicamente 2 grandes grupos: los que no concentran una imagen o estáticos y los que concentran una imagen, según se observa en la tabla 5.1. El primer grupo tiene usualmente un área de absorción (también llamada área de zona focal) aproximadamente igual al área de intercepción (o apertura), mientras que el segundo usualmente tiene una superficie reflectante cóncava y focaliza la radiación incidente en un área pequeña, incrementando el flujo de radiación. Luego la razón de concentración (C_R) corresponde a la relación entre el área de apertura (A_a) y el área de absorción (A_r), así:

$$C_R = \frac{A_a}{A_r} \tag{5.1}$$

Tabla 5.1: Tipos de colectores solares. Fuente [3]

movimiento	Tipo de colector	Tipo absorbedor	Razon de concentracion	Rango de T° °C
Estacionario	Plano (FPC)	Plano	1	30 - 80
	Tubo evacuado (ETC)	Plano	1	50 - 200
	Parabólico compuesto (CPC)	Tubular	1 a 5	60 - 240
En un eje	Reflectores Fresnel (CLRF)	Tubular	10 a 40	60-250
	Concentrador parabólico (PTC)	Tubular	10 a 85	60 - 400
	Concentrador cilíndrico (CTC)	Tubular	15 a 50	60-300
En dos ejes	Disco parabólico (PTC)	Puntual	600-2.000	100-1.500
	Heliostato (HFC)	Puntual	300-1.500	150-2.000

El concentrador solar parabólico (PTC: Parabolical Trough Collector) es un captador de foco lineal, que transforma la radiación solar directa en energía térmica, gracias al calentamiento de un fluido de trabajo que puede llegar hasta los 400°C en casos muy favorables. Por tanto, están englobados dentro de los colectores solares de media temperatura. Debido a que sólo trabajan con la radiación directa, necesitan ser ajustados mediante un sistema de seguimiento.

Tienen aplicaciones tanto en generación de energía eléctrica como en calentamiento de agua, pudiendo para esta última aplicación ser construidos con materiales más ligeros y baratos, lo cual disminuye el costo de inversión inicial y facilita el seguimiento solar. Los concentradores solares parabólicos están constituidos básicamente por un reflector parabólico que recibe la radiación directa, un tubo receptor que absorbe la energía incidente calentando un fluido en su interior y un sistema de seguimiento solar, ya sea eléctrico o manual.

5.1.2 Concentrador solar parabólico comercial ABSOLICON

Para el calentamiento de fluidos los concentradores solares parabólicos a nivel comercial son más bien escasos, ya que a diferencia de los colectores planos, tienen mayor madurez en el mercado de la generación eléctrica. Dentro de los equipos comerciales, los que presentan mayor desarrollo técnico son los concentradores de la empresa ABSOLICON que son importados a Chile por la empresa UGACAL, cuya casa matriz se ubica en Valparaíso.

ABSOLICON X10 es un concentrador solar parabólico, el cual concentra la luz en un receptor ubicado en la línea focal, empleando para ello unos motores magnéticos de alta fiabilidad y una gestión del movimiento utilizando un controlador lógico programable (PLC). Los modelos disponibles por ABSOLICON se presentan a continuación:

Tabla 5.2: Concentradores parabólicos comerciales de ABSOLICON [11]

Modelo	Energía Generada	Temperatura de trabajo	Foco Receptor
X 10 PV/T	Calor + Electricidad	10-80 °C	DST (Doble tecnología Solar)
X 10 T	Calor	10-120°C	SST (Tecnología Simple Solar)
X 10 T Vacuum	Calor	<300°C	Vacio

5.1.2.1 Principales Componentes

Según figura 5.2, el concentrador solar de ABSOLICON está compuesto por 3 elementos principales: el reflector cilíndrico-parabólico y su receptor (1), Base de sujeción y actuadores de giro (2) y la central reguladora.

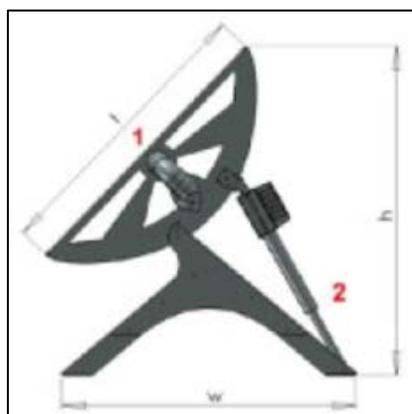


Figura 5.2: Principales componentes del concentrador ABSOLICON

- Reflector y receptor cilindro-parabólico

A grandes rasgos el reflector es un espejo curvo que forma en una de sus dimensiones una parábola, de forma que concentra sobre su línea focal toda la radiación reflejada, el material utilizado es acero galvanizado lacado de alta reflexividad. El tubo receptor es de Aluminio que posee un recubrimiento selectivo, para mejorar sus propiedades de absorción. Cabe destacar que no posee 2 tubos concéntricos, ya que el cristal en este equipo cubre el concentrador en la parte superior, como se ilustra en la figura 5.3, dicho cristal es templado, posee bajo contenido de hierro con una alta transmisibilidad.

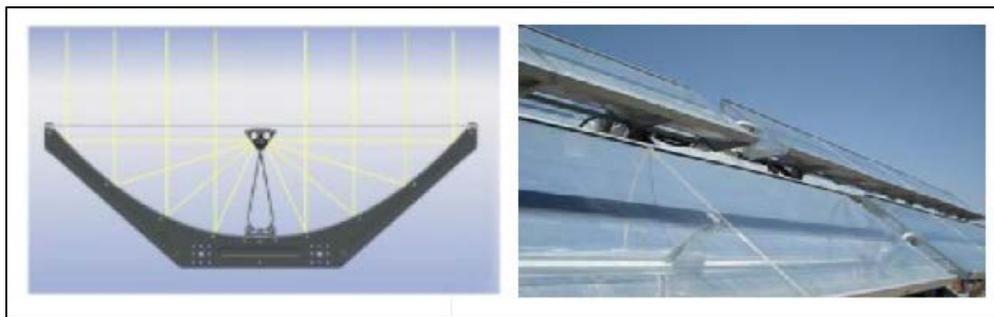


Figura 5.3: Reflector y tubo receptor del colector x10 T

- Seguimiento solar: Actuadores de giro

El seguimiento del Sol se hace con el objetivo de aprovechar la mayor parte de horas posibles de luz, de forma que la radiación solar llegue lo más perpendicularmente posible al colector, vale decir, que la normal del plano del colector sea paralelo al haz de radiación directa, y así tener un ángulo de incidencia mínimo o nulo. Un actuador lineal es un dispositivo que teniendo una fuente de energía, convierte el movimiento de rotación en un movimiento de manera lineal y que dependiendo del giro del motor, el brazo se acorta o se alarga. Los concentradores de ABSOLICON emplean unos actuadores magnéticos especiales de giro, con una precisión de $0,1^\circ$. Se emplean entre 1 y 3 unidades de actuadores por producto, en función de la unidad de la que se trate, estos van sujetos por un lado a los bastidores portantes del reflector y por el otro al bastidor de sujeción de base, como se aprecia en la figura 5.4.

Para el presente proyecto se consideró que los ángulos de seguimiento a utilizar serán valores con un ajuste único al medio día solar. En la tabla 5.2 se observan los valores medios mensuales de la inclinación que debe tener el concentrador y la hora local que equivale al medio día solar.



Figura 5.4: Actuadores de giro y bastidores de sujeción del colector X10 T

Tabla 5.3: Inclinación media mensual del concentrador al medio día solar. Fuente [Propia]

Mes	$\bar{\beta}_\circ$	hora local hr
Enero	15,08	14,77
Febrero	23,05	14,84
Marzo	33,58	14,76
Abril	45,41	13,60
Mayo	54,79	13,54
Junio	59,09	13,59
Julio	57,18	13,70
Agosto	49,45	13,66
Septiembre	38,22	13,51
Octubre	26,40	14,35
Noviembre	17,09	14,35
Diciembre	12,95	14,50

En el ANEXO I se puede observar con mayor detalle el ajuste diario del colector a lo largo del año.

- Central reguladora

La central reguladora es el núcleo de la instalación. La función principal de la central reguladora es controlar el seguimiento del Sol de ABSOLICON X10, gestionar los sistemas de seguridad y gestionar el control de la instalación hidráulica. Para ello el sistema incorpora un PLC, que recibe información de entrada gracias a botoneras de la central de mando y de diversos sensores ya sean de temperatura, presión, condiciones climáticas etc. ubicados en el concentrador y que gracias al programa lógico interno, logran gestionar las variables en cuestión gracias a sus dispositivos de salida, entre ellos, el actuador lineal. El programa lógico es aportado por ABSOLICON y es permanentemente actualizado vía internet con nuevas versiones de control. Además la central

reguladora tiene un servidor de web integrado que permite el mando a distancia de la central desde cualquier computador conectado a internet.

5.1.2.2 Rendimiento del concentrador Solar parabólico

Debido a los materiales y la geometría que posee el concentrador además de los tipos de transferencia de calor, existen pérdidas tanto ópticas como térmicas, las cuales se deben considerar para poder obtener el rendimiento global del equipo.

5.1.2.2.1 Norma Americana

El rendimiento global del concentrador corresponde a la energía útil en el tubo receptor con respecto a la energía solar total que incide de forma directa en el área de apertura. Esta norma considera expresar el rendimiento del colector como una ecuación de la recta.

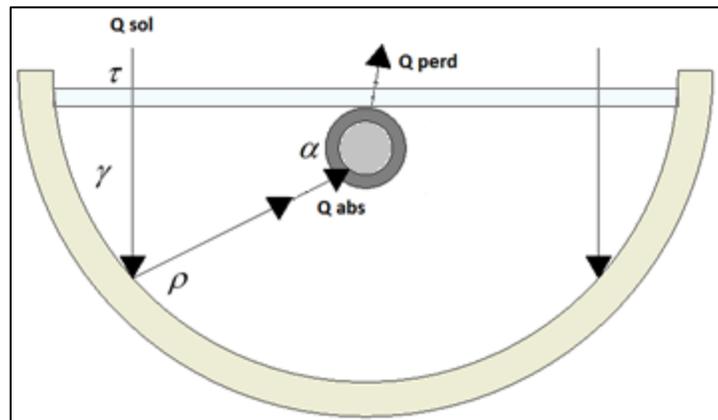


Figura 5.5: Balances de energía en el PTC.

Luego al realizar el balance de energía para el tubo receptor se puede obtener el calor útil (Q_{util}):

$$Q_{util} = Q_{abs} - Q_{perd} \tag{5.2}$$

El calor absorbido (Q_{abs}) y las pérdidas térmicas (Q_{perd}) se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$Q_{abs} = \tau \cdot \gamma \cdot \rho \cdot \alpha \cdot Q_{Sol} \tag{5.2.a}$$

$$Q_{perd} = U_L \cdot A_r (T_{col} - T_{amb}) \tag{5.2.b}$$

Donde

τ : Transmisividad del cristal

γ : Factor de interceptación, debido a las imperfecciones de los espejos y del seguimiento solar

ρ : Reflectividad de la superficie del concentrador

α : Absortividad del tubo metálico receptor

Q_{Sol} : Energía solar que incide directamente al concentrador en [W]

U_L : Coeficiente global de transferencia de Calor $\left[W / (m^2 \text{ } ^\circ C) \right]$

T_{col} : Temperatura media del colector [$^\circ C$]

T_{amb} : Temperatura media ambiental [$^\circ C$] (ver tabla 5.4)

La energía solar incidente se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q_{Sol} = I_D \cdot A_a \quad (5.3)$$

Donde

I_D : Radiación horaria directa de la superficie receptora medida en $[W / m^2]$ (ver tabla 5.4)

Luego reemplazando las ecuaciones (5.1), (5.3), (5.2.a) y (5.2.b) en (5.2), se tiene:

$$Q_{util} = A_a \cdot \left[\gamma \cdot \rho \cdot \alpha \cdot \tau \cdot I_D - \frac{U_L \cdot (T_{col} - T_{amb})}{C_R} \right] \quad (5.4)$$

Cabe destacar que resulta más útil trabajar con la temperatura media del fluido calo-portador que con la temperatura del tubo receptor, por lo cual se utiliza un factor de irrigación (F_R), este considera que la temperatura del tubo receptor, equivale a la temperatura media del fluido entre la entrada (T_e) y la salida (T_s) del tubo receptor, luego:

$$Q_{util_{a T_{col}}} = F_R \cdot Q_{util_{a \bar{T}_m}} \quad (5.5)$$

Donde el tubo receptor se encuentra a $\bar{T}_m = \frac{T_s + T_e}{2}$

Si consideramos la energía útil por unidad de área, tenemos:

$$q_{util} = \frac{Q_{util}}{A_a} \quad (5.6)$$

Luego reemplazando las ecuaciones (5.5) y (5.6) en (5.4), se tiene la energía útil expresada en $[W / m^2]$

$$q_{util} = F_R \cdot \left[\gamma \cdot \rho \cdot \alpha \cdot \tau \cdot I_D - \frac{U_L \cdot (\bar{T}_m - T_{amb})}{C_R} \right] \quad (5.7)$$

Además considerando la misma analogía de la ecuación (5.6), el calor aportado por el sol corresponde a

$$\frac{Q_{Sol}}{A_a} = q_{Sol} = I_D \quad (5.8)$$

Así el rendimiento global del concentrador se obtiene de la división entre la energía útil respecto a la energía solar, luego combinando las ecuaciones (5.7) y (5.8) el rendimiento se puede expresar como:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{(\bar{T}_m - T_{amb})}{I_D \cdot C_R} \quad (5.9)$$

Donde

η_0 : Rendimiento óptico del concentrador solar en [%] (equivale a $F_R \cdot \gamma \cdot \rho \cdot \alpha \cdot \tau$)

a_1 : Coeficiente de pérdidas térmicas en $[W / (m^2 \cdot ^\circ C)]$ (equivale a $F_R \cdot U_L$)

El rendimiento óptico y las pérdidas térmicas son informadas por el fabricante u otro organismo certificador en forma de datos o gráfico de una recta.

5.1.2.2.2 Norma Europea

Esta norma considera expresar el rendimiento global del concentrador como una ecuación cuadrática, agregando a la norma Americana un nuevo factor de pérdidas térmicas. Así:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{(\bar{T}_m - T_{amb})}{I_D \cdot C_R} - a_2 \frac{(\bar{T}_m - T_{amb})^2}{I_D \cdot C_R} \quad (5.10)$$

Donde

η_0 : Rendimiento óptico del concentrador solar en [%]

a_1 : Coeficiente de pérdidas térmicas en $[W / (m^2 \cdot ^\circ C)]$

a_2 : Coeficiente de pérdidas térmicas en $[W / (m^2 \cdot ^\circ C^2)]$

Al igual que en la norma Americana, los valores de rendimiento óptico y pérdidas térmicas a_1, a_2 son entregados por el fabricante u organismo certificador.

Tabla 5.4: Radiación horaria directa sobre superficie y temperatura exterior en Concepción. Fuente [10]

Mes	Radiación W / m^2	T° amb °C
Enero	830	16,3
Febrero	800	15,7
Marzo	730	13,9
Abril	630	12,0
Mayo	480	10,8
Junio	400	9,2
Julio	460	8,8
Agosto	570	9,1
Septiembre	670	9,7
Octubre	740	11,5
Noviembre	780	13,5
Diciembre	800	15,5
	Media	Media
AÑO	657,5	12,2

5.1.2.3 Características técnicas del concentrador

Como el presente proyecto está enfocado en satisfacer la demanda de energía térmica, se opta por el concentrador parabólico Modelo X10 T de 10 [m] de longitud cuyas características son las siguientes:

Tabla 5.5: Características térmicas del concentrador solar parabólico. Fuente [11]

Marca	ABSOLICON	
Modelo	X10 T	(Térmico)
Rend. Optico η_0	54,80	%
Perd. Térmicas a_1	0,849	$W / m^2 \cdot ^\circ C$
Perd. Térmicas a_2	0,003	$W / m^2 \cdot ^\circ C^2$
Area apertura	10,37	m^2
Area receptora	0,7	m^2
Precio	5000	US\$

Para mayor detalle de las características técnicas de este concentrador, ver ANEXO II sección A.2.1.

Para determinar el rendimiento global del concentrador, se utilizará la norma Europea, donde el rendimiento óptico como los factores de pérdida son valores conocidos. La temperatura media entre la entrada y la salida del fluido de trabajo se considerará igual a 60 [°C], luego aplicando la ecuación (5.10) se obtiene el rendimiento para cada mes del año, así:

Tabla 5.6: Rendimiento global del concentrador x10 T. Fuente [Propia]

Meses	Rend. Global %
Enero	54,5%
Febrero	54,4%
Marzo	54,4%
Abril	54,3%
Mayo	54,1%
Junio	53,9%
Julio	54,0%
Agosto	54,2%
Septiembre	54,3%
Octubre	54,4%
Noviembre	54,4%
Diciembre	54,4%
AÑO	54,3%

5.2 Caldera a pellets

5.2.1 Funcionamiento y partes principales

Son calderas de hogar interior con alimentación inferior o con sistema de parrilla móvil donde se quema el pellets apoyado con el aire primario que es inyectado bajo la parrilla. El hogar no es refrigerado y su gran volumen permite quemar los volátiles con aire secundario.

La figura 5.6 presenta una caldera de capacidad media, donde el combustible ingresa a la caldera mediante un tornillo sin fin o por empuje, luego este es quemado en la cámara de combustión apoyado del oxígeno que ingresa por las entradas de aire primario en la parte inferior de la parrilla, y el aire secundario que quema los volátiles que salen a gran velocidad y no se alcanzan a quemar o ayudando a combustionar el monóxido de carbono que no encontró el oxígeno suficiente en la parrilla de combustión. El calor más los productos de combustión generados ingresan a un banco de tubos que intercambian calor con el agua que los rodea aumentando su temperatura sin generar vapor, donde luego los gases escapan por la chimenea. Las cenizas generadas son separadas para su futura extracción. El control óptimo de la combustión se obtiene efectuando los ajustes oportunos del aire (primario y secundario) y la aportación de combustible. Se comprueba la calidad de la combustión visualmente y mediante un analizador de combustión.

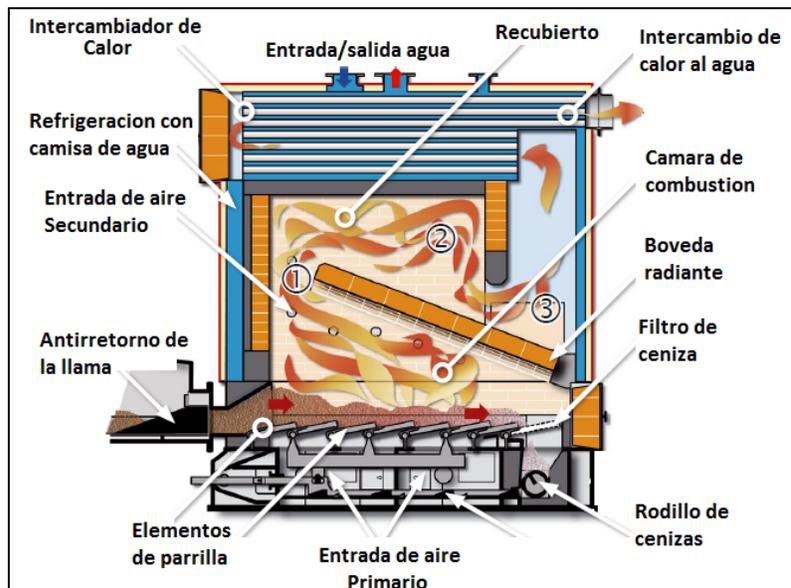


Figura 5.6: Principales componentes de una caldera a Pellets.

A diferencia de la caldera a gas, la de pellets necesita un depósito de combustible con mayores dimensiones ya sea un silo externo o el acondicionamiento de alguna habitación para fabricarlo debido a que posee un poder calorífico menor, entonces para producir la misma cantidad de calor se debe quemar mayor cantidad de combustible, por ello se requiere mayor compartimiento de almacenaje, para ello se tienen algunas alternativas:

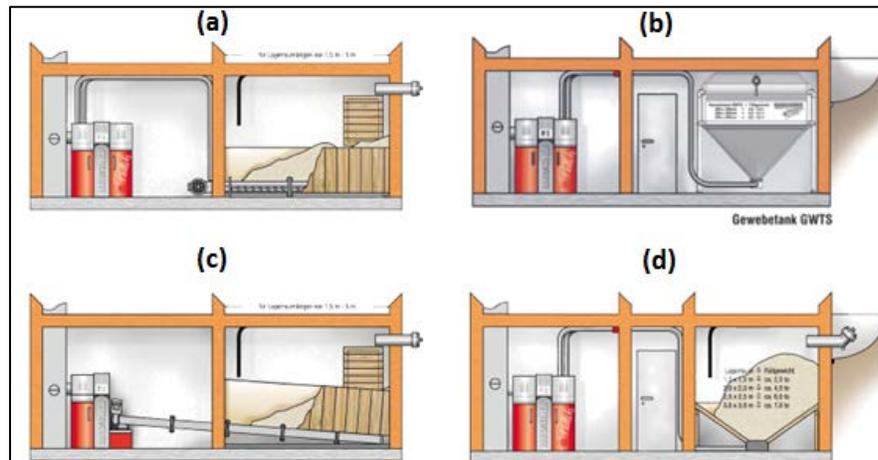


Figura 5.7: Alternativas de almacenaje para biomasa.

Según la figura 5.7, los diversos tipos de almacenaje corresponden a:

- (a): Aspiración neumática desde silo de obra dispersado con tornillo sinfín
- (b): Aspiración neumática desde silo textil o PVC, caída de Pellets por gravedad
- (c): Alimentación directa por tornillo sinfín
- (d): Aspiración desde punto inferior por gravedad

5.2.2 Rendimiento de las calderas a pellets

El rendimiento directo de las calderas a pellets corresponde básicamente a la razón entre la energía térmica que es absorbida por el agua con respecto a la energía total generada por la oxidación del combustible.

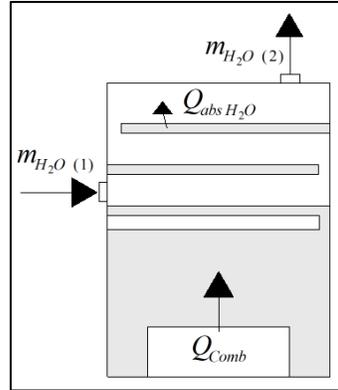


Figura 5.8: Esquema simplificado de una caldera.

De la figura anterior, se puede obtener el rendimiento de la caldera realizando los balances de masa (B.M.) y energía (B.E.) con respecto al agua. Como las evaluaciones en este proyecto corresponden a valores medios mensuales, las variables que inciden en el cálculo del rendimiento de la caldera serán consideradas como tal, luego:

B.M:

$$\dot{m}_{H_2O (1)} = \dot{m}_{H_2O (2)} = \dot{m}_{H_2O} \quad (5.11)$$

B.E:

$$Q_{abs H_2O} = \dot{m}_{H_2O} \cdot (h_2 - h_1) \quad (5.12)$$

Donde

$\dot{m}_{H_2O (1)}$: Flujo másico de agua a la entrada de la caldera [kg / mes]

$\dot{m}_{H_2O (2)}$: Flujo másico de agua a la salida de la caldera [kg / mes]

$Q_{abs H_2O}$: Calor absorbido por el agua [kWh / mes]

h_1 : Entalpía del agua a la entrada de la caldera [kWh / kg]

h_2 : Entalpía del agua a la salida de la caldera [kWh / kg]

Como el agua se mantiene en fase líquida la ecuación (5.12) se puede escribir de la siguiente manera:

$$Q_{abs H_2O} = \dot{m}_{H_2O} \cdot C_{agua} \cdot (T_{salida} - T_{entrada}) \quad (5.13)$$

El calor aportado por el combustible, corresponde al calor máximo disponible en la caldera y equivale a:

$$Q_{comb} = \dot{m}_c \cdot PCI \quad (5.14)$$

Donde

Q_{comb} : Calor aportado por el pellets medido en [kWh / mes]

\dot{m}_c : Flujo másico de combustible en [kg / mes]

PCI : Poder calorífico inferior del combustible [kWh / kg]

Luego el rendimiento de la caldera viene dado por la siguiente expresión:

$$\eta_{Caldera} = \frac{\dot{m}_{H_2O} \cdot C_{agua} \cdot (T_{salida} - T_{entrada})}{\dot{m}_c \cdot PCI} \quad (5.15)$$

Se debe tener presente que el calor que absorbe el agua debe ser capaz de cubrir las demandas energéticas totales del sistema, que incluye la energía requerida por el ACS, la piscina temperada cubierta y las pérdidas energéticas de la instalación. Debido a que el rendimiento de la caldera es un dato referencial que entrega el fabricante, se puede determinar la masa de combustible necesario para que supla dicha energía, como se verá en el siguiente capítulo (ver sección 6.2).

Luego la ecuación (5.15) puede ser expresada como:

$$\eta_s = \frac{Q_{ACS} + Q_{Piscina}}{\dot{m}_c \cdot PCI} \quad (5.16)$$

Donde

η_s : Corresponde al rendimiento total del sistema, vale decir, al producto entre el rendimiento de la caldera con el de la instalación, este incluye las pérdidas de energía por distribución y regulación, medido en [%].

$$\eta_S = \eta_{Caldera} \cdot \eta_{Instalacion} \quad (5.17)$$

5.2.3 Características técnicas de calderas comerciales

Como se mencionó anteriormente, el rendimiento y las características técnicas de la caldera lo entrega el fabricante bajo ciertas condiciones de combustible y requerimientos térmicos. Para el presente proyecto la caldera se selecciona según los requerimientos energéticos del sistema, expresados como potencia térmica (kW). Para ello, se utiliza la razón entre la demanda de energía térmica anual de ACS y piscina temperada (tablas 4.3 y 4.5) con respecto a las horas de funcionamiento al año de cada una y además considerando el rendimiento de instalación, así:

$$Q_{req} = \frac{1}{365 \cdot \eta_{instalacion}} \left(\frac{Q_{ACS}}{h_{dia}} + \frac{Q_{piscina}}{h_{dia}} \right) [kW] \quad (5.18)$$

Donde

h_{dia} : Horas de funcionamiento diario de cada tipo de energía [hr]

Luego reemplazando los valores expuestos en el capítulo 4 en la ecuación (5.18) y considerando un rendimiento de instalación del 80% se tiene:

$$Q_{req} = \frac{1}{365 \cdot 0,8} \left(\frac{114.444,2}{18} + \frac{256.230}{15} \right) \Rightarrow Q_{req} = 80,3 [kW]$$

La caldera que posea dicha capacidad resultará útil para cubrir el 100% de la demanda energética. A diferencia de los concentradores solares parabólicos, las calderas a pellets tienen un mercado más grande, por lo cual existen varios modelos que podrían cubrir los requerimientos de energía.

Para la selección, se eligieron calderas cuya capacidad térmica está por sobre el valor real requerido, como se observa en la tabla 5.7. Se puede observar que las calderas presentan rendimientos cercanos con una máxima diferencia del orden del 7%. Para la selección de la caldera, se determinará aquella que presente un mayor ahorro en la inversión.

Tabla 5.7: Características de calderas a Pellets. Fuente [Propia]

Modelo	Potencia útil kW	Rendimiento %	Costo US\$
Pascualicchio CSB	92	89	24.475
Facody TUERO 100	100	93	14.911
Marina CS 60	80	94	22.249
Enertres BI-1000	85	95,6	32.688

Bajo el criterio anterior se elige la caldera Facody TUERO 100. La caldera cumple con la norma europea UNE 12809 y pertenece a la clase de menores niveles de emisiones. La eficiencia asciende a 93%, el precio incluye un sinfín alimentador y una tolva de 0,4 [m³]. Para mayor detalle de características técnicas, ver ANEXO II sección A.2.2.

Capítulo 6: Cobertura energética para alternativas a evaluar

Conocida la demanda energética y los equipos a utilizar se procede a evaluar la cobertura de energía que presenta cada una de las siguientes alternativas:

La alternativa (1) supone que el sistema ya se encuentra funcionando con la energía tradicional, vale decir, con la caldera a GLP. La alternativa (2) supone instalar el sistema termosolar apoyado por la caldera a gas. Por último, la alternativa (3) supone la instalación de un sistema de biomasa que opera con una caldera a pellets, que cubre el total de la energía térmica demandada.

6.1 Alternativa 1: Cobertura con la caldera a GLP

Para efectos de evaluación se considerará que el polideportivo satisface sus necesidades energéticas al 100% a partir de fuentes convencionales con una caldera a GLP cuyas características de operación son las siguientes:

- Poder Calorífico: 12,8 [kWh/kg]
- Costo gas: 1,8 [US\$/kg]
- Rendimiento de la caldera: 75%
- Rendimiento de instalación: 90%

Así la masa de combustible que se consume de manera mensual para satisfacer los requerimientos energéticos se calcula con la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{GLP} = \frac{Q_{mes}}{\eta_{sistema} \cdot PCI} \left[\frac{kg}{mes} \right] \quad (6.1)$$

Donde

Q_{mes} : Corresponde a la suma de energía entre el ACS y piscina temperada mensual en [kWh/mes].

(Ver tabla 4.6)

PCI : Poder calorífico inferior del GLP en [kWh/kg]

$\eta_{sistema}$: Rendimiento del sistema en [%], se calcula con la expresión (5.17).

Luego de conocida la masa de combustible se puede obtener el costo mensual de gas utilizando la siguiente expresión:

$$Costo_{Combustible} = \dot{m}_{GLP} \cdot Costo_{GLP} \text{ [US\$ / mes]} \tag{6.2}$$

Así utilizando las expresiones (6.1) y (6.2) se obtiene la masa de combustible y su costo operacional de manera mensual y anual, como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 6.1: Consumo y costos GLP mensual y anual. Fuente [Propia]

Mes	Energía Total kWh/mes	Consumo GLP kg/mes	Costo GLP US\$/mes
Enero	30.635,4	3.545,8	6.382,4
Febrero	27.479,2	3.180,5	5.724,8
Marzo	30.544,5	3.535,2	6.363,4
Abril	29.940,2	3.465,3	6.237,5
Mayo	31.453,0	3.640,4	6.552,7
Junio	30.907,4	3.577,2	6.439,0
Julio	32.301,0	3.738,5	6.729,4
Agosto	32.422,2	3.752,6	6.754,6
Septiembre	31.288,4	3.621,3	6.518,4
Octubre	32.028,5	3.707,0	6.672,6
Noviembre	30.585,0	3.539,9	6.371,9
Diciembre	31.089,6	3.598,3	6.477,0
	Total	Total	Total
AÑO	370.674,2	42.902,1	77.223,8

6.2 Alternativa 2: Cobertura de la energía Termosolar

Esta alternativa considera la instalación del sistema termosolar apoyado de la caldera a gas. Como el aporte solar es variable a lo largo del año, resulta gravitante conocer el número óptimo de concentradores con su respectivo aporte solar, utilizando para tales efectos el método de la Carta-F.

6.2.1 Método de la Carta F (curvas F-Chart)

Para el dimensionado de instalaciones con energía termosolar se utiliza el método de las curvas F-Chart, que permite realizar el cálculo de la cobertura solar, es decir, la contribución de energía térmica total que aporta el sistema y su rendimiento medio. Este método no se recomienda para

evaluaciones diarias o semanales, sino para largos períodos de tiempo, donde sus resultados son bastante aceptables.

Este método puede ser aplicado para colectores del tipo:

- Superficie plana (FPC)
- Tubos evacuados (ETC)
- Parabólicos compuestos (CPC)
- Con 1 o 2 ejes de seguimiento (PTC) o (CTC)

El procedimiento de su aplicación consiste en identificar las variables adimensionales del sistema de calentamiento solar y utilizar algún software para simular las correlaciones entre estas variables, y determinar la cobertura del sistema, así:

$$f = 1.029 \cdot Y - 0.065 \cdot X - 0.245 \cdot Y^2 + 0.0018 \cdot X^2 + 0.021 \cdot Y^3 \quad (6.3)$$

Donde

f : Cobertura solar mensual [%]

X : Factor adimensional que relaciona las pérdidas de energía del captador y la demanda de energía total durante un mes.

Y : Factor adimensional que relaciona la energía absorbida por el captador plano y la demanda de energía total de un mes.

Los factores adimensionales X e Y se determinan a partir de las siguientes expresiones (fuente [3]):

$$X = \frac{F_R U_L}{1000} \cdot \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) \cdot (100 - T_{amb}) \cdot 24 \cdot N \cdot \frac{S_C}{C_R \cdot Q_{mes}} \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (6.4)$$

$$Y = \eta_0 \cdot \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) \cdot \left[\frac{\tau \alpha}{(\tau \alpha)_n} \right] \cdot \bar{H}_D \cdot \frac{S_C}{Q_{mes}} \quad (6.5)$$

Donde

$F_R U_L$: Coeficiente global de pérdidas del colector [$W / (m^2 K)$]

$\left(\frac{F'_R}{F_R}\right)$: Factor de corrección del conjunto captador-intercambiador, recomendado 0.96

T_{amb} : Temperatura promedio mensual del ambiente en [$^{\circ}C$] (Ver tabla 5.4)

S_C : Superficie total de los colectores [m^2]

Q_{mes} : Demanda energética mensual [kWh/mes]

N : Número de días al mes [$días/mes$]

η_0 : Rendimiento óptico del colector [%]

$[\tau\alpha / (\tau\alpha)_n]$: Modificador del ángulo de incidencia. En general se puede considerar constante: 0,96 para superficies transparentes sencillas o 0,94 para superficies transparentes dobles.

\bar{H}_D : Radiación directa mensual sobre superficies del colector [$kWh / (m^2 mes)$] (Ver tabla 2.3)

K_1 : Factor de corrección adimensional por almacenamiento, entre el volumen de agua de acumulación (V) en litros respecto del área de apertura (A_a), se obtiene con la siguiente relación:

$$K_1 = \left[\frac{(V / A_a)}{75} \right]^{-0.25} \quad (6.6)$$

K_2 : Factor de corrección adimensional que relaciona la temperatura del ACS ($T_{A.C.S}$), la del agua de red (T_{red}) y la media mensual del ambiente (T_{amb}), luego:

$$K_2 = \frac{(11,6 + 1,18 \cdot T_{A.C.S} + 3,86 \cdot T_{red} - 2,32 \cdot T_{amb})}{(100 - T_{amb})} \quad (6.7)$$

Las ecuaciones anteriores son válidas entre los siguientes valores límites:

$$0 < Y < 3 \quad ; \quad 0 < X < 18 \quad \text{y} \quad 37,5 < \left(\frac{V}{S_C} \right) < 300$$

Luego al obtener los valores de X e Y aplicándolos a la ecuación (6.3). La energía mensual aportada por la superficie colectora ($Q_{AporteSolar}$) será:

$$Q_{AporteSolar} = f \cdot Q_{mes} \quad (6.8)$$

Donde

Q_{mes} : Energía mensual requerida en [kWh]

f : Cobertura Solar [%]

6.2.2 Cuantificación de concentradores solares ABSOLICON

Para determinar el número de concentradores se utilizará el método F-Chart descrito anteriormente. Cabe mencionar que los valores X e Y dependen de la superficie colectora total, cuyo valor es el producto del área de apertura de un concentrador con respecto al número total de ellos, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$S_C = A_a \cdot N_{concentradores}^0 \quad [m^2] \quad (6.9)$$

El área mínima corresponde a 0 [m²] ya que significa que no existe aporte solar, el área máxima tendrá como límite no sobrepasar una cobertura de 100%, pues el excedente de energía no se justifica debido a que no tendrá utilidad además de presentar un mayor costo de inversión. De la ecuación (6.9) el número máximo de colectores, corresponde a la división entre la superficie colectora máxima, respecto del área de apertura de un concentrador.

Conocido los límites de la cobertura y además conociendo que el cálculo para determinar los valores de X e Y resultan de un proceso iterativo respecto a la superficie total se programa una planilla de cálculo utilizando Microsoft Excel, así los valores mensuales y totales anuales se presentan en la tabla 6.2

Luego los valores de cobertura solar se obtuvieron para una superficie colectora de $S_C = 622,2 [m^2]$, así utilizando la ecuación (6.9) el número máximo de colectores a instalar equivale a 60.

Según tabla 6.2, los valores de cobertura y por ende la energía aportada por el sistema solar disminuye durante los meses de invierno debido a que se expone un clima adverso, menos horas de

Sol, menor índice de transparencia atmosférica o dicho de otro modo, disminuye el recurso solar. Dicha energía faltante, será cubierta por la combustión del GLP.

Tabla 6.2: Cobertura y aporte de energía solar. Fuente [Propia]

Meses	Demanda energía kWh/mes	Cobertura Solar %	Aporte energía solar kWh/mes
Enero	30.635,4	98,8	30.270,8
Febrero	27.479,2	91,2	25.047,4
Marzo	30.544,5	74,5	22.754,4
Abril	29.940,2	49,7	14.876,1
Mayo	31.453,0	28,8	9.054,4
Junio	30.907,4	19,7	6.092,9
Julio	32.301,0	24,4	7.866,5
Agosto	32.422,2	38,0	12.325,2
Septiembre	31.288,4	52,5	16.440,7
Octubre	32.028,5	68,9	22.066,4
Noviembre	30.585,0	82,7	25.280,4
Diciembre	31.089,6	94,4	29.347,3
	Total	Media	Total
AÑO	370.674,2	60,3	221.422,7

El beneficio económico de esta alternativa viene dado por el ahorro de gas debido a que solo debe aportar con la energía que no alcanza a cubrir el sistema solar, dicha energía corresponde a la diferencia entre la requerida respecto al aporte solar. Luego con la ecuación (6.1), se puede obtener la masa de gas necesario para producir la diferencia de energía y por ende el costo que ello implica con la ecuación (6.2).

A medida que aumenta de 1 hasta 60 el número de concentradores instalados, la cobertura solar también aumenta y por ende se tiene un mayor ahorro de gas debido a que se requiere menos masa de combustible, pero ello a su vez implica que se requiera una mayor inversión de estos equipos y que comparado con un colector plano el precio de adquisición es 6 veces mayor. Debido al tamaño de la instalación las variables “costo por concentrador” vs “ahorro” toman mayor relevancia a la hora de tomar una decisión. Una manera de sensibilizar dichas variables es mediante un indicador financiero como el VAN⁹ cuyo propósito es traer los ahorros generados del futuro al presente para compararlos con la inversión, este se calculará de la siguiente manera:

$$VAN = -I_0 + VAN_{AHORRO} \tag{6.10}$$

⁹ Valor Actual Neto

$$VAN_{AHORRO} = \bar{A}_{anual} \cdot \left[\frac{(1+i)^t - 1}{i \cdot (1+i)^t} \right] \quad (6.11)$$

Donde

I_0 : Inversión por la adquisición de cada concentrador [US\$]

\bar{A}_{anual} : Ahorro promedio anual del combustible que depende del número de concentradores. Para efectos de cálculo, se considerará que este ahorro será constante con el paso del tiempo en [US\$].

i : Tasa de descuento del proyecto [%]

t : Periodo de tiempo considerado en la evaluación [años]

El cálculo del VAN se realizó para un rango de 1 a 60 concentradores, considerando solo el precio por equipo equivalente a 5000 [US\$] (tabla 5.4), los ahorros anuales de combustible se consideraron constantes para un periodo de evaluación de 20 años, cuya tasa de descuento equivale al 8%. Luego los valores del VAN se exponen a continuación:

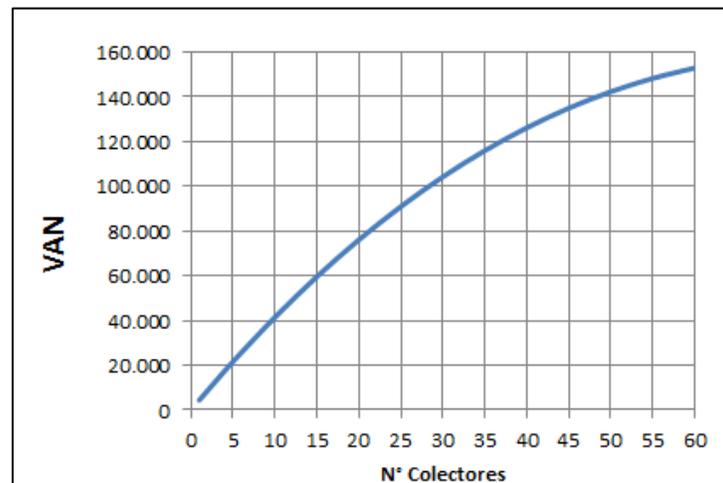


Figura 6.1: VAN respecto a la cantidad de concentradores.

Como se puede observar en el gráfico anterior, el número óptimo de concentradores en base al ahorro generado equivale a 60 equipos. Es de esperar que este valor en realidad sea menor, ya que se debe tener en cuenta los costos de los equipos asociados a la instalación solar, mantenciones y/o sustituciones por averías, escalamientos del combustible, etc. que serán considerados con más detalle en la evaluación financiera del proyecto.

Con el total óptimo de colectores a instalar, cuya cobertura se encuentra expresada en la tabla 6.2, se determina la cantidad de energía y la masa de combustible que debe aportar la caldera explicados anteriormente y de esa forma determinar el ahorro de gas de manera mensual y anual, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6.3: Consumos y ahorro de GLP con proyecto Solar. Fuente [Propia]

Mes	Aporte energía kWh/mes	Consumo GLP Kg/mes	Costo GLP US\$/mes	GLP sin/proy. US\$/mes	Ahorro US\$/mes
Enero	364,6	42,2	76,0	6.382,4	6.306,4
Febrero	2.431,8	281,5	506,6	5.724,8	5.218,2
Marzo	7.790,1	901,6	1.622,9	6.363,4	4.740,5
Abril	15.064,1	1.743,5	3.138,3	6.237,5	3.099,2
Mayo	22.398,6	2.592,4	4.666,4	6.552,7	1.886,3
Junio	24.814,4	2.872,0	5.169,7	6.439,0	1.269,4
Julio	24.434,5	2.828,1	5.090,5	6.729,4	1.638,8
Agosto	20.096,9	2.326,0	4.186,9	6.754,6	2.567,8
Septiembre	14.847,6	1.718,5	3.093,3	6.518,4	3.425,2
Octubre	9.962,0	1.153,0	2.075,4	6.672,6	4.597,2
Noviembre	5.304,5	614,0	1.105,1	6.371,9	5.266,8
Diciembre	1.742,3	201,7	363,0	6.477,0	6.114,0
	Total	Total	Total	Total	Total
AÑO	149.251,6	17.274,5	31.094,1	77.223,8	46.129,7

6.3 Alternativa 3: Cobertura de la caldera a Pellets

Esta alternativa considera la instalación de una caldera a pellets para producir el total de energía térmica demandada por el polideportivo.

Del capítulo anterior se seleccionó la caldera TUERO 100. Conocido el rendimiento del equipo se puede determinar el consumo de combustible a partir de la ecuación (5.16), así:

$$\dot{m}_c = \frac{Q_{req}}{\eta_{Caldera} \cdot PCI} \left[\frac{kg}{mes} \right] \tag{6.12}$$

Obtenida la masa de Pellets, se puede determinar el costo de consumo mensual utilizando de manera análoga la ecuación (6.2). Luego el beneficio económico de este sistema viene dado por el ahorro

que se genera al producir calor en base a un producto de biomasa con respecto a la caldera a gas, donde dichos valores son expresados de manera mensual y anual en la tabla 6.4.

Tabla 6.4: Consumos y ahorros de caldera a pellets. Fuente [Propia]

Mes	Energía Total kWh/mes	Consumo Kg/mes	Costo Pellets US\$/mes	Costo GLP US\$/mes	Ahorro US\$/mes
Enero	30.635,4	8.714,6	2.963,0	6.382,4	3.419,4
Febrero	27.479,2	7.816,8	2.657,7	5.724,8	3.067,1
Marzo	30.544,5	8.688,8	2.954,2	6.363,4	3.409,3
Abril	29.940,2	8.516,9	2.895,7	6.237,5	3.341,8
Mayo	31.453,0	8.947,2	3.042,1	6.552,7	3.510,7
Junio	30.907,4	8.792,0	2.989,3	6.439,0	3.449,8
Julio	32.301,0	9.188,4	3.124,1	6.729,4	3.605,3
Agosto	32.422,2	9.222,9	3.135,8	6.754,6	3.618,8
Septiembre	31.288,4	8.900,4	3.026,1	6.518,4	3.492,3
Octubre	32.028,5	9.110,9	3.097,7	6.672,6	3.574,9
Noviembre	30.585,0	8.700,3	2.958,1	6.371,9	3.413,8
Diciembre	31.089,6	8.843,8	3.006,9	6.477,0	3.470,1
	Total	Total	Total	Total	Total
AÑO	370.674,2	105.443,0	35.850,6	77.223,8	41.373,2

Cabe destacar que al igual que el sistema de la alternativa 2 (termosolar), en el ahorro se contempla solo la diferencia entre los costos operacionales de la caldera a gas con respecto al sistema que se desea implementar, los costos asociados a los equipos de instalación se verán en el análisis económico del proyecto. Para determinar dichos costos primero se debe conocer y analizar el circuito con los equipos y/o accesorios que lo componen, como se verá en el siguiente capítulo.

Capítulo 7: Cálculo del circuito para los sistemas Termosolar y Biomasa

Determinada la cobertura energética termosolar y la de biomasa, es necesario conocer la manera de cómo distribuir dicha energía hasta los puntos de consumo. Dicha distribución dependerá de múltiples factores como la relación entre la demanda y la cobertura, costos de inversión, espacio físico entre otros, por lo tanto, se pueden obtener múltiples combinaciones de circuito para satisfacer todos los requerimientos.

7.1 Generalidades de los circuitos de energía termosolar y biomasa

Básicamente los sistemas solares térmicos, se dividen en 3 circuitos principales que son el primario, secundario y el de consumo, donde cada uno presenta diversos subsistemas, como se observa en la figura 7.1.

- El circuito primario está compuesto principalmente por el subsistema de captación térmica solar, el de acumulación y el circuito hidráulico con su respectivo control.
- El circuito secundario está compuesto por la energía auxiliar con su respectivo circuito hidráulico. En nuestro caso, dicha energía auxiliar será obtenida a partir de la caldera a gas.
- El circuito de consumo es aquel circuito hidráulico donde se contempla la distribución física real, emplazando duchas, lavamanos y piscina temperada. Cabe destacar que este circuito no será analizado a cabalidad, ya que el presente proyecto no evalúa un recinto existente.

Como se observa en la figura 7.2 el sistema de biomasa también posee subsistemas como el de generación térmica, acumulación (utilizando un tanque pulmón), circulación y control. El subsistema auxiliar se utiliza cuando la caldera es dimensionada con una capacidad menor a la requerida, pero sin duda la mayor diferencia radica en el circuito primario, ya que se obtiene la energía térmica utilizando una caldera a pellets con su respectivo almacenaje o silo de combustible.

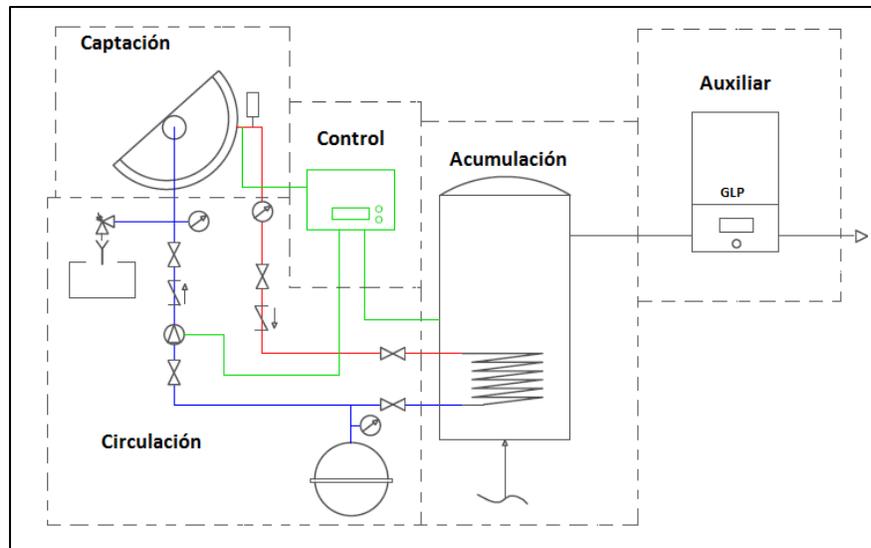


Figura 7.1: Configuración básica que conforma el sistema solar.

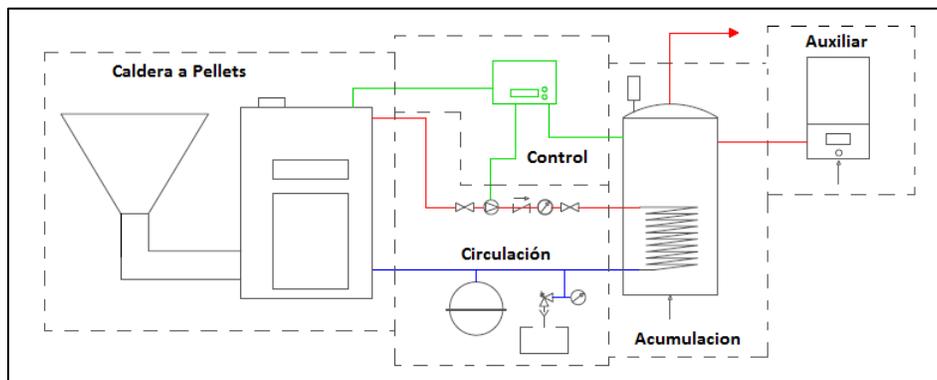


Figura 7.2: Configuración básica de sistema con biomasa.

Las figuras anteriores muestran las configuraciones básicas de un sistema que opera con energía solar y con biomasa, cuyos subsistemas se describen a continuación:

7.1.1 Subsistema de generación térmica

7.1.1.1 Captación Solar

Este subsistema transforma la radiación solar en energía térmica transferida al líquido caloportador y lo constituye básicamente el conjunto de concentradores solares, sus elementos de fijación e interconexión. El concentrador solar es el elemento básico del sistema, que calienta el fluido de trabajo y que por lo general es agua, anticongelantes o una mezcla de ellos.

7.1.1.2 Caldera a pellets

Este subsistema se encarga de obtener la energía térmica, calentando una masa de agua hasta la temperatura deseada gracias a la combustión del pellets. Para ello se utiliza una caldera con sus respectivas conexiones hidráulicas, entrada de combustible y evacuación de gases.

7.1.2 Subsistema de acumulación

Los consumos de ACS generalmente resultan ser un tanto irregulares, es por ello que se hace necesaria la instalación de un subsistema de acumulación para poder satisfacer dicha demanda energética a lo largo del día. Para aplicaciones como calefacción o piscinas temperadas cubiertas, este sistema no es necesario ya que se satisface de forma directa por intercambiadores de calor.

7.1.2.1 Energía Termosolar

Para este subsistema, se utiliza un termotanque. Este permite almacenar energía térmica con las mínimas pérdidas energéticas posibles. Los termotanques más frecuentes suelen ser depósitos de acero inoxidable u aceros con tratamientos especiales como resinas epoxi o esmaltes vitrificados, estos son aislados térmicamente y además están dotados de un intercambiador de calor. Cuando dicho intercambiador se sitúa en el interior, se le denomina interacumulador y si este se ubica al exterior, se le denomina acumulador.

Según la figura 7.3, el interacumulador es un termotanque que está dotado de uno o más serpentines que intercambian calor de manera indirecta entre el ACS y el fluido de captación solar.

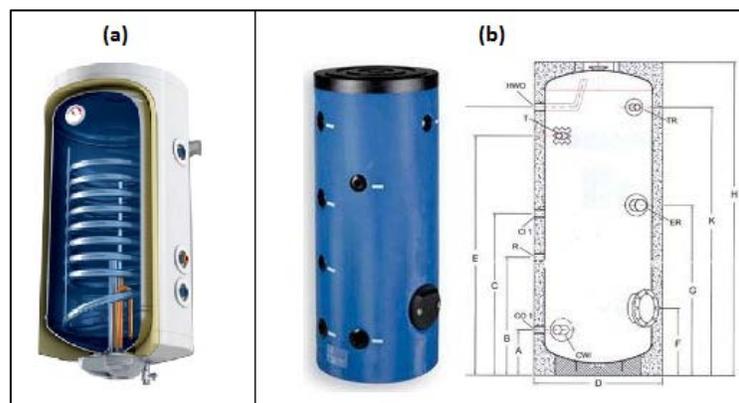


Figura 7.3: Interacumulador (a) y acumulador (b) de ACS.

Para el caso del acumulador, éstos sólo almacenan ACS en su interior por lo que se necesita un intercambiador externo y una bomba que haga circular el agua entre ambos. Los intercambiadores más utilizados para estas aplicaciones son los de placa plana.

Según la figura 7.4 los intercambiadores de placa están formados por varias placas apiladas por las que alternativamente circulan a contracorriente los fluidos de los circuitos primario y secundario, realizándose así la transferencia de calor por ambas caras, sin mezclar los fluidos de ambos circuitos. Este equipo es ideal para calentar fluidos en circulación, para sistemas medianos a grandes, además ahorra espacio físico en comparación a los intercambiadores tubulares, debido a que poseen mayor área de transferencia de calor.

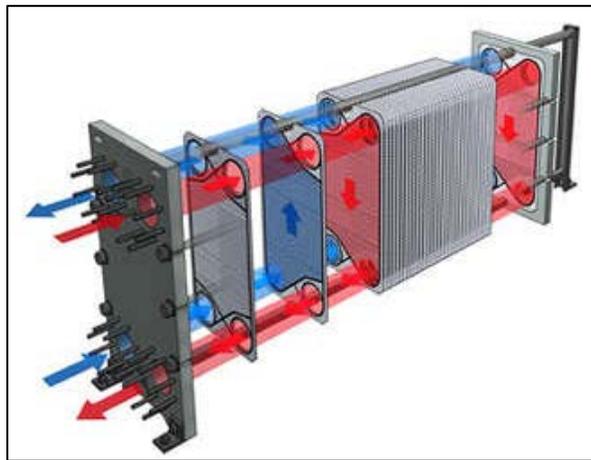


Figura 7.4 Intercambiador de calor de placas.

7.1.2.2 Caldera de biomasa

Para acumular energía en sistemas medianos a grandes, se utiliza un depósito denominado estanque pulmón. Este estanque posee un serpentín interno, el cual intercambia calor de manera indirecta entre el agua caliente de la caldera con respecto al ACS que se utilizará como consumo. Este equipo es análogo al interacumulador cuyo nombre se utiliza con más frecuencia en los sistemas de energía solar.

En general, un termotanque debe permitir que se produzca la estratificación, vale decir, que la temperatura del agua se distribuya verticalmente. Con esto se mejora el funcionamiento del sistema, ya que el agua más caliente se sitúa en la parte más alta del termotanque y es la que va al servicio, mientras que el agua que sale del acumulador al intercambiador es la más fría, ubicándose en la parte baja del equipo, mejorando así su eficiencia térmica.

7.1.3 Subsistema auxiliar

Cuando se utilizan energías renovables como la termosolar se debe tener presente que la generación de energía debe estar apoyada de un sistema tradicional, ya que el aporte solar en el invierno es menor debido a las condiciones climáticas adversas, la caldera a gas licuado en cambio entrega energía casi instantánea, debido a la facilidad de combustión que posee el gas.

Para la caldera a biomasa no se requiere apoyo auxiliar ya que estas se dimensionan para que cubran el 100% de la demanda energética.

7.1.4 Subsistema de circulación

Los principales elementos del sistema están unidos entre sí mediante conductos y accesorios con el fin de hacer llegar los fluidos y la energía que manejan a los distintos puntos de interés. Básicamente las redes hidráulicas están constituidas por:

7.1.4.1 Cañerías

Las cañerías y sus respectivos accesorios de unión (te, codos de 45 y 90°, reductores, entre otros según el espacio físico) sirven para canalizar el movimiento de los fluidos. Para circuitos primarios se recomienda el uso de cañerías de cobre, acero inoxidable o acero negro debido a su capacidad para soportar altas temperaturas y presión. Para el circuito secundario y de consumo se deben usar preferentemente cañerías de cobre. Las cañerías de materiales plásticos se podrán utilizar si sus materiales son compatibles con el ACS y garantizan durabilidad a las condiciones de trabajo que serán expuestas. No se deben utilizar cañerías de aluminio u otras que contengan plomo. Cabe destacar que las cañerías deberán poseer aislación térmica para reducir pérdidas de calor al ambiente.

7.1.4.2 Bombas de circulación

Las bombas de circulación, accionadas por un motor eléctrico, se encargan de mover el fluido en el circuito. Estas pueden ser de rotor seco o húmedo y deberán ajustarse a las condiciones de operación ya sea para el circuito primario y secundario.

Se debe tener presente que el circuito primario en la energía solar es un circuito cerrado donde se elimina el oxígeno disuelto mediante purgas, habitualmente es un circuito que solo recibe agua nueva en las reparaciones o reposiciones de fugas. Para el sistema con biomasa, el circuito primario

se asemeja al secundario ya que es un circuito abierto, en los que se está recibiendo de manera continua agua de la red, la cual es mucho más agresiva con los materiales que constituyen las instalaciones, además los materiales en contacto con esa agua no deben modificar su potabilidad. Debido a lo anterior los materiales más adecuados para estas bombas son el bronce o el acero inoxidable.



Figura 7.5: Bomba de circulación.

7.1.4.3 Válvulas de regulación

Las instalaciones térmicas deben poseer válvulas de regulación que permitan garantizar un correcto funcionamiento del sistema hidráulico, las más utilizadas son las que se describen a continuación:

- **Válvula motorizada:** Estas pueden ser de 2 o 3 vías, normalmente son de asiento y actúan mediante un servomotor que es comandado por un regulador que recibe las señales de las sondas de temperatura. Son del tipo todo-nada modificando los circuitos en operación. Estas válvulas deben poseer una respuesta rápida debido a las variaciones de temperatura que se producen en las demandas.



Figura 7.6: Válvula motorizada

- **Válvula de bola:** Es un tipo de válvula muy frecuente en circuitos hidráulicos, se emplean para abrir o cerrar el paso de fluido a través de una tubería lo que permite independizar componentes

del resto del circuito. Posee un obturador esférico perforado dentro del cuerpo que puede girar alrededor de su eje consiguiendo un cierre muy hermético.



Figura 7.7: Válvula de bola

- Válvula termostática: Son válvulas de tres vías que mezclan agua a dos temperaturas diferentes permitiendo regular la temperatura de salida, se suelen ubicar en los puntos de consumo, mezclando el agua caliente con el agua de la red.



Figura 7.8: Válvula termostática

- Válvula antirretorno: Conocida también como válvula Check, impide el paso de fluido en un sentido y permite la circulación en el otro. Suelen ser de clapeta, muelle o de disco. Es importante que no generen una elevada pérdida de carga en el circuito.

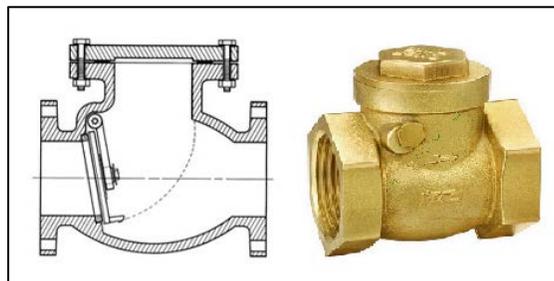


Figura 7.9: Válvula Check.

- Válvula de seguridad: Son válvulas de resorte donde el obturador permanece cerrado por la acción de un muelle. Cuando la presión del fluido es superior a la que ejerce el resorte, éste cede y el obturador se desplaza dejando pasar fluido evitando una sobrepresión.



Figura 7.10: Válvula de seguridad

- Válvula de equilibrado: Se utilizan para controlar y regular los caudales a la entrada del circuito equilibrándolos hidráulicamente. Puede ser manual o automática.



Figura 7.11: Válvula de equilibrado.

- Válvula eliminadora de aire: Este sistema de purga posee un dispositivo que permite la salida del aire que puede acumularse dentro de los circuitos en forma de burbujas dentro de las cañerías o elementos del sistema. El purgador puede ser manual o automático.



Figura 7.12: Válvula eliminadora de aire

7.1.4.4 Vaso de expansión

Para circuitos por donde circulen fluidos a temperaturas que varían en función del tiempo, se producirán cambios en el volumen del fluido de trabajo, por lo que será necesario absorber la dilatación mediante un vaso de expansión. Este corresponde a un recipiente cerrado dividido en 2 partes mediante una membrana elástica, por un lado se ubica el fluido de trabajo y por el otro un gas inerte como el aire o nitrógeno. Al dilatarse el fluido aumenta la presión y la membrana se desplaza comprimiendo el gas al otro lado. Este gas será de preferencia nitrógeno, ya que el oxígeno del aire más la humedad del entorno, puede provocar oxidación al interior del recipiente disminuyendo su vida útil.

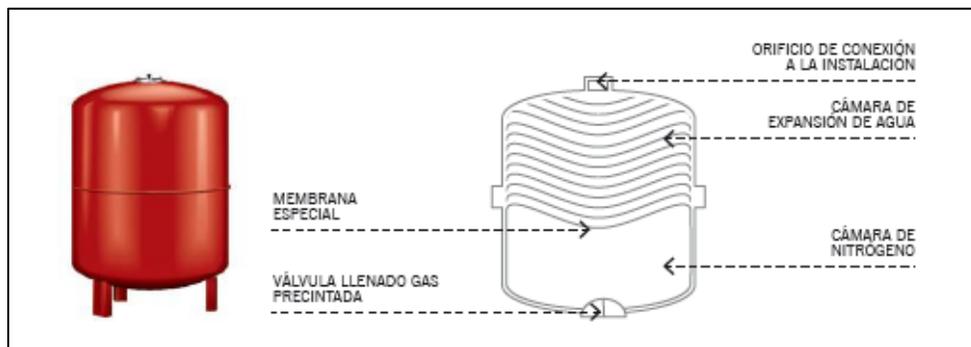


Figura 7.13: Vaso de expansión.

7.1.5 Subsistema de Control

Para un sistema de generación térmica, se deben ajustar para un correcto funcionamiento los equipos relacionados con el consumo, la captación o generación térmica, la acumulación, el aporte auxiliar y los monitoreos de presión y temperatura. De aquí surge la necesidad de que las instalaciones incluyan un subsistema de control.

Los elementos integrantes del sistema de control son:

- Sondas de temperatura.
- Manómetros.
- Válvulas motorizadas.
- Válvulas termostáticas.

Para la piscina temperada cubierta, la demanda energética se mantiene prácticamente constante, ya que posee un clima propio y además según las pérdidas térmicas de la ecuación (4.3) la temperatura

no cae más del 5% durante las horas de inactividad, debido a la gran masa de agua que posee. La demanda de ACS en cambio posee variaciones de consumo a lo largo del día. Los complejos deportivos tienen la particularidad de que poseen actividades grupales programadas tales como Spinning, Cardiobox, Aeróbica, entre otras. Estas clases duran en promedio una hora, donde al término de éstas se debe tener el ACS necesario para suplir las demandas de los camarines. Además de las clases grupales, hay actividades libres como partidos de Fútbol, Básquet, Voleibol entre otras, de las cuales no se tiene programada su hora de término ni la frecuencia, generando así picos de demanda a lo largo del día, como se puede observar en la figura 7.14

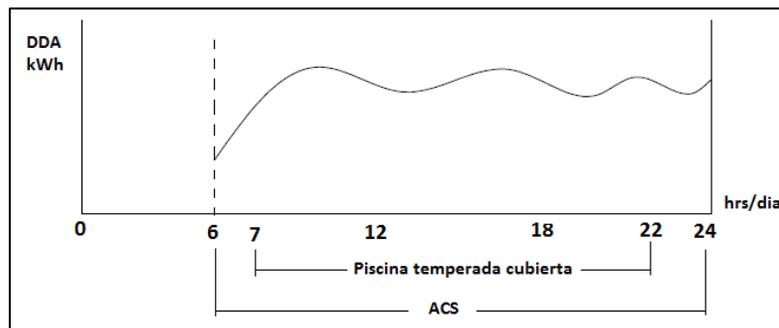


Figura 7.14: Demanda energética media durante un día.

Al tratarse de un alto consumo energético, se optó por un sistema que genere agua caliente de manera instantánea, ya sea para consumo sanitario y piscina. Este sistema optimiza la energía tradicional ya que la utiliza sólo cuando es obligatoriamente necesario, siendo útil para la energía termosolar y biomasa.

Luego de conocida las generalidades de los circuitos y el comportamiento de la demanda energética se procede a diseñar la configuración del sistema térmico, tanto para la energía termosolar como la de biomasa.

7.2 Diseño de circuito con energía termosolar

La figura 7.15 muestra el sistema termosolar a evaluar con sus principales componentes en los diversos subsistemas.

El funcionamiento de este sistema es el siguiente:

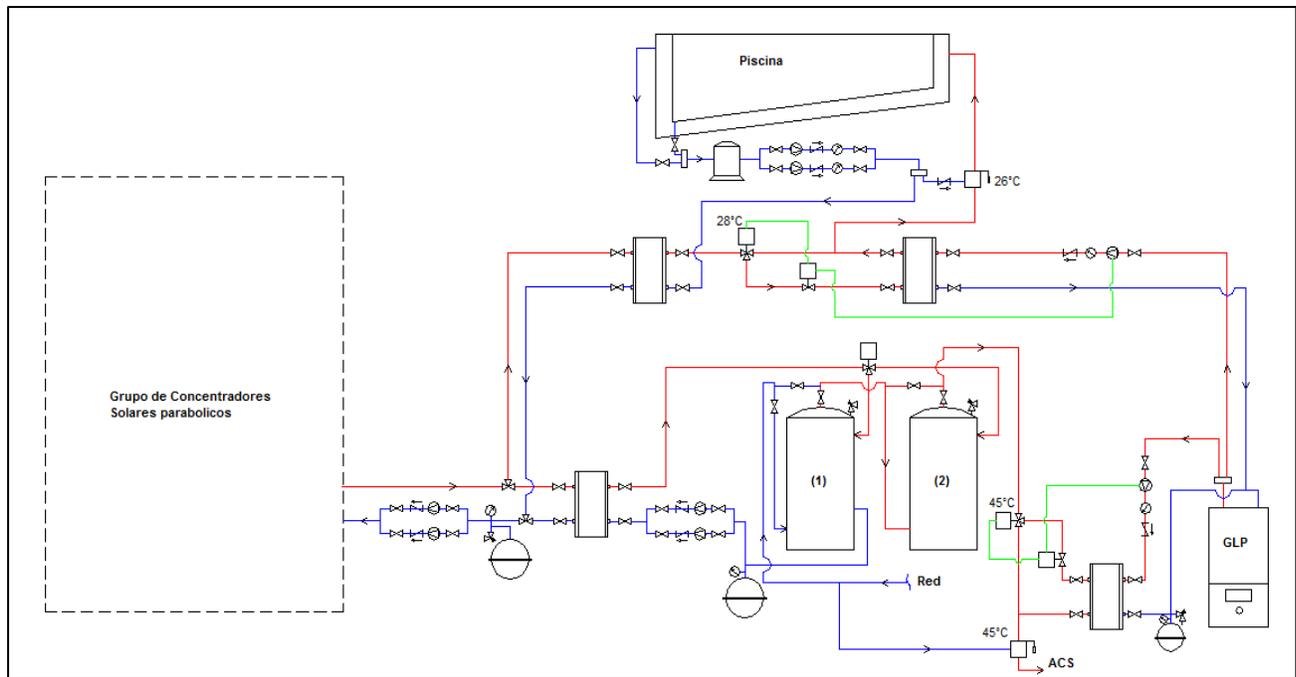


Figura 7.15: Sistema Termosolar a evaluar.

El fluido caloportador aumenta su temperatura en el conjunto de concentradores solares. Este circula de manera forzada hacia los intercambiadores de placa, uno destinado al sistema de acumulación y el otro para satisfacer los requerimientos de la piscina temperada. El fluido caloportador intercambia calor de manera indirecta con el agua que será el fluido de trabajo.

Para la obtención de ACS el agua requiere acumulación. Los acumuladores se encuentran conectados en serie simulando un sólo termotanque, donde una válvula motorizada determinará a que tanque ingresa el agua según su temperatura. El agua que sale del acumulador para consumo pasa a través de una válvula motorizada de 3 vías, cuando ésta cumple con la temperatura requerida, el agua circula de manera directa al consumo, en caso de que la temperatura sea inferior a la requerida, la válvula detendrá el paso de agua y la desviará hacia un circuito anexo que se conecta a un intercambiador de placa que funciona con el agua caliente de la caldera a gas (sistema auxiliar de apoyo). Cuando la válvula desvía el flujo de agua envía una señal a una segunda válvula motorizada de doble vía que permite la circulación de agua y a la vez envía una señal a la bomba de agua caliente de la caldera haciendo funcionar el sistema de manera simultánea. Luego el agua que es calentada por el intercambiador sale a consumo siendo regulada por una válvula termostática.

De la misma manera opera el circuito destinado a la piscina temperada, donde una válvula motorizada de 3 vías determinará según la temperatura del fluido si éste sigue a consumo o se desvía

a un circuito anexo, cuando ello ocurre envía la señal a una segunda válvula a que abra el paso de agua y ésta a su vez acciona una bomba para que circule el agua caliente proveniente de la caldera, de esta manera el agua aumenta su temperatura en el intercambiador, también de manera simultánea. Para asegurar que el agua ingrese a la piscina con una temperatura adecuada una válvula termostática realizará, cuando sea necesario, una mezcla con el agua más fría que sale de la piscina de manera automática.

7.2.1 Subsistema captación

Como ya se analizó en el capítulo 5, se utilizarán 60 concentradores ABSOLICON modelo X10 T cuya cobertura anual equivale a 60,3%. La configuración y conexión de los concentradores dependerá del espacio físico que dispone el recinto. Para instalaciones medianas a grandes, el fabricante recomienda la instalación realizando series de 10 concentradores, luego la conexión será en serie-paralelo dentro de un área rectangular como se observa en la figura 7.16. Estos se conectarán de manera paralela en 6 grupos de 10 concentradores que serán conectados en serie. La configuración posee un retorno invertido y equilibrado del agua, agregando una cañería de alimentación al circuito, provocando así una distribución más uniforme gracias a las pérdidas de carga.

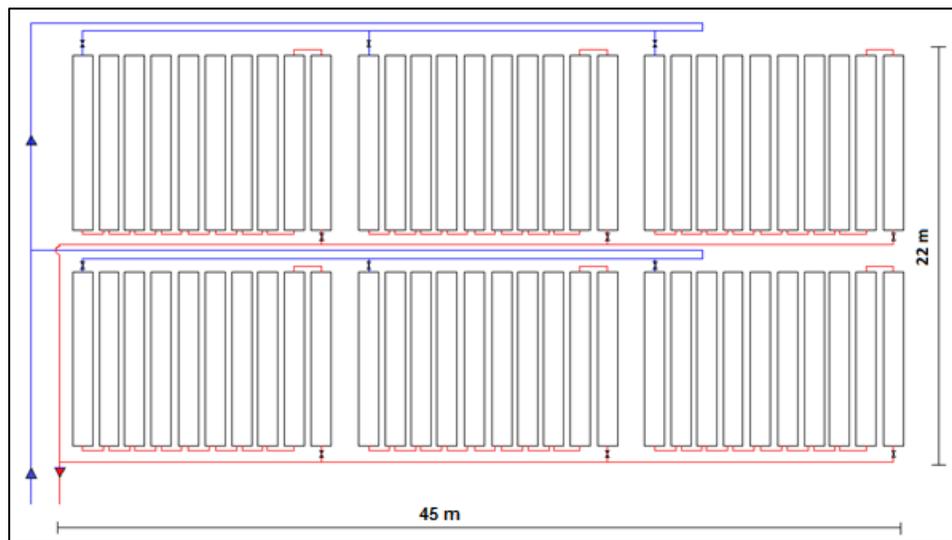


Figura 7.16: Vista superior de concentradores con conexión serie-paralelo.

7.2.2 Subsistema de Acumulación

Como la instalación posee una superficie de captación de $S_c = 622,2 [m^2]$, el subsistema de acumulación utilizará un tanque acumulador con un intercambiador de placa externo.

- Acumulador

Para el sistema de acumulación se recomienda utilizar un volumen que depende del área total de concentradores y se ubique dentro del rango:

$$40 \leq \frac{V}{S_c} \leq 180 \quad (7.1)$$

Al multiplicar este valor por el área total de captación, el volumen de acumulación estaría en un claro sobredimensionamiento, ya que la cobertura solar fue calculada para suplir la demanda energética total y como se ha hecho mención, la piscina temperada no posee un sistema de acumulación.

Por lo tanto, para determinar la masa de ACS de acumulación durante un día (\dot{m}_{Acum}) se utiliza la expresión (7.2), que relaciona la máxima cantidad de ACS que aporta la energía solar, respecto a su calor específico y diferencia de temperatura, así:

$$\dot{m}_{Acum} = \frac{Q_{ACS_max}}{C_{agua} \cdot (T_{salida} - T_{red}) \cdot N_{dias/mes}^o} \left[\frac{kg}{día} \right] \quad (7.2)$$

Donde

Q_{ACS_max} : Energía demandada de ACS durante el mes de máximo aporte solar [kWh/mes]

T_{Salida} : Temperatura deseada del agua para el consumo [$^{\circ}C$]

Luego la masa de acumulación diaria de ACS corresponde a:

$$\dot{m}_{Acum} = \frac{8.873,36 kWh/mes \cdot 0,988}{0,001163 kWh/(kg K) \cdot (45 - 15,7)^{\circ}C \cdot 31 dias/mes} \Rightarrow \dot{m}_{Acum} = 8.300 \left[\frac{kg}{día} \right]$$

En el mercado no hay termotanques con dicho volumen, por lo tanto se instalarán 2 acumuladores de la misma capacidad, ya que así tendrán un comportamiento térmico más homogéneo, cuyas características son las siguientes:

Tabla 7.1: Características de Acumulador para ACS. Fuente [13]

Modelo	SICC 116 PE CAL	
Capacidad	5.000	litros
Pérdidas Térmicas	8,93	kW
Presión de trabajo	8	bar
Cantidad	2	
Disipación térmica	0,496	kW/h

Para mayores detalles, ver ANEXO II sección A.2.3.

Se instalarán con acumulación centralizada, de manera vertical para favorecer la estratificación y al interior del recinto, para evitar daños y mal funcionamiento debido al clima. Se conectarán en serie de flujo invertido (ver figura 7.15) y que a diferencia de la conexión en paralelo, no requiere un correcto equilibrio entre el calentamiento y el consumo ya que funciona simulando un sólo termotanque. Los acumuladores deben poseer aislación térmica para minimizar las pérdidas al ambiente, el modelo seleccionado posee aislación, pero en el caso de una futura reposición el mínimo espesor de aislante se obtendrá según la siguiente expresión empírica:

$$e_{\min} \geq \frac{50 \cdot \lambda}{0,04} \tag{7.3}$$

Donde

e_{\min} : Espesor mínimo de aislación en [mm]

λ : Conductividad térmica del aislante en $[W / (m K)]$

- Intercambiador de Placa

Para el dimensionado del intercambiador consideraremos su efectividad térmica, este valor debe ser al menos 0,7 y se define a continuación:

$$\varepsilon = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}} = \frac{Q}{C_{\min} \cdot (T_{ce} - T_{fe})} \tag{7.4}$$

Donde

T_{fs} : Temperatura a la salida del intercambiador por el lado de acumulación [$^{\circ}C$]

T_{fe} : Temperatura a la entrada del intercambiador por el lado de acumulación [$^{\circ}C$]

T_{ce} : Temperatura a la entrada del intercambiador por el lado de captación [$^{\circ}C$]

Q : Calor intercambiado por el intercambiador de placa [kWh / mes]

C_{min} : Menor capacidad calorífica entre el subsistema de captación y acumulación [$\dot{m}_{int} \cdot C_p$]

Los intercambiadores se dimensionan de modo que la diferencia de temperatura entre el fluido que entra por el lado de captación respecto al que sale por el lado de acumulación no supere los $5[^{\circ}C]$, la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del fluido de un mismo lado no debe superar los $10 [^{\circ}C]$ y además las pérdidas de carga no serán superiores a 100 mbar por lado. Así utilizando la ecuación (7.4) y además para efectos de cálculo se considerará que la entrada del fluido caloportador al intercambiador por el lado de captación posee una temperatura media de $70 [^{\circ}C]$ la efectividad corresponde a $\varepsilon = 71,4\%$

Luego la capacidad del intercambiador en [kWh / mes] corresponde al cociente entre el mes de mayor demanda energética de cada aplicación con la efectividad térmica y según las horas de funcionamiento mensual, se puede expresar a modo de potencia térmica como se muestra a continuación:

$$Q_{IC} = \frac{Q_{max}}{\varepsilon \cdot horas_{mes}} \quad (7.5)$$

Donde

Q_{IC} : Potencia térmica necesaria en el intercambiador ya sea de ACS o Piscina [kW]

Q_{max} : Máxima demanda energética en un mes durante el año [kWh / mes]

Luego

$$Q_{IC_{ACS}} = \frac{Q_{max}}{\varepsilon \cdot horas_{mes}} + Pérdidas_{Acum} = \frac{10.660,2 [kWh / mes]}{0,714 \cdot 18 \cdot 31 [h / mes]} + 8,93 [kW] \Rightarrow Q_{IC_{ACS}} = 35,7 [kW]$$

$$Q_{IC_p} = \frac{Q_{\max}}{\varepsilon \cdot \text{horas}_{\text{mes}}} = \frac{21.762 [kWh / \text{mes}]}{0,714 \cdot 15 \cdot 31 [h / \text{mes}]} \Rightarrow Q_{IC_p} = 65,6 [kW]$$

Tabla 7.2: Características de los Intercambiadores de placa. Fuente [13]

Modelo ACS	UNEX PGT MED.	Unidades
Capacidad	50.000	kCal/h
Presion max.	10	bar
Cantidad	1	
Modelo Piscina	UNEX PGT MED.	Unidades
Capacidad	70.000	kCal/h
Presion max.	16	bar
Cantidad	1	

Determinado los equipos a utilizar, se puede observar de la figura (7.15) que de la conexión en serie pueden surgir las siguientes situaciones de funcionamiento a lo largo del día:

- Hay consumo de ACS y circuitos operando

Esto supone que tanto el subsistema de captación como el de acumulación se encuentran funcionando y a su vez hay consumo de ACS. Para este caso, el fluido caliente sale del intercambiador a una temperatura variable, este es discriminado por una válvula motorizada de 3 vías según su temperatura, si ésta es menor a 50 [°C], ingresa por la parte superior al acumulador más frío (1), calentándose e ingresando por la parte inferior del acumulador más caliente (2), para luego salir a consumo. Si la temperatura es \geq a 50 [°C], entonces pasa directamente al acumulador (2), para luego salir a consumo.

- No hay consumo de ACS pero los circuitos funcionando

También se puede dar el caso que durante algunos lapsos no exista consumo de ACS pero los circuitos por conveniencia siguen funcionando de manera programada (según análisis del polideportivo) para evitar un consumo extra de energía en la partida del motor eléctrico de cada bomba. El agua sale del acumulador (1) aspirado por la bomba y entra al intercambiador, si a la salida la temperatura es mayor a 50 [°C] este llega al acumulador (2) saliendo por la parte inferior e ingresando por la parte superior al acumulador (1) cerrando el circuito. Si la temperatura es menor a

50 [°C], ingresa al acumulador (1) por la parte superior para luego ser aspirada por la parte inferior y cerrar el circuito.

7.2.3 Subsistema auxiliar

Este subsistema estará compuesto de la caldera a GLP la cual aportará la energía térmica faltante para suplir las necesidades demandadas. Como el recinto ya se encuentra en operación se considera que la caldera sule todas las demandas y además incluye su respectivo estanque pulmón que puede ser externo o interno a la caldera. Estos equipos no tendrán modificación ni serán reemplazados, puesto que es una inversión ya realizada por el polideportivo y se mantendrán hasta el final de la vida útil proyectada.

Como la idea de este sistema es producir agua caliente de manera instantánea, a este subsistema se agregarán 2 intercambiadores de placa de potencia igual o mayor a la caldera. Un intercambiador estará destinado a dar apoyo al agua caliente que sale de los termotanques acumuladores y el otro para el agua destinada a la piscina temperada. Luego las características del intercambiador son las siguientes:

- Modelo: UNEX PGT MED.
- Capacidad: 70.000 [kCal / h]
- Presión máxima: 16 [bar]
- Cantidad: 2

7.2.4 Subsistema de circulación

Según la figura 7.15 se definirán las siguientes variables de los circuitos hidráulicos a evaluar:

cap.total : Corresponde al fluido que circula entre el conjunto de concentradores solares hasta el grupo modular que separa los caudales que se dirigen a los intercambiadores de ACS y piscina.

cap.ACS : Fluido que circula entre el grupo modular y el intercambiador de placa destinado a producir ACS.

cap.piscina : Fluido que circula entre el grupo modular y el intercambiador dirigido a la piscina.

acum.ACS: Fluido que circula entre los intercambiadores de captación y el auxiliar incluyendo ambos acumuladores.

Piscina: Fluido que circula entre los intercambiadores de captación y el auxiliar incluyendo las salidas y entrada de agua en la piscina.

AUX_{acum}: Fluido que circula entre la caldera y el intercambiador para producir ACS instantánea.

AUX_{piscina}: Fluido que circula entre la caldera y el intercambiador de apoyo para la piscina.

7.2.4.1 Caudal de los circuitos

- Captación Solar

Por el circuito de captación circula el fluido caloportador que consiste en una mezcla de agua y glicol propilénico. Según ABSOLICON se debe usar Tyfocor-L cuyo volumen debe ser equivalente al 30% del total. El Tyfocor-L es un anticongelante y anticorrosivo de acción prolongada para instalaciones de calefacción y refrigeración en circuitos de agua, instalaciones de energía solar e instalaciones con bombas de calor, luego las características físicas del fluido caloportador a una temperatura media de 40 [°C] son las siguientes:

- Densidad (ρ): 1020 [kg /m³]
- Viscosidad cinemática (ν): $1,7 \cdot 10^{-6}$ [m² / s]
- Calor específico (C_p): $0,00108 \left[\frac{kWh}{kg K} \right]$

Como recomendación del fabricante, por el tubo receptor debe circular un caudal de 10 [l / min] esto dividido por el área de apertura, el caudal óptimo por cada concentrador equivale a $57,86 \left[l / (h m^2) \right]$. Luego el caudal total que debe circular en el subsistema de captación ($\dot{V}_{cap.total}$) equivale a 36.000 [l / h]. Cabe destacar que este caudal se debe dividir en 2 ya que una parte ira al intercambiador del sistema de acumulación y el otro al intercambiador destinado a la piscina, como se observa en la figura 7.15.

Así el balance de masas corresponde a:

$$\dot{m}_T = \dot{m}_{cap ACS} + \dot{m}_{cap Piscina} \quad (7.6)$$

Donde

\dot{m}_T : Flujo másico total del sistema de captación [kg / dia]

$\dot{m}_{cap ACS}$: Flujo másico destinado al intercambiador de ACS [kg / dia]

$\dot{m}_{cap Piscina}$: Flujo másico destinado al intercambiador de la Piscina temperada [kg / dia]

Se puede expresar el flujo másico que es destinado al intercambiador de ACS y Piscina temperada como el calor necesario por cada equipo (Q_{IC}) en función de la temperatura de salida del fluido caloportador (T_{sc}) hacia los concentradores para que satisfaga la ecuación (7.6);

$$\dot{m}_T = \frac{Q_{IC_{ACS}} \cdot h_{dia}}{0,00108 \cdot (70 - T_{sc})} + \frac{Q_{IC_P} \cdot h_{dia}}{0,00108 \cdot (70 - T_{sc})} \quad (7.7)$$

Como el calor de intercambio y el flujo másico total es conocido aplicando la ecuación anterior se determina la temperatura de salida y los respectivos caudales de fluido caloportador

$$T_{sc} = 67,67 [^{\circ}C] \quad \dot{V}_{cap ACS} = 14.217,4 [l / h] \quad \dot{V}_{cap Piscina} = 21.782,6 [l / h]$$

- Subsistema de acumulación y piscina

Para este caso, el fluido de trabajo corresponde al agua que va directamente a consumo, donde su caudal debe garantizar una correcta transferencia de calor en el intercambiador. Si este caudal es excesivo disminuye la temperatura de salida y rompe la estratificación del acumulador, bajando la eficiencia del sistema. Normalmente se define el caudal en función del subsistema captador, así:

$$0,9 \cdot \dot{V}_{captacion} \leq \dot{V}_{acumulacion} \leq \dot{V}_{captacion} \quad (7.8)$$

La expresión anterior puede funcionar de manera análoga para el caudal destinado a la piscina temperada. Luego considerando un factor de 0,97

$$\dot{V}_{acum. ACS} = 13.790,9 [l / h] \quad ; \quad \dot{V}_{piscina} = 21.129,1 [l / h]$$

- Subsistema Auxiliar

El fluido de trabajo corresponde al agua caliente producida por la caldera. Una parte de ese fluido va dirigido al intercambiador de ACS y la otra al intercambiador de la Piscina. Los respectivos caudales se calculan con la expresión (7.8) y utilizando un factor de 0.98, se tiene:

$$\dot{V}_{AUX\ acum} = 13.515,1 [l/h] \quad ; \quad \dot{V}_{AUX\ piscina} = 20.706,5 [l/h]$$

7.2.4.2 Diámetros y pérdidas de carga

- Subsistema de captación

Las pérdidas de carga en este subsistema vienen dadas por las pérdidas que existen tanto en los concentradores, en la circulación del fluido caloportador mediante las cañerías con sus accesorios y la pérdida de carga en el intercambiador. ABSOLICON indica que las pérdidas de carga por cada concentrador equivalen a 80 [Pa] para el caudal de 10 [lt/min] (recomendado), luego las pérdidas de carga para los 60 captadores equivale a 81,6 [mm.c.a.]. Las pérdidas de carga por el intercambiador según catálogo no deben ser mayores a 10.000 [Pa], por lo tanto, se considerará un valor 1.000 [mm.c.a.] por lado.

Una vez determinado los caudales del circuito de captación se procede a calcular los diámetros de las cañerías en función de las pérdidas de carga unitarias. Para tales efectos se tomarán en cuenta los siguientes criterios recomendados según catálogo de instalaciones térmicas para Chile:

- Se dimensionarán las cañerías de forma que la velocidad de circulación del fluido no supere los 2 [m/s].
- Las pérdidas de carga no deberán superar los 40 [mm.c.a./m] (milímetros de columna de agua por metro lineal de longitud).
- Se utilizarán cañerías de cobre.

Luego las pérdidas de carga se determinan con la siguiente ecuación

$$H_u = 0,0378 \cdot a \cdot b \cdot \frac{\dot{V}^{1,75}}{0,0001 \cdot D^{4,75}} \quad (7.9)$$

Donde

H_u : Pérdidas de carga unitarias con un máximo de 40 [mm.c.a./m].

a: Factor adimensional de corrección por el tipo de fluido de trabajo, vale 1 si es agua y 1,3 si es una mezcla con Tyfocor-L.

b: Factor adimensional de corrección de pared por el interior de la cañería, tiene un valor de 1 si es una pared lisa y 1,3 si es rugosa.

\dot{V} : Caudal del fluido de trabajo en [l/h].

D: Diámetro de la cañería en [mm].

Despejando *D* se obtiene el diámetro para la cañería del sistema de captación, el intercambiador de ACS y la piscina, luego se tiene respectivamente:

$$D = \left[\frac{378 \cdot 1,3 \cdot 1,3 \cdot (36000 \text{ lt/h})^{1,75}}{40} \right]^{1/4,75} \Rightarrow D_{cap.total} = 85,5 \text{ [mm]}$$

$$D = \left[\frac{378 \cdot 1,3 \cdot 1,3 \cdot (14.217,4 \text{ l/h})^{1,75}}{40} \right]^{1/4,75} \Rightarrow D_{cap.ACS} = 60,72 \text{ [mm]}$$

$$D = \left[\frac{378 \cdot 1,3 \cdot 1,3 \cdot (21.782,6 \text{ l/h})^{1,75}}{40} \right]^{1/4,75} \Rightarrow D_{cap.Piscina} = 71,05 \text{ [mm]}$$

Una vez obtenido el diámetro se ajusta a un valor normalizado en el mercado, para luego calcular la velocidad con la siguiente expresión:

$$\bar{v} = 0,354 \cdot \frac{\dot{V}}{D^2} \tag{7.10}$$

Donde la velocidad se expresa en [m/s], los diámetros normalizados, espesores y sus respectivas velocidades se ilustran en la siguiente tabla.

Tabla 7.3: Diámetros normalizados y velocidades de fluido caloportador. Fuente [Propia]

Circuito	Diámetro calculado	Diámetro nominal		Espesor	Velocidad
	mm	in	mm	mm	m/s
cap. Total	85,5	4	101,6	3,40	1,23
cap ACS	60,72	2,5	63,5	2,41	1,19
cap Piscina	71,05	3	76,2	2,77	1,37

A modo de cuantificación, según la figura 7.15 se considerará para el sistema de captación una longitud de cañería de 350 [m], para los caudales que se dirigen al intercambiador de acumulación como al intercambiador de la piscina se considerará una longitud de 10 [m] cada uno, luego las pérdidas de carga regulares se obtienen multiplicando estas longitudes con las pérdidas de carga unitarias calculadas a partir de la ecuación (7.9).

Las pérdidas de carga singulares se considerarán que equivalen a un 70% de las pérdidas regulares, ya que no se conoce la distribución de las cañerías y por ende los accesorios tales como reductores, te o codos no se pueden determinar a cabalidad.

Tabla 7.4: Pérdidas de carga para sistema de captación. Fuente [Propia]

circuito	Longitud m	Caudal l/h	H_u mm.c.a./m	H_{REG} mm.c.a.	H_{SIN} mm.c.a.	H_{TOTAL} mm.c.a.
cap. Total	350	36.000	17,6	6.169,2	4.318,5	10.487,7
cap ACS	10	14.217,4	32,3	323,3	226,3	549,7
cap Piscina	10	21.782,6	28,7	286,9	200,9	487,8
Total	370			6.779,5	4.745,6	11.525,1

Donde

H_{REG} : Pérdidas de carga regulares del circuito

H_{SIN} : Pérdidas de carga singulares del circuito

H_{TOTAL} : Sumatoria de pérdidas regulares y singulares

Luego las pérdidas de carga totales del subsistema de captación corresponden a la suma de las pérdidas del concentrador, a las pérdidas regulares/singulares y el intercambiador. Dichas pérdidas totales equivalen a 13.606 [mm.c.a.]

- Acumulación de ACS y Piscina temperada

Conocido los caudales se utiliza la ecuación (7.9) para determinar el diámetro de la cañería para luego ajustarlo a un diámetro comercial. Conocido el diámetro se utiliza la ecuación (7.10) para determinar la velocidad. Se considerarán los mismos criterios de diseño para las cañerías de cobre mencionados anteriormente (subsistema de captación). Luego:

Tabla 7.5: Diámetros y velocidades de cañerías destinados a Piscina y acumulación. Fuente [Propia]

Circuito	Diámetro calculado	Diámetro nominal		Espesor	Velocidad
	mm	in	mm	mm	m/s
acum. ACS	60,04	2,5	63,5	2,41	1,16
Piscina	70,25	3	76,2	2,77	1,32

Como se desconoce el emplazamiento físico del recinto, para determinar las pérdidas regulares se considerará una longitud de 20 [m] para las cañerías de acumulación y 25 [m] a las de piscina, además las pérdidas singulares se considerarán del mismo valor que las regulares para la acumulación y el doble para la piscina, luego:

Tabla 7.6: Pérdidas de carga para circuito de acumulación y piscina. Fuente [Propia]

circuito	Longitud m	Caudal l/h	H_u mm.c.a./m	H_{REG} mm.c.a.	H_{SIN} mm.c.a.	H_{TOTAL} mm.c.a.
acum. ACS	20	13.790,9	30,7	613,1	613,1	1.226,2
Piscina	35	21.129,1	27,2	952,1	1.904,3	2.856,4
Total	55	34.920		1.565,2	2.517,4	4.082,6

Así las pérdidas de carga totales para el subsistema de acumulación y piscina temperada corresponde a la suma entre las pérdidas de los intercambiadores (interactuando en 4 lados) con las regulares y singulares, de esa manera las pérdidas equivalen a 8.082,6[mm.c.a.]

- Subsistema auxiliar

Este sistema presenta pérdidas regulares/singulares y en los intercambiadores de calor. Para las pérdidas regulares se considerará una longitud de 15 [m] para el flujo que apoya al acumulador y 30 [m] para el flujo que apoya a la piscina, las pérdidas singulares se considerarán iguales a las regulares, luego siguiendo con la metodología antes expuesta, se tiene:

Tabla 7.7: Pérdidas de carga para sistema auxiliar. Fuente [Propia]

circuito	Longitud m	Diametro mm	Caudal l/h	H_u mm.c.a./m	H_{REG} mm.c.a.	H_{SIN} mm.c.a.	H_{TOTAL} mm.c.a.
AUX acum	15	63,5	13.515,1	29,6	443,8	443,8	887,7
AUX Piscina	30	76,2	20.706,5	26,3	787,8	787,8	1.575,5
Total	45		34.221,6		1.231,6	1.231,6	2.463,2

Así las pérdidas de carga totales equivalen a la suma entre la pérdida total de la tabla 7.7 y el intercambiador de calor (considerando 2 lados), luego el valor corresponde a 4463,2 [mm.c.a.] .

7.2.4.3 Bombas de circulación

Las bombas de circulación se deben ubicar en las zonas frías del circuito o en las zonas donde la temperatura no afecte el correcto funcionamiento de ésta. Las bombas se instalan en tuberías verticales, evitando las zonas bajas del circuito ya que retienen suciedad. La selección de la bomba será en base al caudal y las pérdidas de carga del fluido de trabajo, evaluado en las secciones anteriores.

Al tratarse de un sistema con una gran superficie de captación, para los circuitos de captación solar, el de acumulación de ACS y el de piscina temperada se instalaran 2 bombas idénticas en paralelo, alternando periodos de funcionamiento entre ellas, además para el circuito del subsistema auxiliar, se supondrá que las bombas se encuentran en operación y son una inversión ya realizada. Luego:

Tabla 7.8: Modelo de bombas a utilizar en subsistemas. Fuente [Propia]

Características	Cap. total	acum. ACS	Piscina
Caudal (m3/h)	36	13,7	21,12
Pérdidas de carga (m)	14,01	3,22	4,86
Marca bomba	NOCCHI	NOCCHI	NOCCHI
modelo	A4L 80-200	R4C 50-60	R4C 80-60
cantidad	2	2	2

Para mayor información técnica de las bombas, ver ANEXO II sección A.2.4.

7.2.4.4 Aislación Térmica

Para disminuir las pérdidas térmicas al ambiente, se deben aislar todas las cañerías, accesorios y componentes, excepto tanques de expansión. El aislamiento no debe dejar zonas visibles en cañerías, salvo elementos que requieran lectura como manómetros o termómetros.

Los espesores de aislación se obtendrán bajo los siguientes criterios:

- La temperatura ambiente se tomará el valor medio anual equivalente a 12 [°C] en los tramos exteriores del circuito y 20 [°C] en los tramos interiores.
- La conductividad térmica de referencia (λ_{ref}) del aislante será 0,04 [W / (mK)]

- Se considerará una velocidad del aire nula y por ende la resistencia térmica convectiva entre la superficie de la cañería y al aire se desprecia.
- Para cañerías ubicadas al exterior, se le agregaran 10 [mm] al espesor de aislante calculado.

Luego el espesor de aislación de las cañerías según el RITCH¹⁰ (2007), viene dado por la siguiente expresión:

$$e \geq \frac{D_i}{2} \left[\exp \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_{ref}} \cdot \ln \frac{D_i + 2 \cdot e_{ref}}{D_i} \right) - 1 \right] \quad (7.11)$$

Donde

e : Espesor de la aislación en [mm]

D_i : Diámetro interior del cilindro de la aislación equivalente al diámetro exterior de la cañería [mm]

λ_a : Conductividad térmica del material aislante en [W / (m K)]

e_{ref} : Espesor de referencia del aislante [mm] (tabla 7.9)

Tabla 7.9: Espesores referenciales de aislante en [mm] respecto a la temperatura de trabajo. Fuente [14]

Diámetro exterior in	Temperatura del fluido en °C			
	40 a 65	66 a 100	101 a 150	151 a 200
$D_i < 1 \frac{1}{4}$	20	20	30	40
$1 \frac{1}{4} < D_i < 2$	20	30	40	40
$2 < D_i < 3$	30	30	40	50
$3 < D_i < 5$	30	40	50	50
$D_i > 5$	30	40	50	60

Se utilizarán caños premoldeados de lana mineral, estos son cilindros completos y se fabrican según Norma ASTM C-547, con diámetros desde 1/2 hasta 24 [in] cuyos espesores de aislación van desde los 25 hasta los 100 [mm]. La conductividad térmica equivale a 0,042 [W / m K] cuya temperatura máxima de trabajo es 800 [°C].

¹⁰ Reglamento de Instalaciones Térmicas de Chile

Luego aplicando la ecuación (7.11) se determinará el espesor de aislación para los diversos circuitos del sistema, como se ilustran a continuación:

Tabla 7.10: Espesores de aislación de cañerías para diversos subsistemas. Fuente [Propia]

Subsistema	circuito	Diámetro Ext. mm	Ubicación	Espesor mm
Captación	cap. total	108,4	Exterior	53,0
	cap. ACS	68,32	Interior	32,0
	cap. Piscina	81,74	Interior	43,0
Acumulación y Piscina	acum. ACS	68,32	Interior	32,0
	Piscina	81,74	Interior	32,0

7.2.4.5 Válvulas y tanque de expansión

- Válvulas

Se utilizarán válvulas de corte a la entrada y salida de los elementos que componen el sistema solar, permitiendo su adecuado mantenimiento sin necesidad que éste deje de funcionar evitando realizar un vaciado completo a la instalación. Los elementos son cada grupo de concentradores solares, acumuladores, intercambiadores y bombas. En el caso que no exista conexión en paralelo, se debe instalar un bypass que permita un funcionamiento continuo del sistema.

Las válvulas de seguridad se instalarán en cada uno de los circuitos del sistema, en cada grupo de concentradores y acumuladores. Estas deben ser acompañadas de un manómetro y deben incorporar un sistema de escape guiado hacia un desagüe, garantizando la seguridad de las personas en caso de descarga.

Las válvulas de antirretorno se instalarán en las líneas de alimentación de agua fría para cada bomba conectada en paralelo, evitando circulaciones indeseadas y permitiendo la conmutación automática de las mismas.

La válvula purgadora se instalará en cada grupo de concentradores solares, permitiendo la salida del aire del circuito.

Las válvulas motorizadas y las termostáticas permitirán el adecuado funcionamiento del sistema, alternando según la temperatura del fluido el aporte de energía solar, como el aporte de la caldera a gas.

La siguiente tabla muestra a modo de resumen, las válvulas a utilizar en el sistema Termosolar:

Tabla 7.11: Cuantificación de válvulas a utilizar. Fuente [Propia]

Válvulas	cap. total	cap. ACS	cap. Piscina	Acum. ACS	Piscina	Total por valvula
Corte	16	4	4	13	6	43
Seguridad	7	0	0	2	1	10
Antirretorno	2	0	0	3	3	8
Purgadora	6	0	0	0	0	6
Motorizada 2 vías	0	0	0	1	1	2
Motorizada 3 vías	0	0	0	2	1	3
Termostática	0	0	0	1	1	2
Total por circuito	31	4	4	22	13	74

- Tanque de expansión

Además de las válvulas de seguridad, se utiliza como medio de seguridad en las sobrepresiones un tanque de expansión. Estos tanques otorgan seguridad a las altas temperaturas del sistema ya que absorben la formación de vapor.

Se deben instalar en el circuito de captación solar, en el acumulador y en el circuito auxiliar (se considerará que en el circuito auxiliar ya existe un tanque de expansión). El volumen útil (V_U) del tanque de expansión se dimensiona en base a la potencia instalada del sistema. Luego según catalogo ERCE se tiene:

- Marca/modelo: ERCE 100
- Capacidad: 100 [l]
- Presión máxima: 5 [bar]
- Cantidad: 2

7.3 Diseño del circuito que utiliza energía de Biomasa

La figura 7.17 muestra el sistema de generación térmica a evaluar. El agua como fluido de trabajo aumenta su temperatura en la caldera a pellets por debajo de la saturación, luego circula de manera forzada hacia un intercambiador de placa y al tanque pulmón para producir ACS.

En el intercambiador de placa de la piscina temperada el agua intercambia calor de manera indirecta con el agua extraída de la piscina previo paso por un sistema de filtrado. El agua caliente que retorna a la piscina pasa a través de una válvula termostática que determina si la temperatura corresponde a los 26 [°C] establecidos, en caso contrario realizará una mezcla con una parte del agua fría extraída de la piscina.

La producción de ACS será de manera instantánea. El agua primeramente será almacenada en un termotanque pulmón y estará conectada a un intercambiador de placa. Cuando hay consumo el agua fría (red) pasa a través del intercambiador produciendo de esa manera ACS de forma instantánea hasta los 45 [°C] deseados. Si la temperatura del agua caliente a la salida del intercambiador es mayor a la estipulada hasta en un 30% no hay inconvenientes puesto que en el consumo siempre se mezcla con el agua fría, en caso contrario, si la temperatura es menor a la estipulada, una válvula termostática realizará una mezcla con el agua caliente que sale directamente del acumulador.

Cuando no hay consumo de ACS, la temperatura del termotanque aumenta. Luego una sonda envía una señal a las válvulas motorizadas cuando se llegue a la temperatura límite, estas válvulas interrumpirán el flujo de agua caliente que proviene de la caldera.

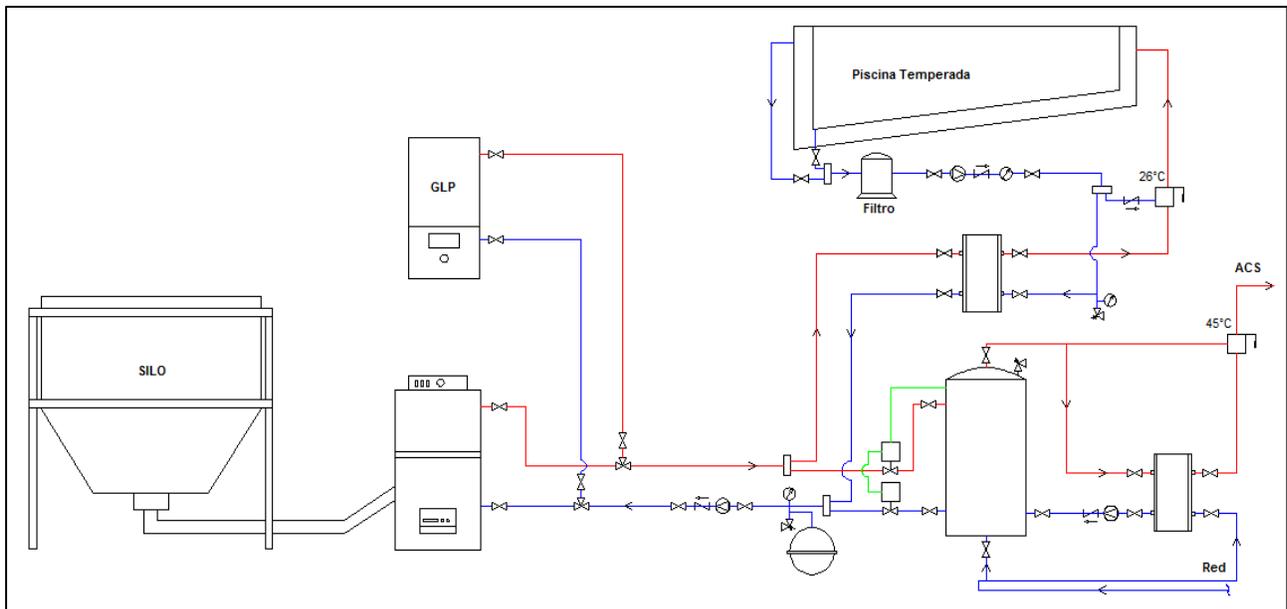


Figura 7.17: Sistema térmico utilizando caldera a pellets.

7.3.1 Generación térmica

- Caldera a pellets

De los capítulos previos se conoce la caldera a utilizar cuya capacidad suple el total de la energía demandada y el consumo de pellets se obtuvo en la sección 6.2, a continuación a modo de resumen se especifican las características ya evaluadas:

- Caldera: TUERO-100
- Potencia útil: 100 [kW]
- Rendimiento: 93%
- Temperatura máxima: 90 [°C]

- Almacenaje de combustible

Como el pellets posee menor poder calorífico necesita un mayor volumen para su almacenamiento que otros combustibles. Para el dimensionado se considerará el mes donde se requiera mayor cantidad de combustible y de esa manera podrá ser útil para los meses restantes.

Según la tabla 6.4, el mes de mayor consumo de pellets corresponde al mes de Agosto con una masa de 9.222,89 [kg / mes]. Este pellets será adquirido en las empresas nacionales, cuyas propiedades físicas se encuentran expuestas en la tabla 3.2, luego considerando una densidad de 640 [kg / m³] el volumen de almacenaje de pellets equivale a 14,4 [m³ / mes]. A modo de evitar una construcción anexa en el recinto, se eligen 2 silos textiles conectados en serie, con las siguientes características:

- Marca: superSILO
- Modelo: SP-250
- Capacidad: 5.700 [kg]; 8,8 [m³]
- Dimensiones: 2500 x 2500 [mm] (Largo x ancho), y altura regulable entre 2000 y 2500 [mm].

7.3.2 Subsistema de Acumulación e intercambiador de calor

- Estanque Pulmón

Como ya se ha mencionado, para satisfacer las demandas de ACS cuyo consumo es irregular, la caldera debe poseer un estanque pulmón que funcione como apoyo. Para este caso se utiliza un tanque pulmón. Se supondrá que este termotanque ya se encuentra disponible en el recinto (apoyando a la caldera de gas), pero en el caso de recambio, se recomienda que la capacidad sea de 1/3 de la cantidad de ACS requerida en el día, vale decir:

$$V_{pulmon} = 8.400/3 [l] \quad \Rightarrow \quad V_{pulmon} = 2.800 [l]$$

Luego, el equipo seleccionado es un tanque SICC modelo 116 PE CAL cuyas características se exponen a continuación:

- Capacidad: 3.000 [l]
- Disipación térmica: 0,361 [kW/h]
- Presión de trabajo: 8 [bar]
- Cantidad: 1

- Intercambiador de Placa

Para producir ACS de manera instantánea se requiere un intercambiador de placa anexo al tanque pulmón cuyo intercambio de calor se llevará a cabo sólo cuando sea necesario, es decir, cuando ocurre el consumo. Además la piscina también utiliza un intercambiador de placa ya que no requiere acumulación. Para el dimensionado, primero se debe conocer la eficacia térmica utilizando la ecuación (7.4) cuyo valor se considerará igual a 0,75. Así reemplazando en la ecuación (7.5) se tiene en el intercambiador de ACS y piscina:

$$Q_{IC_{ACS}} = \frac{Q_{max}}{\varepsilon \cdot horas_{mes}} + pérdidas_{acum} = \frac{10.660,2 [kWh / mes]}{0,75 \cdot 18 \cdot 31 [h / mes]} + 6,5 [kW] \quad \Rightarrow \quad Q_{IC_{ACS}} = 31,97 [kW]$$

$$Q_{IC_p} = \frac{Q_{max}}{\varepsilon \cdot horas_{mes}} = \frac{21.762 [kWh / mes]}{0,75 \cdot 15 \cdot 31 [h / mes]} \quad \Rightarrow \quad Q_{IC_p} = 62,4 [kW]$$

Luego se utilizan los mismos intercambiadores expuestos en la tabla 7.2 para producir ACS y en la piscina temperada, cuyas capacidades son respectivamente $50.000 [kCal / h]$ y $70.000 [kCal / h]$

7.3.3 Subsistema auxiliar

Como la caldera se encuentra dimensionada para que supla la totalidad de la demanda energética requerida, no es necesario tener un sistema auxiliar. De todas maneras el polideportivo ya cuenta con la caldera a gas y según la figura 7.17 esta irá conectada al circuito de generación térmica en caso de alguna emergencia significativa como por ejemplo no tener el total de suministro de pellets, falla y/o mantención de la caldera entre otros inconvenientes. La ventaja de la caldera a gas es la rapidez para generar calor debido a la facilidad de combustión. Mientras no ocurran inconvenientes la caldera se encontrará aislada mediante válvulas de corte.

7.3.4 Subsistema de circulación

Según la figura 7.17 se definirán las siguientes variables para los circuitos hidráulicos del sistema:

cald.total : Corresponde al fluido que circula entre la caldera hasta el grupo modular que separa los caudales que se dirigen al tanque de ACS como al intercambiador de la piscina.

Acum.ACS : Fluido que circula entre el grupo modular y el intercambiador productor de ACS.

Piscina : Fluido que circula entre el grupo modular y el intercambiador de la piscina.

CIR p : Fluido que circula entre el intercambiador y la piscina, ya sea la entrada y la salida de agua.

7.3.4.1 Caudal de los circuitos

Para determinar el caudal total, primero se considerará que el fluido de trabajo en todos los circuitos corresponde a agua caliente donde sus propiedades físicas son conocidas (sección 4.1). Parte de este fluido se dirige hacia el intercambiador de placa y la otra parte al tanque de ACS. Utilizando de manera análoga la ecuación (7.6) el balance de masas se puede escribir de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{Cald.Total} = \frac{Q_{IC_{Piscina}} \cdot h_{diaP}}{Cp_{agua} \cdot \Delta T} + \frac{Q_{IC_{ACS}} \cdot h_{diaACS}}{Cp_{agua} \cdot \Delta T} \quad (7.12)$$

Donde

$Q_{IC_{Piscina}}$: Flujo de calor intercambiado en el intercambiador de la piscina en [kW]

h_{diaP} : Horas de funcionamiento al día de la piscina [h/día]

ΔT : Diferencia de temperaturas a la entrada y salida del agua por el intercambiador, se considerará un valor de 10 [°C] tanto para el de placa como el serpentín.

$Q_{IC_{ACS}}$: Flujo de calor intercambiado en el intercambiador de ACS incluyendo las pérdidas térmicas del acumulador en [kW].

h_{diaACS} : Horas de funcionamiento al día de la producción de ACS [h/día]

Luego, los caudales corresponden a:

$$\dot{V}_{Cald.Total} = 8.114,3 (l/h) \quad ; \quad \dot{V}_{Piscina} = 5.365,4 (l/h) \quad ; \quad \dot{V}_{Acum.ACS} = 2.748,9 (l/h)$$

Para determinar el caudal de agua que circula por el circuito de la piscina (\dot{Q}_{CIR_p}) se utilizará la expresión (7.8) con un factor de 0,97, así:

$$\dot{V}_{CIR_p} = 5.204,4 (l/h)$$

7.3.4.2 Diámetros y pérdidas de carga

La circulación del agua a través de las cañerías genera pérdidas de carga del tipo regulares como singulares. Además se considerará, según catálogo, que las pérdidas de carga por cada lado del intercambiador de placa equivalen a 1.000 [mm.c.a.].

Luego de conocido los caudales, se utiliza la ecuación (7.9) para determinar los diámetros de las cañerías. Se considerarán los mismos criterios de diseño, como no sobrepasar los 40 [mm.c.a./m] de pérdidas unitarias, velocidad de flujo inferior a los 2 [m/s], como se trata de agua, el factor a equivale a 1 y se utilizarán cañerías de cobre.

Una vez determinado el diámetro, este se ajusta a un valor normalizado donde luego aplicando la ecuación (7.10) se puede calcular la velocidad del fluido por el interior de las cañerías, así los valores antes descritos se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 7.12: Diámetros normalizados y velocidad del fluido de trabajo. Fuente [Propia]

Circuito	Diámetro calculado	Diámetro nominal		Espesor	Velocidad
	mm	in	mm	mm	m/s
Cald. total	46,73	2	50,8	2,11	1,11
Acum. ACS	31,36	1,25	31,75	1,65	0,97
Piscina	40,12	2	50,8	2,11	0,74
CIR p	39,67	2	50,8	2,11	0,71

Se considerará que la caldera y todos sus componentes se encuentran en el interior del polideportivo. A modo de cuantificación la longitud de la cañería del flujo total equivale a 10 [m], la cañería de acumulación de ACS a 20 [m], la cañería que conecta la caldera con el intercambiador de la piscina 30 [m] y la cañería del circuito de la piscina posee una longitud de 25 [m].

Luego las pérdidas de carga regulares se obtienen multiplicando éstas longitudes con las pérdidas de carga unitarias calculadas a partir de la ecuación (7.9). Las pérdidas de carga singulares se considerarán que equivalen a un 100% de las pérdidas regulares, ya que no se conoce la distribución real del sistema hidráulico, los valores de ambas pérdidas se exponen en la tabla 7.13.

Luego las pérdidas de carga para el circuito de la caldera, equivale a la suma algebraica de las pérdidas desde la caldera hacia el acumulador y el intercambiador de la piscina, según la tabla 7.13 equivalen a 2.829,8 [mm.c.a] y sumadas las pérdidas debido al intercambiador se tiene un total de 3.829,1 [mm.c.a]. Las pérdidas de carga entre el acumulador de ACS y el intercambiador, considerando las pérdidas de éste equivalen a 2.509,18 [mm.c.a]. Para el circuito de consumo de la piscina, las pérdidas de carga según la tabla equivalen a 618,3 [mm.c.a] y sumada las pérdidas por el intercambiador, se tiene un total de 1.618,3[mm.c.a].

Tabla7.13: Pérdidas de carga regulares y singulares en diversos circuitos. Fuente [Propia]

circuito	Longitud m	Diametro mm	Caudal l/h	H_u mm.c.a./m	H_{REG} mm.c.a.	H_{SIN} mm.c.a.	H_{TOTAL} mm.c.a.
Cald. total	10	50,80	8.114,3	26,9	269,0	269,0	538,0
Acum. ACS	20	31,75	2.748,9	37,7	754,6	754,6	1.509,2
Piscina	30	50,80	5.365,4	13,0	391,3	391,3	782,6
CIR p	25	50,80	5.204,4	12,4	309,2	309,2	618,3
Total	85				1.724,1	1.724,1	3.448,1

7.3.4.3 Bombas de circulación

Los criterios de instalación para la bomba son los ya mencionados (sección 7.2.4.3). Estas se seleccionarán en base al caudal y las pérdidas de carga, calculadas anteriormente.

Tabla 7.14: Bombas de circulación a utilizar. Fuente [Propia]

Características	Cald. total	Intercambiador ACS	CIR p
Caudal (m ³ /h)	8,2	2,75	5,2
Pérdidas de carga (m)	3,83	2,51	1,62
Marca bomba	NOCCHI	NOCCHI	NOCCHI
modelo	R2C 40-60	R4C 40-30	R4C 40-30

Luego, se requieren 3 bombas, una para cada circuito.

7.3.4.4 Aislación Térmica

Al igual que en el sistema con energía termosolar, se deben aislar todas las cañerías y componentes necesarios para evitar pérdidas térmicas al ambiente. Para determinar el espesor de aislación se utilizarán los caños premoldeados de lana mineral y los mismos criterios de diseño mencionados en la sección 7.2.4.4 como la temperatura promedio interior de 20 [°C], conductividad térmica referencial de 0,04 [W/(mK)], velocidad de aire nula y espesores referenciales indicados en la tabla 7.9. Luego dichos valores se aplican en la ecuación (7.11) determinando así los espesores de aislación, expuestos en la tabla 7.15.

Cabe destacar que la totalidad de la instalación se ubicará en el interior del recinto, lo que implica una mejora en la vida útil del aislante y un menor espesor.

Tabla 7.15: Espesores de aislación para los diversos circuitos del sistema. Fuente [Propia]

circuito	Diámetro Ext. mm	Espesor mm
Cald. total	55,02	32
Acum. ACS	35,05	22
Piscina	55,02	32
CIR p	55,02	32

7.3.4.5 Válvulas y tanque de expansión

- Válvulas

A modo de cuantificación se determinarán bajo el mismo criterio que la sección 7.2.4.5. Luego:

Tabla 7.16: Válvulas para el sistema de biomasa. Fuente [Propia]

Valvulas	Cald. total	Acum. ACS	Piscina	CIR p	Total por valvula
Corte	6	9	2	6	23
Seguridad	1	1	0	1	3
Antirretorno	1	2	0	2	5
Termostática	0	1	0	1	2
Mot. 2 vías	0	2	0	0	2
Total por circuito	8	15	2	10	35

Cabe destacar que la cuantificación de las válvulas y los elementos de cada circuito generan cierta incertidumbre a la hora de conocer su valor real, ya que las válvulas y los diversos elementos ya se encuentran operando en el recinto. Se recomienda para este caso, realizar un chequeo en terreno del tipo y cantidad de equipos y válvulas que se encuentran disponibles y determinar aquellas que no se encuentren en condiciones óptimas y deban ser reemplazadas.

- Vaso de expansión

Según la figura 7.17 el vaso de expansión se utilizará sólo en el circuito principal de la caldera a pellets, ya que la sobrepresión en el circuito cerrado de la piscina se protegerá mediante una válvula de seguridad al igual que en el acumulador.

Para dimensionar el tanque de expansión se utilizará el mismo criterio anterior, vale decir, en base a la potencia instalada. De esta manera, se selecciona según catalogo ERCE el siguiente vaso:

- Marca/modelo: ERCE 80
- Capacidad: 50 [l]
- Presión máxima: 3 [bar]
- Cantidad: 1

Capítulo 8: Evaluación económica

Conocida la cobertura, configuración y equipos a utilizar de cada alternativa, se requiere evaluar la rentabilidad económica de cada sistema con el propósito de determinar y proponer la alternativa económicamente más atractiva.

8.1 Análisis del ciclo de vida: Norma ASTM E917

El “Análisis del ciclo de vida de instalaciones y sistemas” de la Norma ASTM E917 permite evaluar proyectos de eficiencia energética que no poseen ingresos por venta y consiste en traer al presente los valores de las diversas anualidades futuras, según figura 8.1, costos de operación, costo de energía y costos de reemplazo de algún accesorio u equipo, lo que sumado a la inversión inicial se obtiene el costo total del proyecto traído al presente.

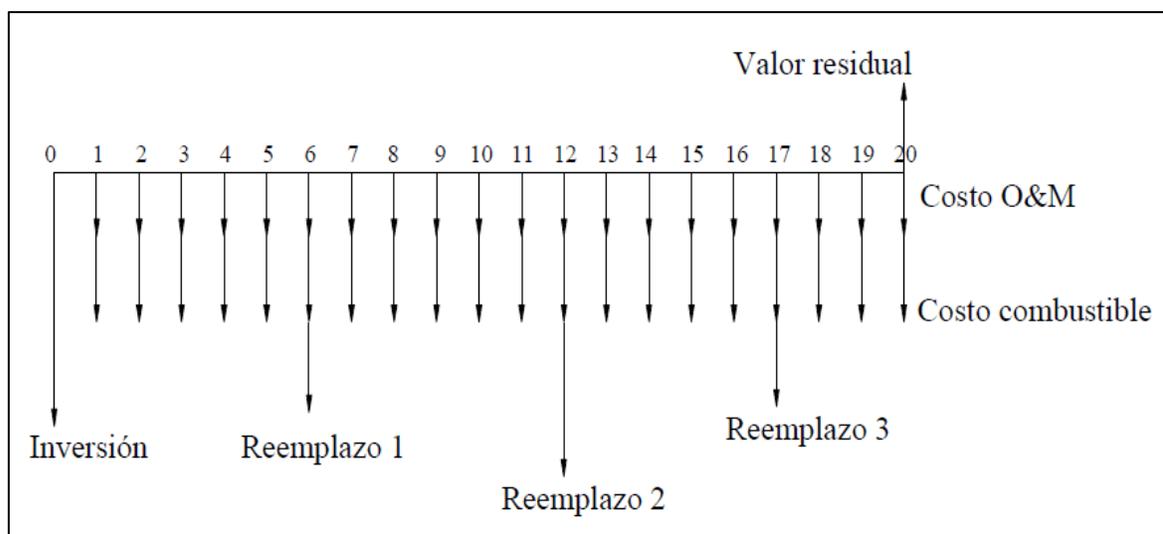


Figura 8.1: Flujos de dinero durante en el horizonte de evaluación.

A lo largo del horizonte de evaluación, la rentabilidad del proyecto viene dada por el ahorro de GLP para la alternativa 2 (termosolar) o el reemplazo del gas por otra fuente de energía más económica como la caldera a pellets (alternativa 3). Para la evaluación se considerarán las ecuaciones que se presentan a continuación:

- Anualidades del costo de la energía, que considera el escalamiento del combustible a lo largo del horizonte de evaluación, traída al presente en [US\$].

$$C_{energia} = C_{comb} \cdot \left(\frac{1+e}{i-e} \right) \left[1 - \left(\frac{1+e}{1+i} \right)^t \right] \quad (8.1)$$

Donde

C_{comb} : Costo anual del combustible (GLP o pellets) en [US\$]

e : Tasa de escalamiento del combustible en [%]

i : Corresponde a la tasa de descuento del proyecto en [%]

t : Horizonte de evaluación del proyecto en [años]

- Valor por anualidades de operación y mano de obra, traído al presente [US\$]

$$VPA = O \& M \left[\frac{(1+i)^t - 1}{i \cdot (1+i)^t} \right] \quad (8.2)$$

Donde

$O \& M$: Operación y mano de obra anual [US\$]

- Costo de reemplazo futuro de algún equipo u accesorio

$$C_{reemplazo} = Val_{reem} \cdot \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (8.3)$$

Donde

Val_{reem} : Costo del equipo u accesorio a reemplazar [US\$]

n : Año el cual se realizará el reemplazo.

- Valor residual traído al presente, es el único ingreso del proyecto al final del horizonte de evaluación y su valor dependerá del potencial del equipo en un mercado secundario.

$$VR = -V_r \cdot \left[\frac{1}{(1+i)^t} \right] \quad (8.4)$$

Donde

V_r : Valor residual de los activos al final del proyecto en [US\$]

Para llevar a cabo la evaluación económica de las diversas alternativas, se considerarán como criterios generales una tasa de descuento del 8%, un horizonte de evaluación de 20 años y una depreciación lineal de 25 años.

8.2 Evaluación económica de la alternativa 1

Este sistema no presenta inversión inicial, ello implica que la inversión de los equipos y/o accesorios para satisfacer las demandas energéticas ya fue realizada.

De la tabla 6.1 se obtiene el consumo anual de GLP que equivale a 42.902,1 [kg] ello implica un costo anual de 77.223,8 [US\$].

Para determinar la tasa de escalamiento del GLP, se utilizarán los datos aportados por la INE¹¹, que indica que el costo por kilogramo de GLP ha ido en un notorio aumento como se puede apreciar en el gráfico de la figura 8.2. En este se exponen los precios por kilo de GLP por un periodo de 15 años, desde 1994 hasta el 2008 (ambos incluidos). De él se determina que durante ese periodo de tiempo, el GLP tuvo un aumento promedio del 6,7%.

Se considerará que el costo de operación y/o mantención equivale a un 10% respecto al costo anual de combustible y para el reemplazo de un equipo u accesorio se considerará que tiene un valor del 20% con respecto al costo del gas, llevado a cabo el año 8. El valor residual será considerado como la venta de la caldera y accesorios a un valor de 2000 [US\$].

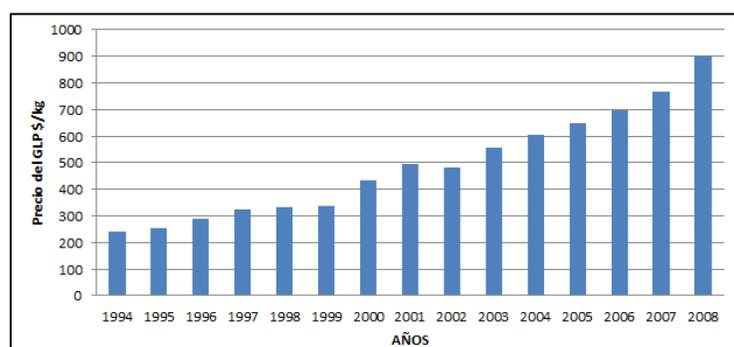


Figura 8.2: Precio del GLP durante un período de 15 años.

¹¹ Instituto Nacional de Estadística

En la siguiente tabla se presenta el costo total de esta alternativa a lo largo del horizonte de evaluación, traído al presente:

Tabla 8.1: Costo total del proyecto utilizando caldera a gas. Fuente [propia]

Valor Presente	Ecuación utilizada	US\$
Costo O&M	$VPA = 7.722,4 \cdot \left[\frac{(1+0,08)^{20} - 1}{0,08 \cdot (1+0,08)^{20}} \right]$	75.819,5
Costo de reemplazo 1	$C_{reemplazo} = 15.444,8 \cdot \left[\frac{1}{(1+0,08)^8} \right]$	8.344,3
Costo energía	$C_{energía} = 77.223,8 \cdot \left(\frac{1+0,067}{0,08-0,067} \right) \left[1 - \left(\frac{1+0,067}{1+0,08} \right)^{20} \right]$	1.363.379
valor residual	$VR = -2.000 \cdot \left[\frac{1}{(1+0,08)^{20}} \right]$	-429,1
inversión inicial		0
TOTAL		1.447.113

8.3 Evaluación económica de la alternativa 2

La inversión total de los equipos y accesorios, se detalla en el ANEXO III y tiene un valor de 444.243,5 [US\$]. De la tabla 6.3 se tiene un costo anual de combustible de 31.094,07 [US\$], ello implica un ahorro de 46.129,72 [US\$] al año.

Se considerará la tasa de escalamiento del 6,7% para el GLP y un costo de operación y mantención de 8000 [US\$] al año. La aislación ubicada en el exterior pierde sus propiedades físicas como térmicas debido al clima debiendo ser reemplazada el cabo de 10 años, los demás elementos y equipos no serán reemplazados. Al final del horizonte de evaluación se considerará que se recupera el 20% de la inversión con la venta de equipos u accesorios.

Luego utilizando las ecuaciones de la Norma ASTM E917, el análisis económico se expone a continuación:

Tabla 8.2: Costo total del sistema termosolar. Fuente [Propia]

Valor Presente	Ecuación utilizada	US\$
Costo energía	$C_{energía} = 31.094,1 \cdot \left(\frac{1+0,067}{0,08-0,067} \right) \left[1 - \left(\frac{1+0,067}{1+0,08} \right)^{20} \right]$	548.962,9
Costo O&M	$VPA = 8.000 \cdot \left[\frac{(1+0,08)^{20} - 1}{0,08 \cdot (1+0,08)^{20}} \right]$	78.545,2
Costo de reemplazo 1	$C_{reemplazo} = 4.060 \cdot \left[\frac{1}{(1+0,08)^{10}} \right]$	1.880,6
valor residual	$VR = -88.848,7 \cdot \left[\frac{1}{(1+0,08)^{20}} \right]$	-19.062,3
inversión inicial		444.243,5
TOTAL		1.054.570

8.4 Evaluación económica de la alternativa 3

La inversión total de los equipos y accesorios se detalla en el ANEXO III cuyo valor corresponde a 52.601,2 [US\$]. Según la tabla 6.4 el costo anual de pellets equivale a 35.850,6 [US\$], donde el ahorro con respecto a la caldera a gas equivale a 41.373,2 [US\$] al año.

Debido a la gran actividad forestal de la zona Centro-Sur del país, las variaciones en el precio que pueda sufrir el pellet a lo largo del tiempo están asociadas principalmente a los gastos externos de la materia prima, vale decir, un alza de precios en el transporte, electricidad o personal, así la tasa de escalamiento se considerará un 3%. Los costos anuales de operación y mantención se considerarán de 5.000 [US\$]. Según el fabricante el quemador de la caldera debe ser reemplazado en el año 15 cuyo valor corresponde a 8.076 [US\$], los demás elementos permanecerán hasta el final del proyecto. Al final del horizonte de evaluación se considerará que un 15% de la inversión es recuperada.

Luego el análisis económico utilizando la Norma ASTM E917 se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 8.3: Costo total del sistema de biomasa. Fuente [Propia]

Valor Presente	Ecuación utilizada	US\$
Costo energía	$C_{energía} = 35.850,6 \cdot \left(\frac{1+0,03}{0,08-0,03} \right) \left[1 - \left(\frac{1+0,03}{1+0,08} \right)^{20} \right]$	452.346,6
Costo O&M	$VPA = 5.000 \cdot \left[\frac{(1+0,08)^{20} - 1}{0,08 \cdot (1+0,08)^{20}} \right]$	49.090,7
Costo de reemplazo	$C_{reemplazo} = 8.076 \cdot \left[\frac{1}{(1+0,08)^{15}} \right]$	2.545,9
valor residual	$VR = -7.890,2 \cdot \left[\frac{1}{(1+0,08)^{20}} \right]$	-1.692,8
inversión inicial		52.601,2
TOTAL		554.892

Capítulo 9: Discusión y Conclusiones

Durante el desarrollo del presente informe lo primero que se puede observar es que la teoría solar utilizada sirve como una metodología de cálculo para obtener los ángulos solares y con ello el recurso solar disponible en cualquier ubicación geográfica. Estos datos se pueden encontrar en la literatura o en diversos software pero están pensados en su mayoría para tecnologías estáticas como los colectores planos. En este caso al tratarse de una tecnología concentradora con seguimiento solar y que además sólo utiliza radiación directa, los datos existentes no son los adecuados, siendo primordial su evaluación.

Chile al poseer una gran actividad forestal principalmente en la zona Centro-Sur, se produce gran cantidad residuos en forma de biomasa vegetal, ésta es considerada como energía renovable pero presenta desventajas a la hora de utilizarla directamente como combustible, ya sea, por el tamaño irregular como también por su alto contenido de humedad, disminuyendo la capacidad y la vida útil de las calderas. Por lo anterior se utiliza como alternativa el pellets de madera, producido a nivel nacional donde se utiliza menos del 6% de la materia prima disponible. La ubicación del proyecto con respecto a las empresas de pellets presenta ventajas a la hora de abastecimiento, ya que disminuyen los costos por transporte y logística.

Con respecto a los requerimientos energéticos, se utilizó como referencia abastecer un complejo deportivo, aunque la metodología de cálculo es válida para cualquier otra instalación. Cabe destacar que la demanda energética de ACS depende en cierta medida de las condiciones ambientales y es por ello que en invierno, esta tiende a ser mayor. En el caso de la piscina temperada se aprecia que ésta posee pérdidas por evaporación constantes durante el año ya que posee condiciones ambientales propias, luego, su valor varía según los días de cada mes. Cabe destacar que durante las horas de inactividad de la piscina, la diferencia de temperatura no supera los 4 [°C], debido a la gran masa de agua que posee y según la capacidad instalada, no se presentan mayores inconvenientes para suplir la energía térmica disipada, ya que se trata de sistemas de baja temperatura y por lo tanto tienen mayor eficiencia.

En el capítulo 5 se analizan las principales tecnologías a utilizar. En el caso de la energía termosolar, los concentradores parabólicos poseen mayor desarrollo en la generación eléctrica y es por ello que no existe un mercado desarrollado para equipos que generen calor. El concentrador seleccionado posee un rendimiento óptico que no supera el 55% debido a los múltiples factores que interfieren

entre la radiación incidente y la energía recibida por el tubo receptor, a pesar de ello, presenta bajas pérdidas térmicas, lo que genera un rendimiento prácticamente constante durante el año. En el caso de la energía con biomasa, existe en el mercado una mayor variedad de equipos, en donde la caldera a pellets seleccionada es capaz de abastecer el total de los requerimientos energéticos demandados, incluyendo las pérdidas que se presentan en la instalación.

El recinto se consideró que ya se encuentra en operación y satisface las necesidades energéticas con una caldera a GLP cuyos costos operacionales equivalen a 77.223,8 [US\$].

El método de las curvas F-Chart es una buena herramienta a la hora de determinar la cobertura solar a lo largo del año pero no sensibiliza los costos de inversión que conlleva la instalación, en otras palabras, con este método técnicamente sería posible suplir el 100% de la energía demandada durante el año, pero económicamente no se justificaría la gran inversión de concentradores solares debido a su alto precio y además la energía sobreproducida en verano no sería aprovechada. Es por ello que en las evaluaciones se trata de cubrir al máximo la energía demandada en verano, para luego en invierno suplir la energía faltante con la caldera a gas. En este proyecto, la cobertura solar promedio en el año equivale a un 60,3%, luego en verano, el aporte de la caldera a GLP es alrededor del 1,2% y en invierno un 80,3%. Luego de determinar que 60 concentradores es el número óptimo de equipos desde el punto de vista económico, se presenta un ahorro de GLP de 46.129,7 [US\$]. Para distribuir la energía térmica generada en los concentradores solares y además para conocer el costo total de la inversión, se cuantifican y seleccionan los diversos equipos y/o accesorios a utilizar, aplicando ingeniería básica y criterios de diseño comúnmente encontrados en catálogos de instalaciones térmicas.

Como la caldera a pellets se dimensionó para una cobertura total, el recinto debe poseer el espacio suficiente para agregar 2 Silos de almacenaje, cuyo mes de mayor consumo es en Agosto. En términos de costos operacionales el pellets consume 35.850,6 [US\$], lo que genera un ahorro anual de 41.373,2 [US\$] con respecto a la caldera a GLP. Cabe destacar que el diseño para la cuantificación de equipos y/o accesorios a instalar genera cierta incertidumbre, ya que el recinto se encuentra operando, por lo tanto, se recomienda realizar un chequeo de los equipos disponibles en el polideportivo y evaluar los faltantes.

De la evaluación económica llevada a cabo en el capítulo 8, se observa que ambas alternativas presentan un ahorro de dinero al finalizar el proyecto al cabo de 20 años. La alternativa de la

instalación termosolar, presenta un ahorro de 392.543,5 [US\$] mientras que la alternativa de la instalación de un sistema con caldera a pellets posee un ahorro de 892.221,7 [US\$]. Se observa que la segunda alternativa es más atractiva debido a diversos factores, ya sea, un número menor de equipos y accesorios a adquirir, bajo escalamiento y costo del pellets, la posibilidad de utilizar parte de la instalación, entre otras, pero la diferencia más gravitante entre el ahorro de una alternativa y otra, corresponde al alto costo de adquisición de los concentradores parabólicos (hasta 9 veces más caro que un colector plano) representando un 84,3% del costo total de los equipos necesarios para el sistema termosolar.

Es de esperar que a medida que se desarrolle el mercado de la concentración solar, el costo de los equipos disminuya y con ello su uso en aplicaciones térmicas sea más atractivo. Por el momento, la energía proveniente de la biomasa presenta ventajas en los costes de adquisición de los equipos y materia prima debido a la gran actividad de la industria forestal Chilena.

El avance, desarrollo e implementación de este tipo de energías ha ido y va en aumento en nuestro país, ello va a dar la posibilidad de incentivar su uso a nivel residencial e industrial, en desmedro de los combustibles fósiles, pues presentan la gran ventaja de ser una alternativa sustentable tanto en lo económico, medio ambiental y social.

Bibliografía

- [1] Duffie, J. and Beckman W.A. Solar Engineering of thermal processes. 3a ed. University of Wisconsin – Madison, 2006.
- [2] Sarmiento M., Pedro. Energía solar, aplicaciones e ingeniería. 3 ed. Valparaíso Chile, Ediciones Universitarias de la Universidad Católica de Valparaíso.
- [3] Sánchez A., Reinaldo. Apuntes de asignaturas. “Proyecto de equipos e instalaciones térmicas y de fluidos” y “Proyecto de Ingeniería”, 2012.
- [4] Programa RETScreen versión 4.1, 2012.
- [5] Artículo: Thermia B DIS/2043/98-AT. Industrial Network, Wood Pellets, Enero del 2000.
- [6] Empresa Andes bio-pellets. En línea: <http://www.andesbiopellets.cl/main.html>.
- [7] Balance Nacional de Energía. CNE, 2009. Gob. de Chile. En línea: <http://www.cne.cl>.
- [8] Estudio de disponibilidad de residuos madereros para usos energéticos. CNE, 2007.
- [9] Norma UNE 94002-2005, Criterios para el cálculo de la demanda de energía térmica.
- [10] Manual de diseño para el calentamiento de agua. Corporación de Desarrollo Tecnológico Cámara Chilena de la Construcción. Octubre, 2007.
- [11] Concentrador Solar ABSOLICON. En línea: www.absolicon.es.
- [12] Irradiancia total en los territorios de la república de Chile. Registro Solarimétrico. CNE, PNUD, UTFSM, 2008.
- [13] Empresa RECAL. En línea: www.recal.cl.
- [14] Reglamento de instalaciones térmicas en Chile. RITCH, 2007.
- [15] Guía de diseño e instalación para grandes sistemas de agua caliente sanitaria. Sistemas solares térmicos II. Ministerio de energía de Chile, 2010.

ANEXOS

ANEXO I: Ajuste diario único del concentrador durante los días del año.

Estos ángulos fueron calculados a partir de la altitud solar de la ecuación (2.7) que depende de la Latitud, la declinación y el ángulo horario solar, medidos en grados sexagesimales.

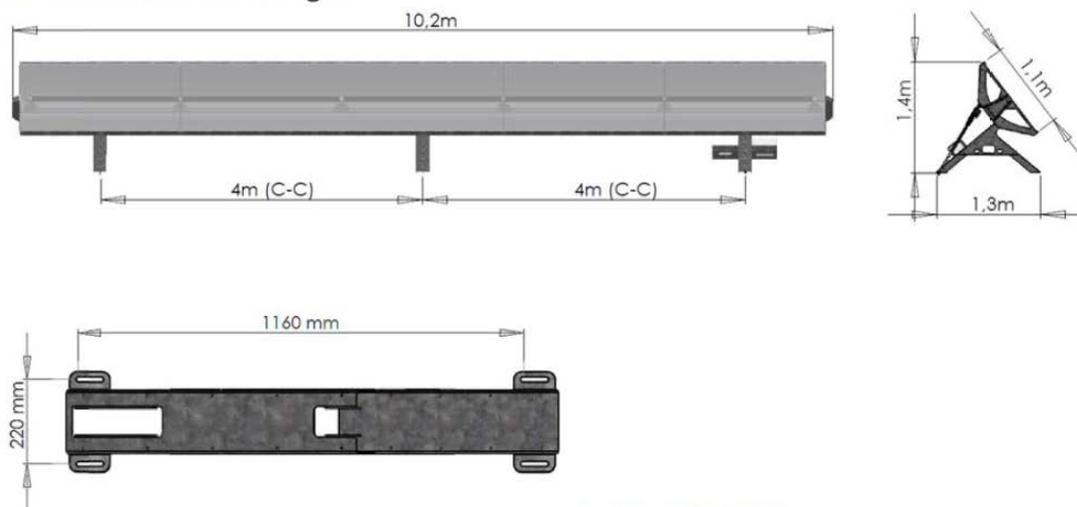
Tabla A.1: Ajuste diario del concentrador durante el año. Fuente [Propia]

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEPT	OCT	NOV	DIC
1	13,0	18,5	27,7	40,0	50,9	58,0	59,1	53,9	43,7	31,8	20,6	13,9
2	13,1	18,8	28,1	40,4	51,2	58,2	59,0	53,7	43,3	31,4	20,3	13,8
3	13,2	19,0	28,5	40,8	51,5	58,3	59,0	53,4	43,0	31,0	20,0	13,6
4	13,3	19,3	28,8	41,2	51,8	58,4	58,9	53,1	42,6	30,6	19,7	13,5
5	13,4	19,6	29,2	41,6	52,1	58,5	58,8	52,8	42,2	30,2	19,5	13,4
6	13,5	19,9	29,6	42,0	52,4	58,6	58,7	52,5	41,8	29,8	19,2	13,3
7	13,6	20,2	30,0	42,4	52,7	58,7	58,6	52,3	41,4	29,4	18,9	13,2
8	13,7	20,5	30,4	42,8	53,0	58,8	58,5	52,0	41,0	29,0	18,6	13,1
9	13,8	20,8	30,8	43,2	53,2	58,9	58,4	51,7	40,6	28,7	18,3	13,0
10	14,0	21,1	31,2	43,5	53,5	59,0	58,2	51,4	40,2	28,3	18,1	13,0
11	14,1	21,4	31,6	43,9	53,8	59,1	58,1	51,1	39,8	27,9	17,8	12,9
12	14,2	21,7	32,0	44,3	54,0	59,2	58,0	50,7	39,4	27,5	17,6	12,8
13	14,4	22,1	32,4	44,7	54,3	59,2	57,8	50,4	39,0	27,1	17,3	12,8
14	14,6	22,4	32,8	45,0	54,5	59,3	57,7	50,1	38,6	26,8	17,1	12,7
15	14,7	22,7	33,2	45,4	54,8	59,3	57,5	49,8	38,2	26,4	16,9	12,7
16	14,9	23,0	33,6	45,8	55,0	59,4	57,4	49,5	37,8	26,0	16,6	12,6
17	15,1	23,4	34,0	46,1	55,3	59,4	57,2	49,1	37,4	25,7	16,4	12,6
18	15,3	23,7	34,4	46,5	55,5	59,4	57,0	48,8	37,0	25,3	16,2	12,6
19	15,5	24,1	34,8	46,9	55,7	59,4	56,8	48,4	36,6	25,0	16,0	12,6
20	15,7	24,4	35,2	47,2	55,9	59,4	56,6	48,1	36,2	24,6	15,8	12,6
21	15,9	24,8	35,6	47,6	56,1	59,4	56,4	47,8	35,8	24,2	15,6	12,6
22	16,1	25,1	36,0	47,9	56,3	59,4	56,2	47,4	35,4	23,9	15,4	12,6
23	16,3	25,5	36,4	48,3	56,5	59,4	56,0	47,0	35,0	23,6	15,2	12,6
24	16,5	25,9	36,8	48,6	56,7	59,4	55,8	46,7	34,6	23,2	15,0	12,6
25	16,7	26,2	37,2	49,0	56,9	59,4	55,6	46,3	34,2	22,9	14,8	12,6
26	17,0	26,6	37,6	49,3	57,1	59,4	55,4	46,0	33,8	22,5	14,6	12,6
27	17,2	27,0	38,0	49,6	57,3	59,3	55,1	45,6	33,4	22,2	14,5	12,7
28	17,5	27,3	38,4	49,9	57,4	59,3	54,9	45,2	33,0	21,9	14,3	12,7
29	17,7		38,8	50,3	57,6	59,2	54,7	44,9	32,6	21,6	14,2	12,8
30	18,0		39,2	50,6	57,8	59,2	54,4	44,5	32,2	21,3	14,0	12,8
31	18,2		39,6		57,9		54,2	44,1		20,9		12,9

ANEXO II: Características técnicas de los principales equipos evaluados.

A.2.1 Características del concentrador solar ABSOLICON modelo x10 T.

Measurements and weight



Leg design (top view)

Collector

Gross area: 9965 mm x 1095 mm = 10.91 m ²
Aperture: 10.37 m ²
Collector height: 350 mm
Collector weight: 315 kg
Sealing material: Silicone
Casing material: Galvanized lacquered steel
Glass: 4 mm tempered low iron glass

Receiver

Material: Aluminum/Selective coating
Temperature compensation: Rail mounted
Liquid volume: 5 liter
Recommended flow: 10 liter/min

Tracking system

Number of legs and actuators	3 pcs
Actuator type	12 VDC
Tracking	Astronomic
Power usage	0,2 W/m ²
Tracking operation	8760 h

Complete system

Number of legs	3 pcs
Total weight installed	350 kg
Max mechanical load	1000 Pa

Solar Thermal Performance

Zero-loss coefficient η_0	0,548
Heat-loss coefficient a1	0,849
Second degree heat-loss coefficient a2	0,003
b_0 (trans)	0,245
<i>Zero-loss coefficient calculated with:</i>	
Absorber efficiency factor $F'(\tau\alpha)_{en}$	0,617
Incident angel modifier, diffuse radiation K_{0d}	0,294

A.2.2 Características técnicas de la caldera TUERO-100.



TUERO – BIOMASA



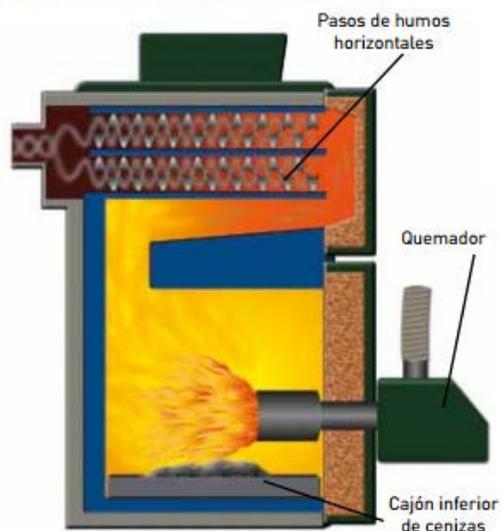
	TUERO 20	TUERO 30	TUERO48	TUERO 100
Potencia útil-kw	20	31	50	100
Potencia min-kw	10	18	25	50
Rendimiento	93%	93%	93%	93%
Presión máx.	3bar	3bar	3bar	3 bar
Temperatura máx.	90°	90°	90°	90°
Ø salida de humos	Ø125	Ø125	Ø150	Ø200
Peso -kg	290kg	290kg	360kg	420kg
Medidas: Alto, ancho, profundidad	1340/505/905 mm	1340/505/905 mm	1340/505/1085 mm	1340/620/1085 mm

TUERO – caldera BIOMASA

- Fabricadas según norma UNE 12809*
- Cuerpo de acero de alta calidad con espesor de 6mm*
- Rendimiento del 93%*
- Bandeja interior de recogida de cenizas*
- Quemador modulante*
- Encendido automático*
- Alimentación automática*
- Sistema doble sinfin*
- Batería de alimentación en el quemador*
- Cuadro de mandos analógico*
- Possibilidad de controlar bomba de recirculación, bomba de calefacción y termostato ambiente.*

PRECIO incluye: caldera; quemador; sinfin de alimentación y tolva de 400lt.

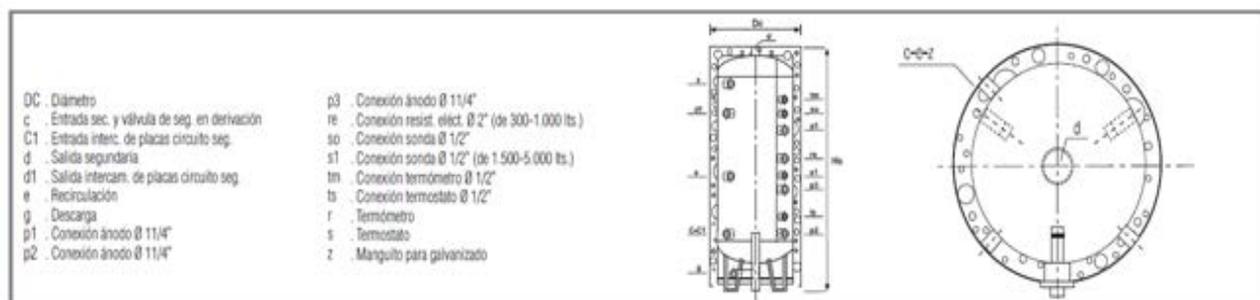
EQUIPAMIENTO Y SUMINISTRO



A.2.3 Características técnicas del acumulador SICC 116 PE CAL

Características Funcionales

- Los acumuladores SICC de la serie 116 son elementos de acero con ubicación vertical a los cuales está asociado un intercambiador de calor externo (generalmente de placas).
- Su utilización resulta especialmente indicada para la producción y acumulación de agua caliente sanitaria producida por diversos métodos de calefacción (caldera, telecalefacción, paneles solares). Encuentran una especial aplicación en las instalaciones en las que se debe hacer frente, además de las variables necesidades de consumos en el tiempo, también a las necesidades de los consumos de punta.
- Su avanzado concepto tecnológico, permite una combinación extremadamente flexible con el intercambiador de placas, permitiendo optimizar las prestaciones térmicas.
- Incluye Test ánodo.



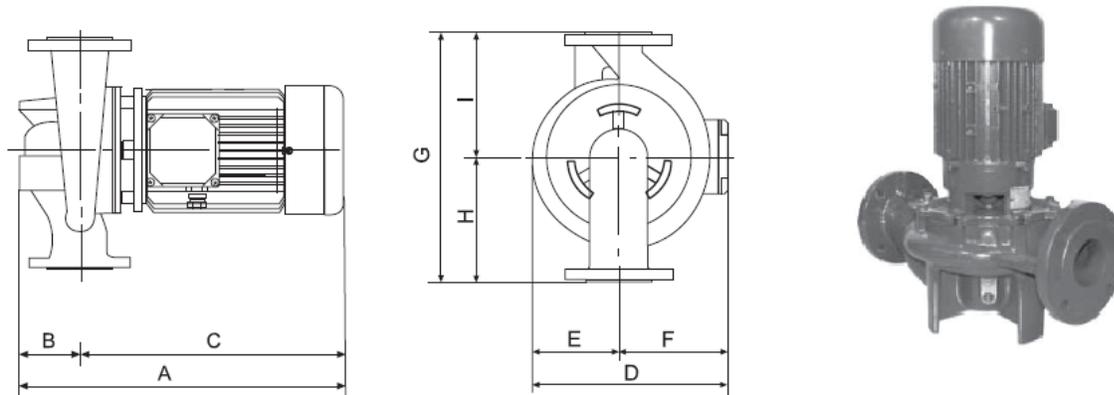
Características Técnicas

BOILER SICC 116 PE		1000	1500	2000	3000	4000	5000
Capacidad	lts.	1.000	1.500	2.000	3.000	4.000	5.000
Peso	kg	140	225	270	334	525	620
Presión máx. de ejercicio	bar	8/12	8/12	8/12	8/12	8/12	8/12
T° min./máx. de ejercicio	°C	99	99	99	99	99	99
Dispersiones Térmicas	kWh	0,171	0,235	0,283	0,361	0,417	0,496
CÓDIGO RECAL (8 bar)	-	BLC0000690	BLC0000790	BLC0000890	BLC0000892	BLC0000893	BLC0000894

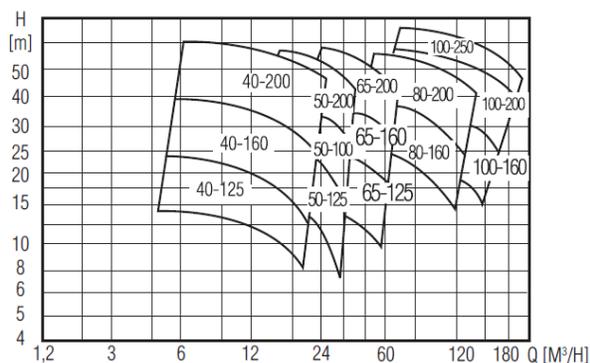
A.2.4 Bombas de Circulación

A.2.4.1: Modelo A4L 80-200

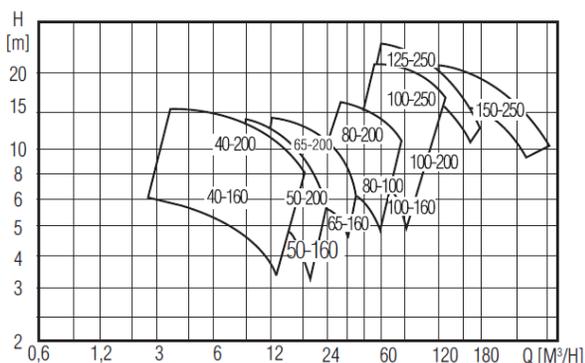
NOCCHI Bombas Recirculadoras
A2L - A4L



Curva Bombas NOCCHI A2L



Curva Bombas NOCCHI A4L

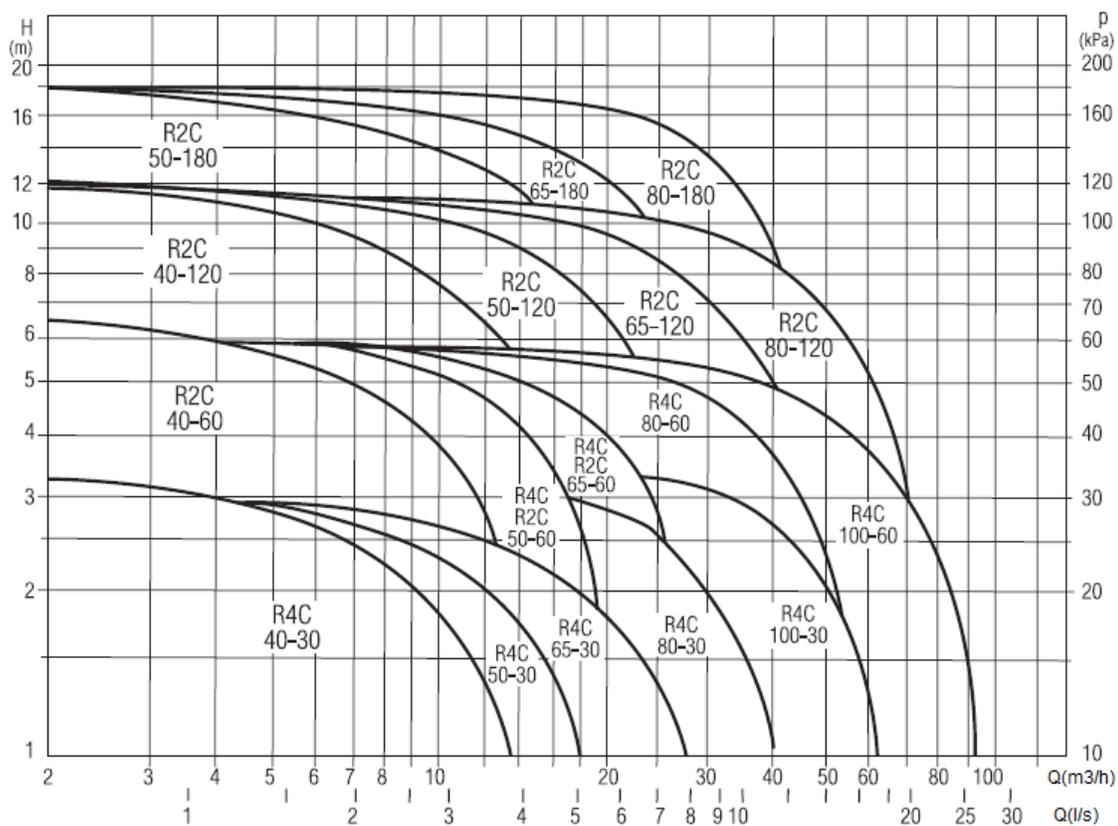


BOMBA NOCCHI	A2L/40									A4L/40		
Dimensiones	40-125C	40-125B	40-125A	40-160C	40-160B	40-160A	40-200C	40-200B	40-200A	40-160X	40-200X	40-200Y
A	425	445	445	445	485	485	525	535	535	425	445	445
B	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
C	325	345	345	345	385	385	425	435	435	325	345	345
D	200	211	211	226	257	257	286	286	286	215	245	245
E	93	93	93	108	108	108	127	127	127	103	127	127
F	107	118	118	118	149	149	159	159	159	107	118	118
G	300	300	300	320	320	320	380	380	380	320	380	380
H	160	160	160	170	170	170	200	200	200	170	200	200
I	140	140	140	150	150	150	180	180	180	150	180	180
Peso	24	25	26	30	35	37	50	55	56	23	31	30
CÓDIGO RECAL	BBN8020000	BBN8020010	BBN8020020	BBN8020030	BBN8020040	BBN8020050	BBN8020060	BBN8020070	BBN8020080	BBN8020380	BBN8020400	BBN8020390

BOMBANOCCH	A2L,50								A4L,50		
	50-125C	50-125B	50-125A	50-160B	50-160A	50-200C	50-200B	50-200A	50-160X	50-200X	50-200Y
Dimensiones											
A	455	455	495	495	535	545	545	650	435	495	495
B	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
C	345	345	385	385	425	435	435	540	325	385	385
D	221	221	252	262	272	290	290	315	220	280	280
E	103	103	103	113	113	131	131	131	113	131	131
F	118	118	149	149	159	159	159	184	107	149	149
G	320	320	320	340	340	400	400	400	340	400	400
H	180	180	180	180	180	220	220	220	180	220	220
I	140	140	140	160	160	180	180	180	160	180	180
Peso	27	28	32	32	42	56	57	64	25	36	36
CÓDIGO RECAL	BBN802090	BBN8020100	BBN8020110	BBN8020120	BBN8020130	BBN8020140	BBN8020150	BBN8020160	BBN8020410	BBN8020430	BBB8501018

BOMBA NOCCH	A2L,60						A4L,60			
	80-160C	80-160B	80-160A	80-200D	80-200C	80-200B	80-160X	80-160Y	80-200X	80-200Y
Dimensiones										
A	700	700	700	700	860	860	545	545	585	585
B	160	160	160	160	160	160	140	140	140	140
C	540	540	540	540	700	700	325	325	345	345
D	315	315	315	330	375	375	280	280	305	305
E	131	131	131	146	146	146	131	131	146	146
F	184	184	184	184	229	229	149	149	159	159
G	440	440	440	500	500	500	440	440	500	500
H	240	240	240	275	275	275	240	240	275	275
I	200	200	200	225	225	225	200	200	225	225
Peso	72	79	85	91	124	142	40	40	57	51
CÓDIGO RECAL	BBN8020240	BBN8020250	BBN8020260	BBN8020270	BBN8020280	BBN8020290	BBN8020490	BBN8020480	BBN8020510	BBN8020500

BOMBANOCCH	A2L,100								A4L,100					
	100-160D	100-160C	100-160B	100-200D	100-200C	100-200B	100-200A	100-230D	100-160X	100-160Y	100-200X	100-200Y	100-250X	100-250Y
Dimensiones														
A	730	730	730	890	890	995	995	995	615	575	625	615	730	730
B	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190
C	540	540	540	710	710	805	805	805	425	385	435	425	540	540
D	320	320	320	386	386	413	413	433	295	285	315	315	360	360
E	136	136	136	156	156	166	166	176	136	136	156	156	176	176
F	184	184	184	230	230	257	257	257	159	149	159	159	184	184
G	525	525	525	550	550	550	550	600	525	525	550	550	600	600
H	300	300	300	300	300	300	300	320	300	300	300	300	320	320
I	225	225	225	250	250	280	280	280	225	225	250	250	280	280
Peso	76	84	91	135	153	196	213	220	50	45	73	66	106	96
CÓDIGO RECAL	BBN8020300	BBN8020320	BBN8020336	BBN8020330	BBN8020340	BBN8020350	BBN8020360	BBN8020370	BBN8020330	BBN8020320	BBN8020350	BBN8020340	BBN8020370	BBN8020360



BOMBA NOCCHI R4C	R4C 40-30	R4C 50-30	R4C 50-60	R4C 65-30	R4C 65-60	R4C 80-30	R4C 80-60	R4C 100-30	R4C 100-60
PN bar	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Dimen. Generales	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D1	42	50	50	65	65	80	80	100	100
D2	80	90	90	110	110	128	128	148	148
D3	100	110	110	130	130	150	150	170	170
D4	130	140	140	160	160	190	190	210	210
D5	14	14	14	14	14	18	18	18	18
H1	67	75	75	82	82	97	97	107	107
H2	218	220	255	230	235	266	286	305	325
H3	285	295	330	312	347	363	383	412	432
L1	250	280	280	340	340	360	360	450	450
B1	75	75	101	75	75	101	101	101	101
B2	95	95	115	95	95	115	115	115	115
B3	75	75	101	75	75	101	101	101	101
B4	90	102	102	124	124	130	130	167	167
B5	96	96	96	96	96	96	96	144	144

ANEXO III: Detalle de los costos de inversión para ambos sistemas.

Tabla A.3.1 Detalle de los costos de inversión para el sistema termosolar.

Equipo u elemento	modelo/tipo	Precio unit. US\$	Cantidad	Valor US\$
Concentrador Solar	x10 T	5.000,0	60	300.000,0
tk acumulador	SICC 5000 l	10.999,0	2	21.998,0
Intercambiador de placa	UNEX 50.000 kCal/h	534,0	1	534,0
Intercambiador de placa	UNEX 70.000 kCal/h	619,0	3	1.857,0
cañería de cobre tipo K	350 m- 4 in	27,2 US\$/m	350 m	9.520,0
cañería de cobre tipo K	45 m- 2,5 in	11,79 US\$/m	45 m	530,0
cañería de cobre tipo K	75 m- 3 in	16,1 US\$/m	75 m	1.207,5
Bomba de circulación	NOCCHI A4L 80-200	1.774,0	2	3.548,0
Bomba de circulación	NOCCHI R4C 50-60	1.001,0	2	2.002,0
Bomba de circulación	NOCCHI R4C 80-60	1.370,5	2	2.741,0
Aislación, d=108,4 mm	esp=53 mm	11,6 US\$/m	350 m	4.060,0
Aislación, d=81,74 mm	esp=42 mm	6,68 US\$/m	75 m	501,0
Aislación, d= 68,32 mm	esp=32	5,52 US\$/m	45 m	248,4
Válvula de corte	d=4-3-2,5 in	118-83,65-55,66	16-10-17.	3.670,7
Válvula seguridad	d=4-3-2,5 in	45,0	10	450,0
Válvula Antirretorno	d=4-3-2,5 in	68-50-30	2-3-3.	376,0
Válvula purgadora	d=4-3-2,5 in	32,0	6	192,0
Válv. Motorizada 2vias	d=4-3-2,5 in	162,0	2	324,0
Válv. Motorizada 3vias	d=4-3-2,5 in	196,0	3	588,0
Válv. Termostatica	d=3-2,5 in	648-355	1-1.	1.003,0
Tk expansión	100 l	227,0	2	454,0
Subtotal neto de productos				355.804,6
Descripción		Unidad	Cantidad	US\$
Costo de instalación y mano de obra		%	25	13.951,2
Utilidades y gastos generales		%	1	3.558,0
Subtotal neto del proyecto				373.313,8
IVA		%	19	70.929,6
TOTAL				444.243,5

Tabla A.3.2: Detalle de los costos de inversión para el sistema de biomasa.

Equipo u elemento	modelo	Precio unit. US\$	Cantidad	Valor US\$
Caldera a pellets automática	Tuero 100	14.911,0	1	14.911,0
Almacén de combustible	superSILO	2.599,0	2	5.198,0
Kit instalación (escape gases)	300 KIT	390	1	390,0
tk acumulador	SICC 3000 l	6099	1	6.099,0
Intercambiador de placa	UNEX 50.000 kCal/h	534,0	1	534,0
Intercambiador de placa	UNEX 70.000 kCal/h	619	1	619
cañería de cobre tipo K	65 m- 2 in	8,03 US\$/m	65 m	522,0
cañería de cobre tipo K	10m- 1,25 in	4,04 US\$/m	10 m	40,4
Bomba de circulación	NOCCHI R4C 40-30	1.370,5	2	2.741,0
Bomba de circulación	NOCCHI R2C 40-60	1.003,5	1	1.003,5
Aislación, d=55,02 mm	esp=32 mm	4,66 US\$/m	65 m	302,9
Aislación, d=35,05 mm	esp=22 mm	2,12 US\$/m	10 m	21,2
Válvula de corte	d=2-1,25 in	26-13	14-9.	481,0
Válvula seguridad	d=2-1,25 in	80,0	2-1.	240,0
Válvula Antirretorno	d=2-1,25 in	29-26	3-2.	139,0
Válv. Termostática	d=2-1,25 in	310-100	1-1.	410,0
Válv. Motorizada 2vías	d=1,25	116	2	232
Tk expansión	50 l	118	1	118,0
Subtotal neto de productos				34.002,0
Descripción		Unidad	Cantidad	US\$
Costo de instalación y mano de obra		%	20	6.800,4
Utilidades y gastos generales		%	10	3.400,2
Subtotal neto del proyecto				44.202,7
IVA		%	19	8.398,5
TOTAL				52.601,2