

**DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO
SOLAR PARA CLIMATIZAR EL AGUA DE LA PISCINA DE LA
UNIVERSIDAD EAFIT**

GUILLERMO ADOLFO DURANGO BENITEZ
RICARDO VALENCIA NARANJO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS
ESCUELA DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD EAFIT
MEDELLÍN
2007

**DISEÑO CONCEPTUAL Y BÁSICO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO
SOLAR PARA CLIMATIZAR EL AGUA DE LA PISCINA DE LA
UNIVERSIDAD EAFIT**

GUILLERMO ADOLFO DURANGO BENITEZ
RICARDO VALENCIA NARANJO

Proyecto de grado para optar el título de
Ingeniero de Procesos

ASESOR
JAIME ESCOBAR
Ingeniero Químico

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS
ESCUELA DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD EAFIT
MEDELLÍN
2007

A nuestras familias
Por su apoyo incondicional durante
Todo nuestro proceso de formación

A Dios por orientarnos
En los momentos difíciles

A nuestros amigos, docentes y compañeros
Por su acompañamiento y amistad

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas las personas e instituciones que colaboraron con la realización de este proyecto, especialmente al Ingeniero Jesús Isma gerente de Energía Solar S.A, al Ingeniero Jaime Alberto Escobar, al profesor Edison Gill Pavas MSc en ingeniería química y al Ingeniero Jesús Alberto Pérez Mesa, por la asesoría brindada en la realización de este diseño.

A Carlos Arturo Correa Maya, profesor de ingeniería de procesos, por su motivación y ayuda durante estos años de estudio, y especialmente en aquellos primeros en los que su orientación brindó fortalezas a nuestra formación.

Al personal de laboratorio de Ingeniería de Procesos de la Universidad EAFIT por su asistencia y acompañamiento.

A nuestras familias y amigos, por su cariño, apoyo y tolerancia durante todo este proceso de formación.

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	13
2	INTRODUCCIÓN	14
3	OBJETIVOS	15
4	ALCANCE	16
5	MARCO TEÓRICO	17
5.1	TECNOLOGÍAS PARA CONVERSIÓN SOLAR FOTOTÉRMICA	17
5.2	COLECTORES SOLARES.....	17
5.3	CONSIDERACIONES EN EL CALENTAMIENTO DE PISCINAS	19
5.4	TEMPERATURA DEL AGUA DE LAS PISCINAS.....	20
5.5	COLECTOR SOLAR PLANO.....	20
5.5.1	Pérdidas de calor del colector	22
5.5.2	Distribución de temperaturas y factor de eficiencia del colector	22
5.5.3	Temperatura media de la placa	28
6	PROJECT DESIGN SPECIFICATION	29
6.1	UBICACIÓN.....	29
6.2	LEGISLACIÓN AMBIENTAL APLICABLE.....	32
6.2.1	RECURSO AGUA	32
6.2.2	MANEJO DE PRODUCTOS QUÍMICOS DE RIESGO	34
6.3	CONDICIONES ECONÓMICAS Y FINANCIERAS DEL ENTORNO.....	34
6.3.1	BENCHMARK RATE.....	34
6.4	CAPACIDADES.....	35
6.4.1	CAPACIDAD DEL SISTEMA	35
6.4.2	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL SISTEMA.....	35
6.5	SERVICIOS INDUSTRIALES DISPONIBLES.....	36
6.6	CÓDIGOS DE DISEÑO APLICABLES	36
6.7	RESTRICCIONES PARA LA DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA	37
6.7.1	TERRENO:.....	38
6.7.2	COLECTOR SOLAR:.....	38

6.7.3	BOMBA:	38
6.7.4	SISTEMA DE TUBERÍAS:	39
6.7.5	INSTALACIONES ELÉCTRICAS:.....	39
6.8	NORMAS DE CODIFICACIÓN.....	39
6.9	SISTEMAS DE UNIDADES DE LOS PLANOS Y DOCUMENTOS	39
6.10	SÍMBOLOS.....	40
7	DISEÑO CONCEPTUAL	43
7.1	DIAGRAMA GENERAL DE ENTRADAS Y SALIDAS.....	43
7.2	DIAGRAMA DE BLOQUES DE PROCESO BFD	44
7.3	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PFD	45
7.3.1	DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO.....	46
7.4	SELECCIÓN DE TIPO DE EQUIPOS	46
7.4.1	SELECCIÓN DEL TIPO DE COLECTOR SOLAR.....	47
7.4.2	SELECCIÓN DEL TIPO DE BOMBA	50
7.4.3	SELECCIÓN DEL TIPO DE VALVULAS (MANUALES)	51
7.4.4	SELECCIÓN DEL TIPO DE CONTROL AUTOMÁTICO.....	51
7.4.5	SELECCIÓN DEL TIPO DE TUBERÍA	52
7.5	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA (BME) POR EQUIPO.....	53
7.5.1	BME EN LA PISCINA.....	54
7.5.2	BME EN LOS COLECTORES SOLARES	59
7.5.3	DISEÑO DE LOS COLECTORES SOLARES	61
7.5.4	BME PARA LA BOMBA	69
7.5.5	SELECCIÓN DE LA BOMBA.....	72
7.6	DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO	74
7.7	ANÁLISIS TOPOLÓGICO Y PARAMÉTRICO DEL PFD	75
7.7.1	REVISIÓN TOPOLÓGICA	75
7.7.2	REVISIÓN PARAMÉTRICA	81
8	ANÁLISIS DE RENTABILIDAD	86
8.1.1	INVERSIONES.....	86
8.1.2	COSTOS DE OPERACIÓN	87
8.1.3	CAPITAL DE TRABAJO.....	89
8.1.4	INGRESOS OPERATIVOS: AHORRO DE ENERGÍA.....	89
8.1.5	ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE EFECTIVO	89
9	CONCLUSIONES.....	97

10	RECOMENDACIONES.....	100
11	BIBLIOGRAFÍA Y CIBERGRAFÍA.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de un colector solar plano.	18
Figura 2. Pérdidas y ganancias energéticas de una piscina	20
Figura 3. Colector solar plano	21
Figura 4. Unión de los tubos a la placa.	23
Figura 5. Aleta de la sección transversal uniforme.....	24
Figura 6. Eficiencia de la aleta para colectores solares de tubo y placa.	26
Figura 8. Mapa de Medellín del sector de la Aguacatala.....	30
Figura 9. Vista aérea de la Universidad EAFIT.	31
Figura 10. Comportamiento de la DTF 90 días.	34
Figura 11. Diagrama general de la piscina.	35
Figura 12. Distribución actual de la piscina	37
Figura 13. Diagrama general de entradas y salidas	43
Figura 14. Diagrama de bloques de proceso.	44
Figura 15. Colector solar de placa plana no vidriado.	47
Figura 16. Colector solar de placa plana vidriado.	48
Figura 17. Colector solar de tubo evacuado.....	48
Figura 18. Balance de masa en la piscina.....	54
Figura 19. Balance de energía en la piscina	56
Figura 20. Diagrama esquemático de un colector solar	60
Figura 21. Medición de la radiación solar en Medellín.	63
Figura 22. Efecto del ΔT en la eficiencia para tubos con ϕ de $\frac{1}{2}$ y 1 Pulg.....	64
Figura 23. Efecto del ΔT en el costo total para tubos con ϕ de $\frac{1}{2}$ y 1 Pulg	64
Figura 24. Efecto de la distancia entre tubos en el costo y la eficiencia.....	65
Figura 25. Efecto del número de Tubos en el costo total	66
Figura 26. Efecto del número de Tubos en la Eficiencia.	67
Figura 27. Esquema preliminar de la ubicación de los colectores.....	68

Figura 28. Diagrama esquemático de la Bomba	69
Figura 29. Curva de la bomba ANSI 3x4-7 3600.....	72
Figura 30. Configuración de tubos abajo en un colector.	77
Figura 31. Configuración de tubos arriba en un colector.....	77
Figura 32. Esquema optimizado de la ubicación de los colectores.	78
Figura 33. Cortina de agua.....	80
Figura 34. Curva de la bomba actual	83
Figura 35. Resumen de las inversiones diferidas.....	87
Figura 36. Especificaciones de los colectores solares	103
Figura 37. Red hidráulica de un colector.....	112
Figura 38. Red Hidráulica de una secuencia de 6 colectores en paralelo.....	115
Figura 39. Red hidráulica de una secuencia de 10 colectores en paralelo. ...	117
Figura 40. Red hidráulica del sistema completo.....	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Temperatura (°C) del agua de las piscina	20
Tabla 2. Ubicación.....	29
Tabla 3. Datos Climáticos promedios para los años 2000-2006.	32
Tabla 4. Límites de vertimiento para aguas [10].....	33
Tabla 5. Criterios de calidad del agua	33
Tabla 6. DTF.....	34
Tabla 7. Datos relacionados a la piscina.....	35
Tabla 8. Servicios industriales disponibles.....	36
Tabla 9. Estándares para el diseño.....	36
Tabla 10. Sistema Internacional de Unidades	40
Tabla 11. Símbolos	40
Tabla 12. Evaluación del colector de placa plana no vidriado.....	49
Tabla 13. Evaluación del colector de placa plana vidriado.....	49
Tabla 14. Evaluación del colector de tubos evacuados.....	50
Tabla 15. Parámetros de selección para colectores de Polipropileno.....	52
Tabla 16. Parámetros de selección para colectores de Cobre.....	53
Tabla 17. Resultados del balance de energía en los colectores	61
Tabla 18. Medidas evaluadas para el diseño de colectores.....	62
Tabla 19 Medidas del Colector.....	68
Tabla 20 Resultados del colector.	69
Tabla 21. Parámetros para la selección de la bomba	71
Tabla 22. Características generales para la selección de la bomba	72
Tabla 23. Especificaciones de la Bomba seleccionada.....	73
Tabla 24. Resultados colector optimizado.....	77
Tabla 25. Especificaciones de la bomba para el sistema optimizado con revisión topológica.....	79

Tabla 26. Especificaciones de la bomba para el sistema optimizado con revisión paramétrica.	82
Tabla 27. Especificaciones bomba actual.	84
Tabla 28. Especificaciones bomba Necesaria.....	85
Tabla 29. Inversión en la maquinaria y accesorios.....	86
Tabla 30. Depreciaciones y Amortizaciones.....	87
Tabla 31. Requerimientos de utility del proceso.....	88
Tabla 32. Costos de mano de obra	89
Tabla 33. Costos directos de operación	89
Tabla 34. Parámetros del calderín a gas.....	90
Tabla 35. Parámetros de la bomba de calor.	91
Tabla 36. Flujo de efectivo de calefacción solar comparado con energía eléctrica.....	93
Tabla 37. Indicadores financieros con calefacción solar	93
Tabla 38. Flujo de efectivo de calefacción a gas comparado con energía eléctrica.....	94
Tabla 39. Indicadores financieros con calefacción a gas	94
Tabla 40. Flujo de efectivo comparado con bomba de calor.	95
Tabla 41. Indicadores financieros con calefacción por bomba de calor	95
Tabla 42. Resultados tubería de espaciado en un colector.....	113
Tabla 43. Resultados tubería absorbente en un colector	114
Tabla 44. Resultados tuberías de abastecimiento y recolección. S-6	116
Tabla 45. Resultados para 6 colectores en paralelo.	116
Tabla 46. Resultados tuberías de abastecimiento y recolección. S-10	118
Tabla 47. Resultados para 10 colectores en paralelo.	118
Tabla 48. Resultados tuberías generales del sistema.....	120
Tabla 49. Resultados tuberías de entrada y salida de la piscina.....	121
Tabla 50. Resultados secuencia de colectores en el sistema	121
Tabla 51. Resultados de presión en las válvulas de equilibrado	122
Tabla 52. Detalle de las inversiones en maquinaria y accesorios	124

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. HOJA TÉCNICA DEL COLECTOR.....	102
ANEXO 2. HOJA TÉCNICA DE LA BOMBA	104
ANEXO 3. DISTRIBUCIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL TECHO DE LOS CAMERINOS	105
ANEXO 4. PLANO ARQUITECTÓNICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS COLECTORES	106
ANEXO 5. LAYOUT OPTIMIZADO DE LA EXTENSIÓN DEL TECHO DE LOS CAMERINOS	107
ANEXO 6. PLANO ARQUITECTONICO OPTIMIZADO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS COLECTORES	108
ANEXO 7. PLANO DE TUBERÍAS DE LA PISCINA	109
ANEXO 8. PLANO DE TUBERIAS DEL CUARTO DE BOMBEO (VISTAS).....	110
ANEXO 9. PLANO DE TUBERIAS DEL CUARTO DE BOMBEO (ISOMÉTRICO)....	111
ANEXO 10. METODOLOGÍA Y RESULTADOS DEL DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA RED HIDRÁULICA	112
ANEXO 11. PLANO DE TUBERÍAS DE LA SECCIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES.....	123
ANEXO 12. SOPORTE DIGITAL.....	123
ANEXO 13. DETALLE DE LAS INVERSIONES.....	124
ANEXO 14. CARACTERÍSTICAS DE LA VÁLVULA DE CONTROL	126

1 RESUMEN

Se realizó un diseño básico de climatización con energía solar para la piscina de la universidad EAFIT donde se encontró que el colector mas adecuado para realizar el diseño es el colector no vidriado de cobre y se halló que el área necesaria para la ubicación de los colectores solares es mayor que el espacio disponible por lo tanto se propuso una ampliación.

Para el sistema se calculó un número optimo de 29 colectores con una área efectiva de 10.45 m² por colector con la capacidad de producir 843 Kw-h en un día de operación, utilizando manta térmica en el horario de no operación para mantener el agua de la piscina a una temperatura media de 26°C

El software Pipe FLO y Pipe Flow se utilizó para realizar el diseño del sistema hidráulico y garantizar un caudal de 1.8 m³/hr en cada uno de los colectores solares, el software Pum-Flo se empleó para determinar la bomba mas apropiada para el sistema y se encontró que la bomba con la que actualmente cuenta la piscina para el proceso de purificación con un flujo de 45.42 m³/hr, es adecuada siempre y cuando se cambie el impeler por uno de mayor diámetro (de 110 mm a 120 mm).

Se comparó financieramente el sistema de calefacción solar con la climatización por medio de otras fuentes de energía como: Calderín de gas y Bomba de calor, donde se encontró que la opción más rentable es la climatización con energía solar, debido a que presentó el mayor VPN (\$ 126) y una TIR (37%) mayor que la TIO (25%).

2 INTRODUCCIÓN

La climatización de piscinas con energía solar es una alternativa altamente aplicada, debido a que es una de las más rentables [1]. La piscina de la Universidad EAFIT se usa casi todo el año tanto para uso recreativo como para el entrenamiento de deportistas.

Actualmente la piscina se encuentra sin climatizar. La Universidad desde hace varios años ha mostrado interés por climatizarla pero la inversión inicial del sistema es alta lo que ha restringido su construcción.

Para incentivar el uso de la energía solar y para buscar alternativas más económicas en la construcción de un sistema de climatización se analizaron varios aspectos de diseño para proponer el más adecuado.

3 OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

- Realizar el diseño conceptual y básico de un sistema de calentamiento solar, mediante el análisis de alternativas de diseño, para calentar el agua de la piscina de la universidad EAFIT.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las especificaciones del proyecto, los criterios y restricciones del diseño.
- Elaborar el diseño conceptual aplicando heurística y diferentes algoritmos.
- Realizar el diseño básico utilizando datos técnicos para el sistema de calefacción solar.
- Evaluar la factibilidad económica del proyecto para compararla con otras alternativas.

4 ALCANCE

El proyecto contiene el diseño conceptual y básico de un sistema de calentamiento solar para climatizar el agua de la piscina de la universidad EAFIT. Además se presenta:

- diagrama de bloques.
- Balance de materia y energía.
- PFD.
- Algoritmos de cálculo.
- Resultados de la distribución del flujo de agua a través de la red de tuberías simulada con el software PIPE-FLO.
- Especificaciones de los colectores solares y del sistema hidráulico.
- Estudio económico del proyecto comparado con el costo de otras alternativas de calentamiento.
- Layout, planos arquitectónicos y planos de tuberías.

El proyecto no incluye la construcción de prototipos de diferentes configuraciones de paneles solares con el fin de evaluar experimentalmente sus resultados, tampoco se incluye la construcción y puesta en marcha del sistema.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 TECNOLOGÍAS PARA CONVERSIÓN SOLAR FOTOTÉRMICA

Para la conversión de la energía solar hay dos tipos de tecnologías: tecnologías de conversión fotovoltaica y de conversión fototérmica. Se puede mencionar entre las aplicaciones de los sistemas fototérmicos las siguientes:

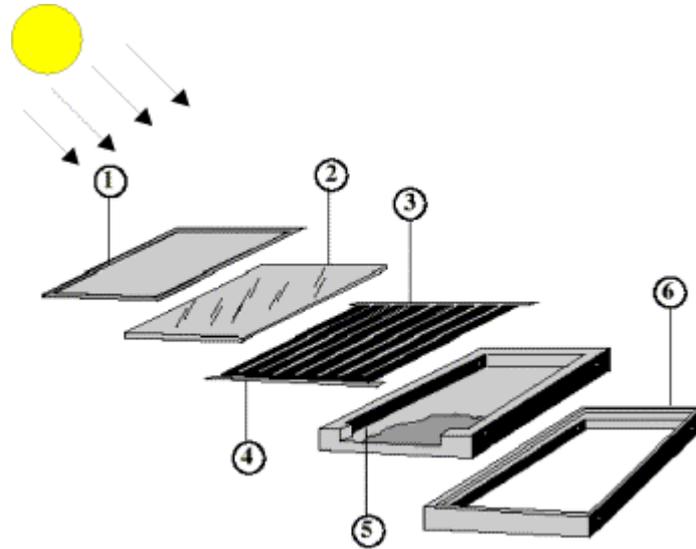
[2]

- Calentamiento solar de agua ($T < 100^{\circ}\text{C}$), calentamiento de uso domestico, calentamiento de piscinas, sistemas pasivos y activos.
- Calentamiento de edificios ($T < 100^{\circ}\text{C}$), sistemas activos pasivos e híbridos.
- Enfriamiento ($T < 150^{\circ}\text{C}$), sistemas de aire acondicionado y refrigeración.
- Calor para procesos industriales ($T < 150^{\circ}\text{C}$), calentamiento de fluidos (agua, aire y aceites) para uso industrial. Sistemas abiertos y sistemas cerrados.
- Estanques solares ($T < 100^{\circ}\text{C}$).
- Procesos evaporativos ($T < 100^{\circ}\text{C}$) destiladores. Secadores.
- Sistemas termo solares de potencia ($200 < T < 1000^{\circ}\text{C}$).
- Hornos solares ($T < 4000^{\circ}\text{C}$), tratamiento de materiales.

5.2 COLECTORES SOLARES

Un colector solar es un dispositivo que convierte la radiación solar en energía térmica, existen diferentes tipos de colectores solares en función del nivel de la temperatura alcanzada; los colectores solares planos ($T < 90^{\circ}\text{C}$), los colectores solares planos encapsulados y al vacío ($100 < T < 150^{\circ}\text{C}$) y los colectores solares con concentración óptica ($200 < T < 4000^{\circ}\text{C}$).

Figura 1. Componentes de un colector solar plano. [2]



- 1.- Marco de aluminio.
- 2.- Cubierta de vidrio templado.
- 3.- Placa absorbedora con aletas de cobre.
- 4.- Cabezales de alimentación y descarga de agua.
- 5.- Aislante, usualmente poliestireno, o unicel
- 6.- Caja del colector, galvanizada.

La concepción más simple de un colector solar, consiste en una superficie capaz de absorber la mayor cantidad posible de radiación solar, y transmitir esta en forma de calor hacia el fluido, el cual será directamente utilizado o simplemente transferirá el calor a un proceso secundario. Con el objeto de aprovechar lo más posible la energía térmica acumulada, es necesario evitar en lo posible las pérdidas de calor, utilizando aislamientos térmicos convectivos, conductivos y radiativos. En la figura 1 se observan los componentes más importantes en un colector solar [2].

Un colector solar ideal, sería aquel que estuviera formado por una superficie absorbente, con un factor de absorción elevado y un factor de emisión bajo, y un buen aislamiento térmico.

5.3 CONSIDERACIONES EN EL CALENTAMIENTO DE PISCINAS

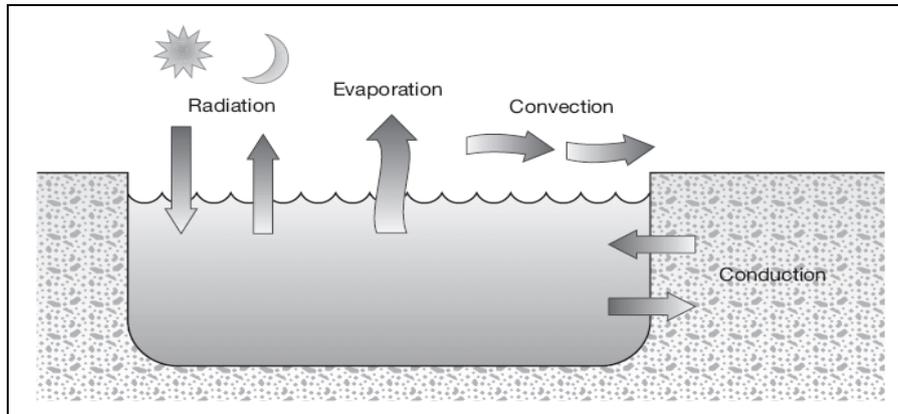
En particular, la intervención de la energía solar en este tipo de aplicación consiste en conservar la temperatura del agua de la piscina, reintegrando con la fuente solar la energía dispersa por el espejo de agua. Una piscina al aire libre no calentada tiene un ciclo anual de temperatura que varía según el clima y la ubicación geográfica.

Una piscina requiere un calentamiento de baja temperatura y generalmente es necesario conservar la temperatura del agua por encima de los 24°C y preferiblemente alrededor de los 27 °C.

El diseño analítico de un conjunto de colectores para la conservación de la temperatura del agua de una piscina al aire libre es complejo a causa de la inestabilidad de las condiciones climáticas, que influyen de forma notable sobre las dispersiones térmicas de la piscina. En la figura 2 se encuentran los parámetros mas importantes de las pérdidas y ganancias energéticas de una piscina al aire libre.

El viento, por ejemplo, puede provocar enormes pérdidas, tanto por convección como por evaporación del agua de la superficie de la piscina. Asimismo las pérdidas por radiación nocturna son bastante variables. [3]

Figura 2. Pérdidas y ganancias energéticas de una piscina [4]



5.4 TEMPERATURA DEL AGUA DE LAS PISCINAS

La temperatura a la que se ha de elevar el agua de la piscina es de 24 - 27 °C, lo que permite a los sistemas solares más sencillos funcionar con un excelente rendimiento. Según el uso principal de la piscina se manejan las temperaturas mostradas en la Tabla 1. la cual se medirá en el centro de la piscina y a unos 20 cm por debajo de la lámina de agua. [5]

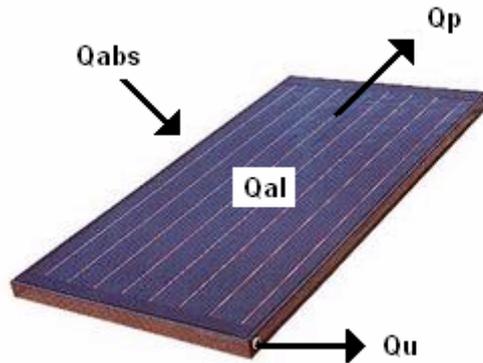
Tabla 1. Temperatura (°C) del agua de las piscinas. [5]

Recreo	27
Enseñanza	25
Entrenamiento	26
Competición	24
Privado	25/26

5.5 COLECTOR SOLAR PLANO

Mediante un balance energético como se ilustra en la Figura 3. se puede hallar la distribución de la energía solar incidente sobre un colector de placa plana, su transformación en energía útil y las pérdidas térmicas. Este balance energético se puede poner en la siguiente forma:

Figura 3. Colector solar plano



$$Q_{abs} = Q_u + Q_p + Q_{al} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$Q_{abs} = A_c k_s I_s \alpha_s \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde:

Q_{abs} : es la cantidad de calor absorbida por el colector.

Q_p : es la cantidad de calor perdida desde la placa absorbente del colector al medio exterior, tanto por convección, como por conducción y radiación. Esta energía perdida lo es hacia arriba, hacia abajo y hacia los laterales del colector.

Q_{al} : es la energía almacenada en el colector

A_c : es la superficie del colector, en la placa absorbente.

K_s : es un factor de conversión de la radiación (difusa y directa), que sirve para evaluar la energía solar incidente en el plano del colector.

α_s : es la absorbancia solar de la placa absorbente del colector

Q_u : es el calor útil que se transfiere al fluido refrigerante que circula por el colector solar, de valor: [6]

$$Q_u = G_F C p_F (T_{sal} - T_{ent}) = C_{col} (T_{sal} - T_{ent}) \quad \text{Ecuación 3}$$

Siendo C_{col} : la capacidad calorífica del fluido del colector

5.5.1 Pérdidas de calor del colector

El valor de Q_p se puede poner en función del coeficiente global de transmisión de calor de las pérdidas de calor del colector U_c . Si se conoce U_c y si la placa del colector se sabe está a una temperatura media T_c el valor de Q_p se puede poner, siendo T_a la temperatura ambiente, en la forma:

$$Q_p = U_c A_c (T_c - T_a) \quad \text{Ecuación 4}$$

Un modelo adecuado de análisis térmico de un colector de placa plana puede considerar las siguientes hipótesis simplificadoras: [6]

- El colector está térmicamente aislado en estado estacionario.
- La caída de temperatura entre la parte superior e inferior de la placa es despreciable.
- El flujo térmico se puede considerar monodimensional, tanto a través de las cubiertas, como de los aislamientos laterales.
- Los cabezales que conectan los tubos cubren solamente una pequeña superficie de la placa colectora y proporcionan un flujo térmico uniforme a los tubos.
- El cielo se puede considerar como si fuese una fuente térmica equivalente a un cuerpo negro, en lo que respecta a la radiación infrarroja, a una temperatura del cielo equivalente.
- Se supondrá que la radiación, I_s , sobre la placa plana absorbente del colector es uniforme.

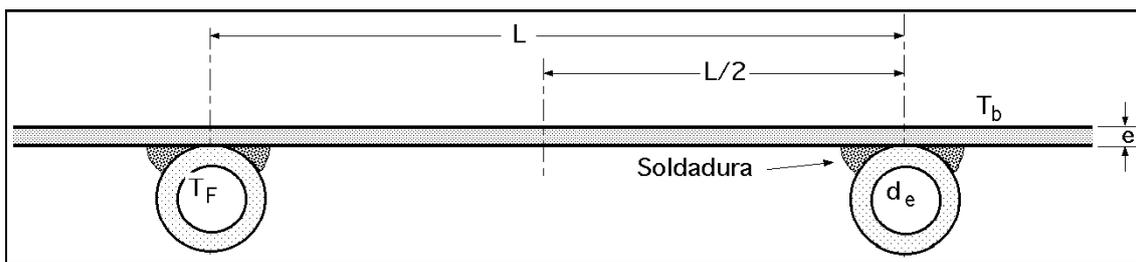
5.5.2 Distribución de temperaturas y factor de eficiencia del colector

Se hace la disposición de tubos como se indica en la Figura 4 separados una distancia L , con un espesor de placa e , anchura a y diámetro exterior de los tubos D_e . En lo anterior se llamo T_c a la temperatura de la placa que se asume constante; sin embargo, al introducir el sistema de tubos separados una distancia L se produce en la placa un flujo de calor desde la mitad de esa

distancia hacia cada tubo que será captado por éstos, lo que hace que a lo largo de la placa en tramos correspondientes a dos tubos consecutivos, la temperatura de la placa sea variable. [6]

Como el material de la placa metálica es un buen conductor del calor, el gradiente de temperaturas a través de la misma será despreciable; si se conoce la temperatura T_b en la unión del tubo con la placa, la región entre la línea central que divide a la placa entre dos tubos por la mitad y la base de éstos, se puede considerar como una aleta térmicamente aislada en su extremo libre.

Figura 4. Unión de los tubos a la placa.



Para un elemento de aleta de superficie ($a \Delta x$) la energía absorbida es: $(I_s \alpha_s)$ a Δx . El flujo térmico se dirige de la placa (aleta) hacia los tubos, y no a la inversa, como sucede en el estudio general de aletas, pudiéndose hacer el siguiente balance térmico en la Figura 5: [6]

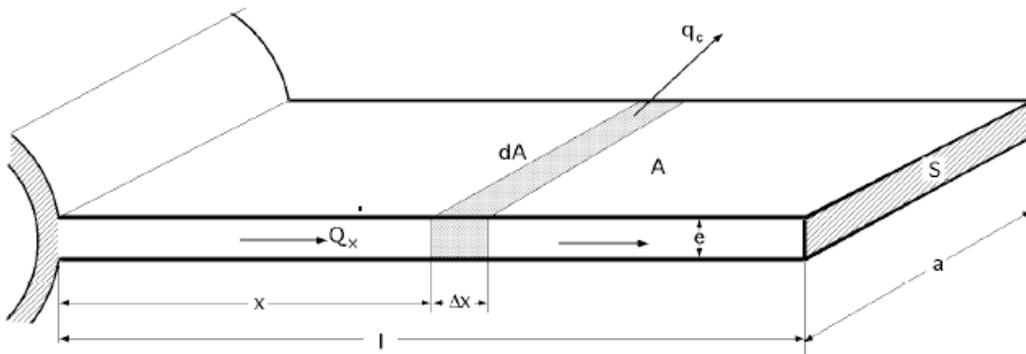
$$q = kS \left(\frac{dT}{dx} \right)_x \Rightarrow \frac{\partial q}{\partial x} \Delta x = kS \left(\frac{d^2T}{dx^2} \right)_x \Delta x \quad \text{Ecuación 5}$$

Con, $S = a * e$, (sección transversal de la placa); para una anchura: $a=1 \Rightarrow S=e$. Las pérdidas de calor transmitidas por convección al exterior, a través del elemento de superficie ($a \Delta x$) vienen dadas por:

$$q_c = U_c(a\Delta x)(T - T_a) = U_c\Delta x(T - T_a) \quad \text{Ecuación 6}$$

Siendo U_c la conductancia global a través de las cubiertas, entre la placa y el aire ambiente.

Figura 5. Aleta de la sección transversal uniforme



El balance energético para ($a = 1$) es:

$$\alpha_s I_s \Delta x - U_c \Delta x (T - T_a) + \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} k S \Delta x = 0 \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2}\right)_x = \frac{U_c}{kS} (T - T_a) - \frac{\alpha_s I_s}{kS} = \frac{U_c}{kS} \left(T - T_a - \frac{\alpha_s I_s}{U_c}\right) \Rightarrow \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi^2}\right)_\xi = \frac{U_c \cdot a \cdot l^2}{kS} \phi = (Bi)\phi$$

Ecuación 8

$$\text{Con: } Bi = \frac{U_c \cdot l^2}{ke}; \quad l = \frac{L - De}{2}; \quad \xi = \frac{x}{L} \quad \text{Ecuación 9}$$

Que resuelta como aleta de sección transversal uniforme y extremo libre térmicamente aislado, proporciona la siguiente distribución de temperaturas:

$$\phi(\xi) = \frac{Ch(\sqrt{Bi}(1-\xi))}{Ch\sqrt{Bi}} = \frac{T - Ta - \frac{I_s \alpha_s}{Uc}}{Tb - Ta - \frac{I_s \alpha_s}{Uc}} \quad \text{Ecuación 10}$$

La energía conducida a los tubos a través de las aletas, (2 por tubo), es:

$$q(\text{aletas} - \text{tubo}) = 2 \frac{KS}{1} (Tb - Ta - \frac{I_s \alpha_s}{Uc}) \sqrt{Bi} Th \sqrt{Bi} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$q(\text{aletas} - \text{tubo}) = (L - De)(I_s \alpha_s - Uc(Tb - Ta)) \frac{Th \sqrt{Bi}}{\sqrt{Bi}} \quad \text{Ecuación 12}$$

En la que $\frac{Th \sqrt{Bi}}{\sqrt{Bi}} = \eta_a$ es la eficiencia de esta aleta, Figura 6.

El valor de $q(\text{aletas-tubo})$ queda finalmente en la forma:

$$q(\text{aletas} - \text{tubo}) = (L - De)(I_s \alpha_s - Uc(Tb - Ta)) \eta_a \quad \text{Ecuación 13}$$

La energía térmica del colector en la parte correspondiente al tubo es:

$$q(\text{tubo}) = De(I_s \alpha_s - Uc(Tb - Ta)) \quad \text{Ecuación 14}$$

La energía útil Q_u que el colector transmite al fluido por unidad de anchura a es la suma de las anteriores:

$$Qu = (I_s \alpha_s - Uc(Tb - Ta))((L - De)\eta_a + De) \quad \text{Ecuación 15}$$

Que tiene que ser igual a la energía que absorbe el fluido que circula por el interior de los tubos:

$$Qu = \frac{Tb - Tf}{\frac{1}{h_{cf}(a \cdot Di \cdot \pi)} - \frac{1}{Cb}} \quad \text{Ecuación 16}$$

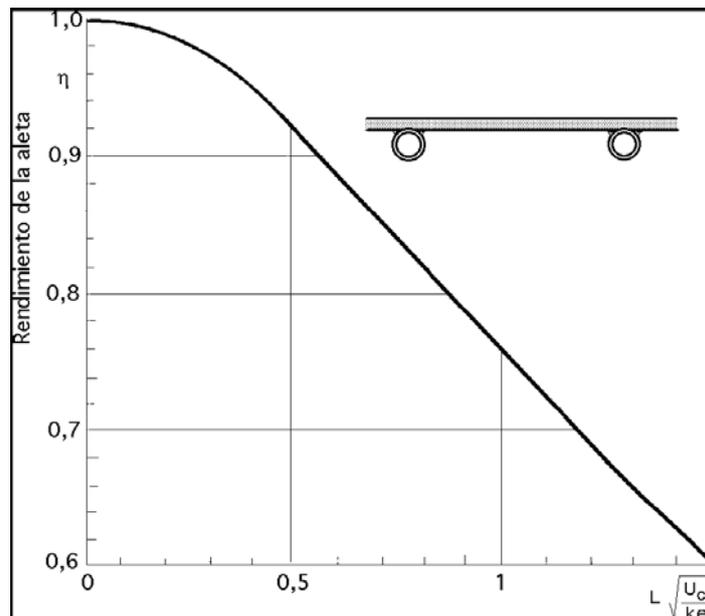
En la que C_b es la conductancia de la unión, que se puede calcular en función de la conductividad térmica k_b de la unión, del grosor medio e de la misma y de su longitud b , que para ($a = 1$) es:

$$C_b = \frac{K_b \cdot b}{e} \quad \text{Ecuación 17}$$

Es muy importante el contacto metal-metal para que la resistencia de la unión sea inferior a $0,03 \text{ m}^\circ\text{C/W}$; si C_b es muy grande, resulta: [6]

$$Q_u = h_{cf} (a \cdot D_i \cdot \pi)(T_b - T_f) \quad \text{Ecuación 18}$$

Figura 6. Eficiencia de la aleta para colectores solares de tubo y placa.



Eliminando T_b se obtiene una expresión para la ganancia útil q_u función de las dimensiones, parámetros físicos y temperatura T_f local del fluido y T_a de la atmósfera, de la forma:

$$Q_u = \frac{I_s \alpha_s - U_c(T_f - T_a)}{\frac{1}{D_e + (L - D_e)\eta_a} + \frac{U_c}{C_b} + \frac{U_c}{h_{cf} \cdot D_i \cdot \pi}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Observándose que el denominador es la resistencia térmica existente entre el fluido y el medio ambiente, mientras que el numerador es la resistencia térmica existente entre el colector y el medio ambiente. [6]

$$F = \frac{\frac{1}{L \cdot U_c}}{\frac{1}{U_c(D_e + (L - D_e)\eta_a)} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{h_{cf} \cdot D_i \cdot \pi}} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$Q_u = L \cdot F(I_s \alpha_s - U_c(T_f - T_a)) \quad \text{Ecuación 21}$$

El **factor de eficiencia** F crece al aumentar el espesor de la placa y la conductividad térmica de la misma, y decrece al aumentar la distancia entre los conductos de flujo. Un aumento de U_c hace que F disminuya.

Se define el **factor de evacuación de calor del colector** F_R como el cociente de la velocidad real de transferencia de calor al fluido de trabajo y la velocidad de transferencia térmica a la máxima diferencia de temperaturas entre el fluido absorbente del colector y el medio ambiente, mediante la relación:

$$F_R = \frac{\text{Ganancia Energética Util}}{\text{Ganancia Energética Util si la superficie del colector esta a } T_{f1}}$$

Siendo T_{F1} la temperatura de entrada del fluido.

El límite termodinámico del denominador corresponde a la condición de que el fluido de trabajo permanezca a la temperatura T_{F1} de entrada en todo el colector, valor al que se puede aproximar cuando la velocidad de entrada sea muy grande. La temperatura del fluido aumenta en la dirección del flujo a medida que se le va suministrando calor.

El factor F_R es de la forma:

$$F_R = \frac{G_{Fluido} C_{pF} (T_{F1} - T_{F2})}{I_s \alpha_s \cdot U_c (T_{F1} - T_a)} = \frac{G_{Fluido} C_{pF}}{U_c} \left(1 - e^{-\frac{U_c \cdot F}{G_{Fluido} C_{pF}}}\right) \quad \text{Ecuación 22}$$

Siendo G_{Fluido} el flujo másico por unidad de superficie y Cp_F el calor específico del fluido. La ganancia total de energía útil del colector es:

$$Qu = Ac \cdot F_R (I_s \alpha_s - U_c (T_{F1} - T_a)) \quad \text{Ecuación 23}$$

Calculándose esta ganancia de energía útil en función de la temperatura T_{F1} de entrada del fluido, que normalmente es un dato.

La eficiencia η del colector se define como: [6]

$$\eta = \frac{Qu}{Ac \cdot I_s} = F_R \left(\alpha_s - \frac{U_c (T_{F1} - T_a)}{I_s} \right) \quad \text{Ecuación 24}$$

5.5.3 Temperatura media de la placa

Para poder evaluar el rendimiento del colector hay que conocer U_c que es función de la temperatura de la placa.

La temperatura media de la placa T_c siempre será superior a la temperatura media del fluido T_F . Esta diferencia de temperaturas es, generalmente, pequeña para sistemas de líquidos y significativa para sistemas de aire. Se pueden relacionar T_c y T_F mediante la ecuación:

$$T_c = T_f + Qu \cdot Rp_F \quad \text{Ecuación 25}$$

En la que Rp_F es la resistencia a la transferencia de calor entre la placa y el fluido, que depende del coeficiente de transferencia de calor por convección. Para un colector de tubos y aletas, éste supone que tanto la conductancia de la unión, como la eficiencia de la aleta, sean altas. Para un líquido que circula por el interior de una tubería, el valor de la resistencia a la transferencia de calor entre la placa y el fluido Rp_F es:

$$Rp_F = \frac{1}{hc_F \cdot \pi \cdot Di \cdot n \cdot a} \quad \text{Ecuación 26}$$

Siendo n el número de tubos, a la longitud de los mismos. [6]

6 PROJECT DESIGN SPECIFICATION

En el presente documento llamado “*Project Design Specification*” se definen las restricciones y reglas que se tendrán en cuenta durante el desarrollo del Proyecto del Diseño de un sistema de calentamiento solar para climatizar el agua de la piscina de la universidad. Este documento especifica la ubicación del proyecto, la legislación ambiental colombiana aplicable al proyecto, el entorno financiero del país, la capacidad del sistema, los servicios industriales disponibles, las normas que se emplearán en el diseño, así como los símbolos y las unidades que se utilizarán a lo largo de este proyecto de diseño.

6.1 UBICACIÓN

Las condiciones específicas de ubicación geodésica del sistema de calentamiento por energía solar se presentan en la siguiente tabla: [7]

Tabla 2. Ubicación

Longitud	75°34'O
Latitud	06°11'N
Altitud	1508m

El sistema de calentamiento por energía solar estaría ubicado en la universidad EAFIT Avenida las vegas Cr 49 Nro 7Sur-50 de la ciudad de Medellín. En la figura 8 y 9 se ilustra la ubicación del proyecto

Figura 7. Mapa de Medellín del sector de la Aguacatala. [8]

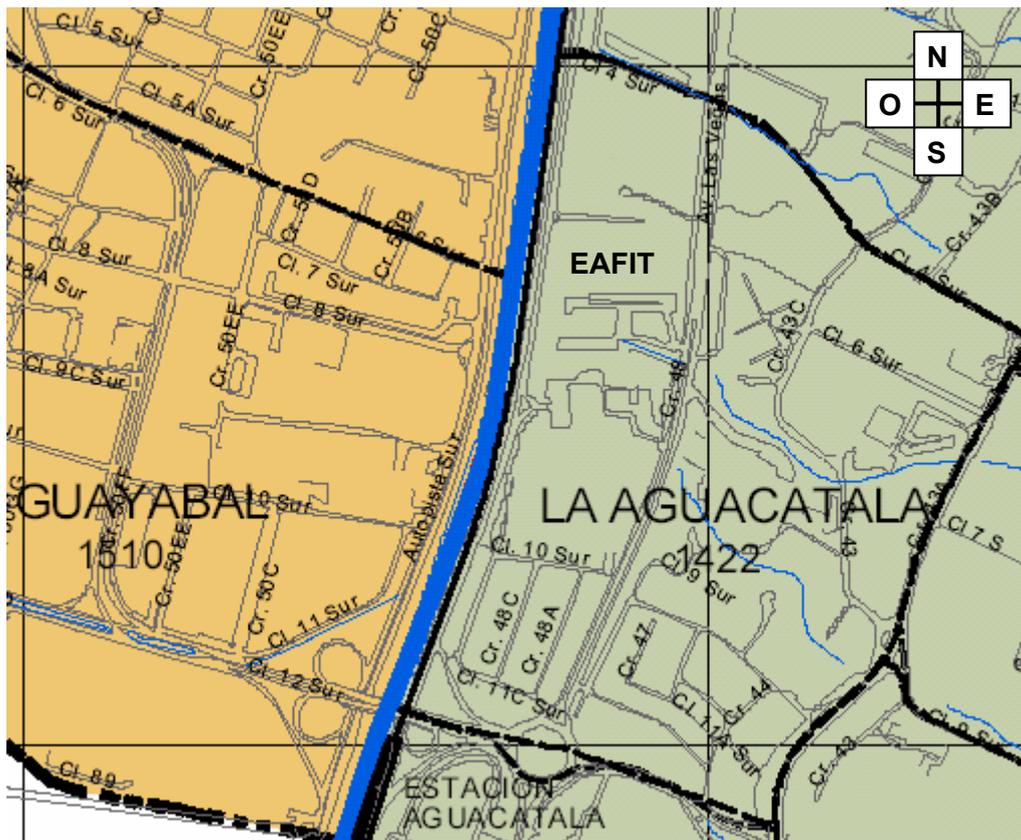
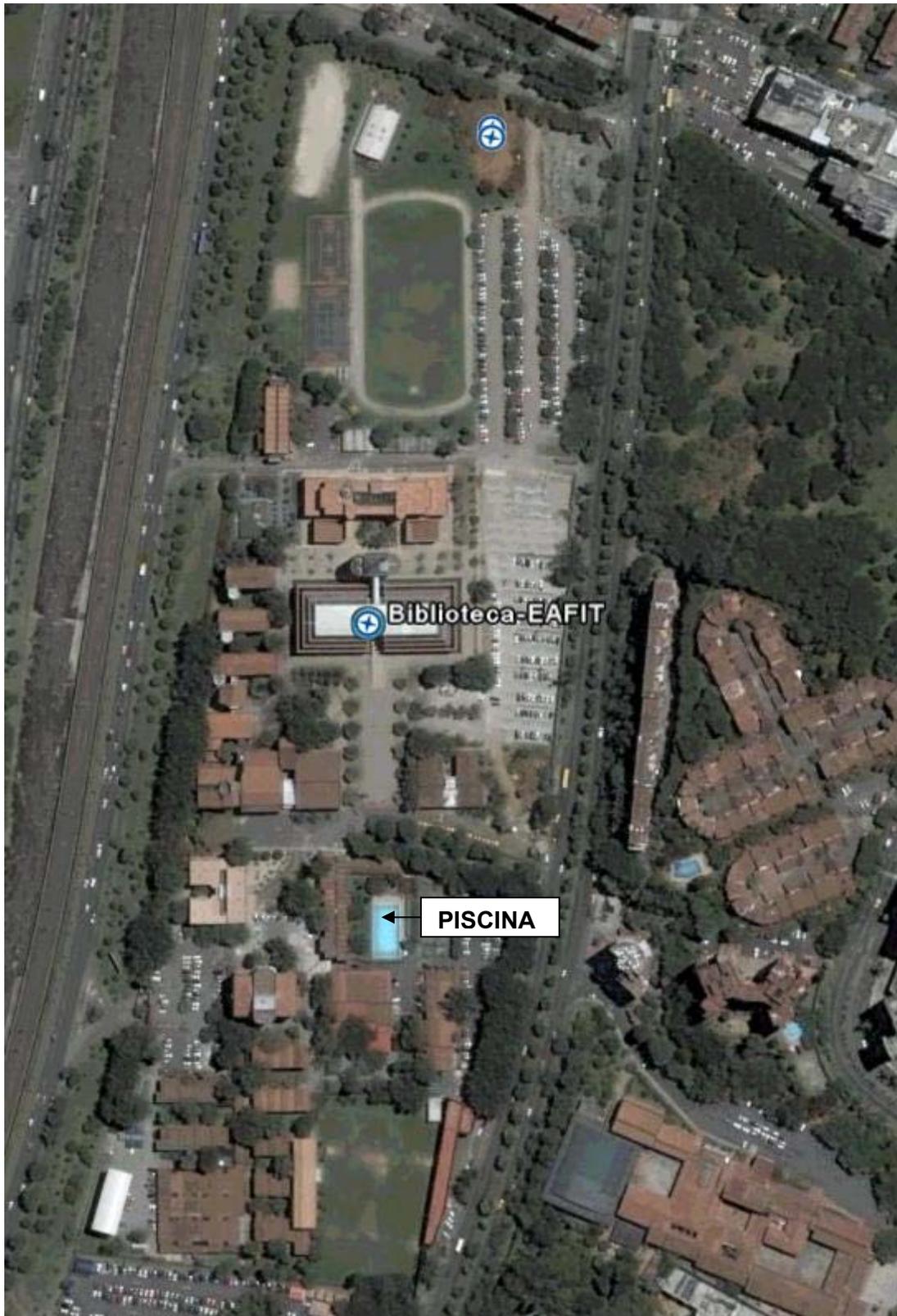


Figura 8. Vista aérea de la Universidad EAFIT. [9]



Otra información que debe ser tenida en cuenta es la referente a los datos climáticos de Medellín, los más relevantes se muestran a en la tabla 3 [10]:

Tabla 3. Datos Climáticos promedios para los años 2000-2006.

Parámetro	Promedio (mes)
Temperatura media (°C)	22.75
Temperatura máxima promedio (°C)	26.35
Temperatura mínima promedio (°C)	17.82
Humedad relativa media (%)	64.02
Precipitación total (mm)	62.42
Velocidad media del viento (Km/h)	5.80
Velocidad de ráfagas máximas de viento (km/h)	16.68
Radiación Horizontal (W/m ²)	200

6.2 LEGISLACIÓN AMBIENTAL APLICABLE

Los siguientes son los decretos y leyes ambientales colombianas que deben tenerse en cuenta:

6.2.1 RECURSO AGUA

El uso de agua con fines recreativos se define como un uso consuntivo, donde el agua retorna a las fuentes con alteraciones no significativas de cantidad y calidad inicial.

- En cuanto a las normas de vertimiento. Se mencionan en la Tabla 4. los límites que aplican, estipulados por los artículos 73 y 74 del DECRETO No. 1594 DEL 26 DE JUNIO DE 1984.

Tabla 4. Límites de vertimiento para aguas [11].

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura	≤ 40	°C
pH	5-9	pH
Sólidos sedimentables	≤ 10	mg/l
Sólidos en suspensión	750	mg/l
Sustancias solubles en hexano	≤ 100	mg/l
DQO	1500	mg/l
Aceites y grasas	150	mg/l
Sólidos en suspensión	750	mg/l
Cloruros	2000	mg/l
Fenoles totales	0.2	mg/l
Difenil Policlorados	No detectable	mg/l
Tricloro Etileno	1	mg/l

- En cuanto los criterios de calidad para destinación del recurso. el Artículo 42, del mismo decreto define que los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para fines recreativos mediante contacto primario (natación y buceo), se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Criterios de calidad del agua [11].

Parámetro	Valor	Unidades
Coniformes fecales	2	Microorganismos/ml
Coniformes Totales	10	Microorganismos/ml
Fenol	0,002	ppm
Oxigeno disuelto	70%	Concentración de saturación
PH (12)	7.2-7.6	
Sustancias activas al azul de metileno	0.5	ppm

No se aceptará en el recurso película visible de grasas y aceites flotantes, presencia de material flotante proveniente de actividad humana; sustancia

tóxicas o irritantes cuya acción por contacto, ingestión o inhalación, produzcan reacciones adversas sobre la salud humana. El nitrógeno y el fósforo deberán estar en proporción tal que no ocasionen eutroficación [11].

LEY No. 373 DEL 6 DE JUNIO DE 1997: Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.

6.2.2 MANEJO DE PRODUCTOS QUÍMICOS DE RIESGO

- **LEY 55 DE 1993**, se advierte sobre la seguridad en la utilización de los productos químicos en el trabajo y la responsabilidad de los empleadores al utilizar este tipo de productos. Los productos químicos usados en el mantenimiento de las piscinas son: cloro y floculantes. [13]

6.3 CONDICIONES ECONÓMICAS Y FINANCIERAS DEL ENTORNO

En estos momentos existen subsidios financieros para instalar calentadores solares cuando estos van a reemplazar calderas o equipos que emiten gases contaminantes, pero si es una piscina que va a instalar por primera vez la climatización, no existe ningún tipo de subsidio financiero.

6.3.1 BENCHMARK RATE

Figura 9. Comportamiento de la DTF 90 días. [14]

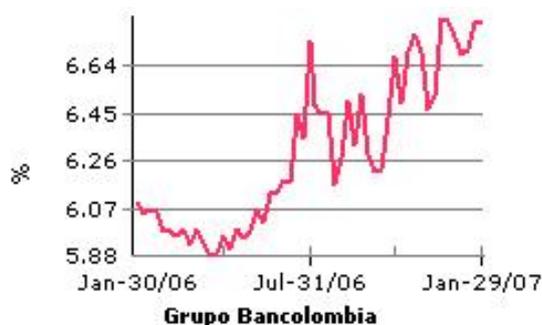


Tabla 6. DTF

E.A	6.82%
T.A	6.54%

En la Figura 2, se observa el comportamiento de la DTF durante el 2006 y 2007. Para el 4 de Febrero del 2007 el valor de la DTF es:

6.4 CAPACIDADES

6.4.1 CAPACIDAD DEL SISTEMA

El sistema tendrá la capacidad de generar **843.45 KW-h** (Este valor es calculado en la sección 7.5.1) en un día de operación. Para mantener 444500 Kg de agua a una temperatura media de 26 °C. y la diferencia entre la temperatura de entrada y salida del fluido no podrá ser mayor a 15 °C [15]. Para esta estimación se tuvo en cuenta diferentes aspectos como: Las condiciones ambientales, pérdidas de calor, y temperatura deseada.

6.4.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL SISTEMA

Figura 10. Diagrama general de la piscina.



SKIMMER: Dispositivo utilizado para retener partículas de gran tamaño, en la succión del agua para la recirculación.

Tabla 7. Datos relacionados a la piscina

Longitud (m)	25
Ancho (m)	12.7
Profundidad (m)	1.4
Temperatura media (°C)	24
Área Superficial (m ²)	317.5
Volumen (m ³)	444.5
Temperatura del suelo alrededor de la piscina (°C)	25.5
Numero promedio diario de usuarios	30
Área superficial del cuerpo de una persona (m ²). (15)	1.7

6.5 SERVICIOS INDUSTRIALES DISPONIBLES

Los servicios industriales que se encuentran disponibles para la climatización del agua de la piscina se encuentran descritos en la tabla 8.

Tabla 8. Servicios industriales disponibles

Servicio Industrial	Descripción
Energía solar	Radiación promedio en Medellín durante 11 horas diurnas es: 200 W/m ² ó 413 Langley [2]
Energía eléctrica	Voltajes disponibles: 110V, 220V

6.6 CÓDIGOS DE DISEÑO APLICABLES

El diseño, se realizará conforme a las normas reconocidas en Colombia e Internacionalmente.

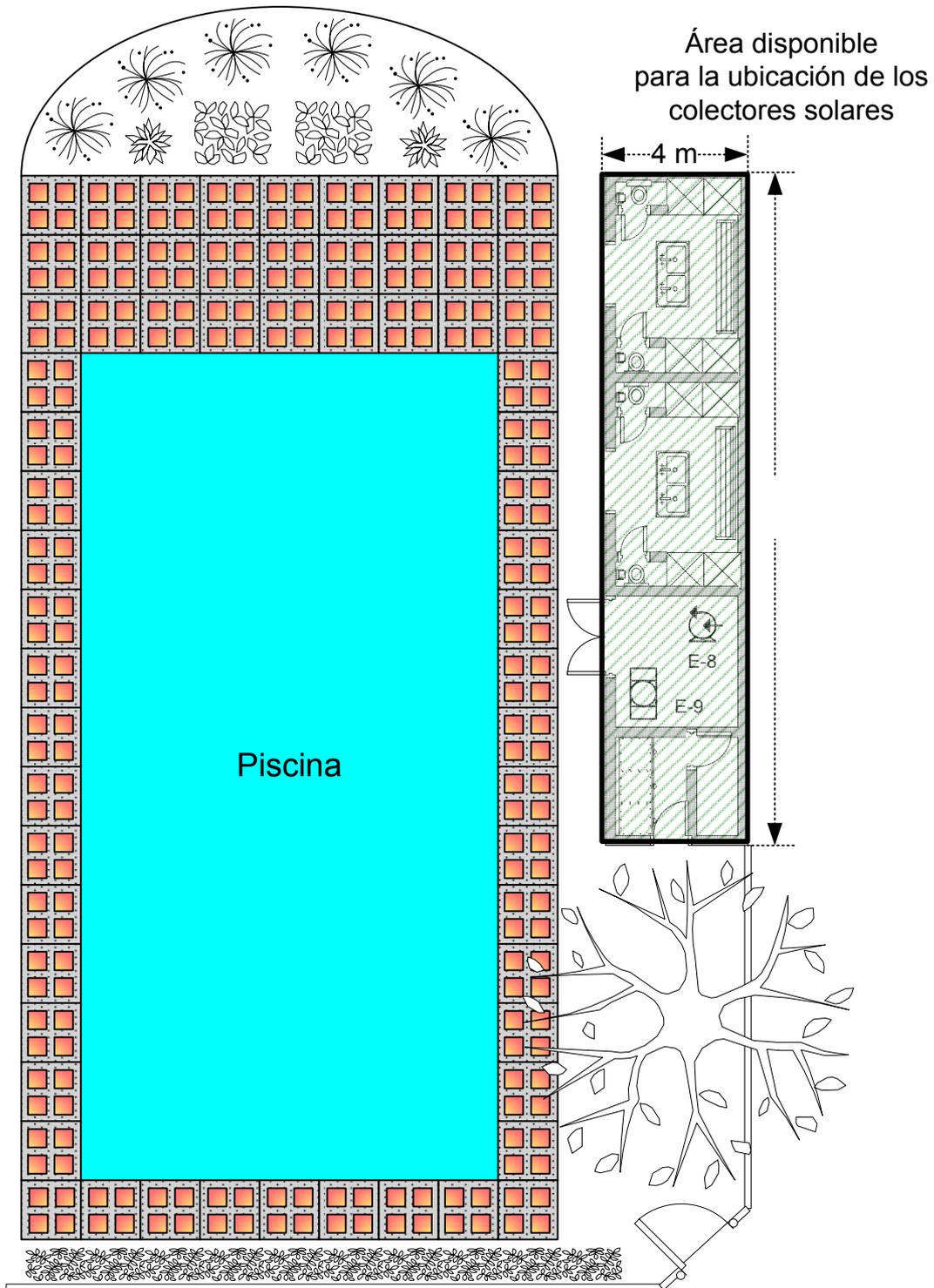
- **ASHRAE** “American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers”
- **ASME** “American Society of Mechanical Engineers”
- **ASTM** “American Society for Testing and Materials”
- **AWS** “American Welding Society”
- **IEEE** “Institute of Electric and Electronic Engineers”

Tabla 9. Estándares para el diseño.

ASHRAE STD 15	Estándar de seguridad para los sistemas de calefacción.
ASME B16.34	Válvulas, bridas roscadas y acabados de soldadura.
ASME B16.5	Rebordos de tubería.
ASME B31.1	Tuberías de Vapor y Sistemas de Potencia.
ASTM 02.04	Metales niquelados no ferroso, cobalto, plomo, lata, cinc, metales del cadmio, preciosos, reactivos, refractarios y aleaciones; materiales para los termóstatos, contactos eléctricos de la calefacción y de la resistencia, y conectadores.
IEEE 315	Símbolos gráficos para los diagramas eléctricos y de la electrónica.
IEEE C2	Código de seguridad eléctrica.

6.7 RESTRICCIONES PARA LA DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA

Figura 11. Distribución actual de la piscina



6.7.1 TERRENO:

El terreno en donde se instalará el sistema será; el área del techo del camerino (80 m²), ubicado en el costado oriental de la piscina.

6.7.2 COLECTOR SOLAR:

Orientación del colector

Los colectores solares se deben orientar geográficamente para maximizar la cantidad de energía solar diaria que recibe. En Medellín estos se deberán orientar hacia el sur para obtener una mayor eficiencia y para efectos de lavado por lluvia, esto prolongara los periodos entre el mantenimiento. No deben tener orientación ni al este, oeste o norte. [16]

Inclinación del colector

La inclinación de colectores solares para la operación durante todo un año debe ser igual a la latitud del lugar donde se realizará el proyecto para este diseño debe ser de 6°11'. [16]

Material de construcción

Los materiales mas comunes para las construcción de colectores son: polipropileno y cobre [32]. La máxima longitud de tubería de cobre de 1" y ½" disponible en el mercado es de 6 m.

6.7.3 BOMBA:

Se ubicará al nivel de la succión a 50 cm por debajo del nivel del piso en el cuarto de bombas.

6.7.4 SISTEMA DE TUBERÍAS:

Se utilizara tubería de PVC ANSI Schedule 40 con diámetros de 4", 3", 2 ½", 2", 1 ½", 1 ¼" y 1" para el sistema hidráulico donde opera con una presión máxima de 120 PSI.

6.7.5 INSTALACIONES ELÉCTRICAS:

Los cables para transportar la energía eléctrica deben ser de cobre numero 12 y numero 10, la instalación debe contar con un sistema de breakers.

Los equipos que utilicen energía eléctrica como la bomba hidráulica y el control automático deberán operar con voltajes de 110V o 220V y deben estar aterrizados a tierra.

6.8 NORMAS DE CODIFICACIÓN

- La documentación se realizará conforme a la norma de gestión de la calidad ISO 9000 3.7 y 4.2 "International Standards Organization"
- Los equipos serán codificados según la norma ASME "American Society of Mechanical Engineers"
- Las tuberías serán codificadas según la norma ANSI A13.1 "American National Standards Institute"
- Para codificar instrumentos sobre los diagramas de proceso e instrumentación se utilizará ISA estándar ISA-5-1.

6.9 SISTEMAS DE UNIDADES DE LOS PLANOS Y DOCUMENTOS

Para la elaboración de documentos y diagramas se define como sistema de unidades el internacional. En la tabla 10, se presenta la magnitud con su respectivo nombre y unidades.

Tabla 10. Sistema Internacional de Unidades

Magnitud	Nombre	Símbolo
Longitud	metro/pulgada	m/pulg
Masa	kilogramo	kg
Densidad	kilogramo por metro cúbico	kg/m ³
Tiempo	segundo	s
Temperatura termodinámica	Kelvin/Centígrado	°K/°C
Presión	Pascal/Psi	Pa/Psi
Cantidad de sustancia	mol	Mol
Superficie	metro cuadrado	m ²
Volumen	metro cúbico	m ³
Velocidad	metro por segundo	m/s
Aceleración	metro por segundo cuadrado	m/s ²
Frecuencia	hertz	Hz
Energía, trabajo, cantidad de calor	Julio Kilovatio hora	J KW-h
Potencia	Kilovatio	KW
Potencial eléctrico fuerza electromotriz	voltio	V
Resistividad	ohmio por metro	Ω/m
Conductancia eléctrica.	Siemens	S

6.10 SÍMBOLOS

A continuación se muestran los símbolos que se considerarán para el diseño del sistema de calentamiento con energía solar

Tabla 11. Símbolos

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
A	Área total de la superficie de transmisión de calor
α	Coefficiente de ajuste
α_s	Absortividad del absorbedor de la radiación solar
Cp	Calor específico a presión constante
D _e	Diámetro exterior de la tubería
D _i	Diámetro interior de la tubería

ε	Emisividad
ε_{γ}	Emitancia del vidrio
ε_{π}	Emitancia placa negro mate
F	Eficiencia del colector.
f	Flujo volumétrico
F_i	Flujo molar
η	Capacidad de conversión de la energía solar a calor en un colector plano
H	Entalpía
h	Coeficiente individual, o de superficie, de transmisión de calor.
h_w	Coeficiente de transferencia de calor por convección
I_s	Es la irradiancia total
K	Coeficiente de transferencia de calor por conducción
L	Distancia entre los tubos.
m	Vaporización total del agua total
m_p	Evaporación del agua desde el cuerpo de las personas recién salidas de la piscina
m_s	Evaporación del agua desde el suelo mojado alrededor de la piscina
m_w	Evaporación del agua de la piscina desde la lamina
M	Masa Molecular relativa
μ	Viscosidad dinámica
M	Flujo en unidades de masa
$v\alpha$	Velocidad del aire
N	Número de días al mes
N	Número de bañistas
nmax	Numero máximo de bañistas
N_c	Numero de colectores
P_a	Presión parcial de vapor del agua en el aire con la temperatura del aire sobre la piscina
P_{sp}	Presión parcial del vapor del agua en el aire saturado con la temperatura de la piscina
Q	Energía entrante por radiación solar
Q'	Energía saliente
Q_a	Calor que se transfiere a los tubos a través de las aletas.
Q_b	Calor entrante por bombeo para la renovación del agua
Q_c	Calor saliente por conducción y convección superficiales
Q_{col}	Calor entrante por climatización solar
Q_d	Calor saliente por desagüé

Q_{ev}	Calor saliente por evaporación
Q_i	Calor saliente por ingreso fresco
Q_k	Calor saliente por conducción a través a de la paredes y el fondo
Q_{re}	Calor entrante por radiación recibida del cielo y del sol
Q_{rs}	Calor saliente por radiación emitida
Q_t	Calor que se transfiere al fluido por los tubos.
Q_u	Calor útil que se transfiere al fluido.
Q	Flujo de transmisión de calor
R	Constante de la ley de los gases
ρ	Densidad
σ	Constante de stefan boltzmann
S_r	Superficie del cuerpo de las personas mojadas
S_s	Superficie del suelo alrededor de la piscina
T	Temperatura
T	Tiempo
T_a	Temperatura ambiente
T_{ciel}	Temperatura ficticia que resume la del cielo sin Sol y la de la atmósfera terrestre
T_p	Temperatura de la piscina

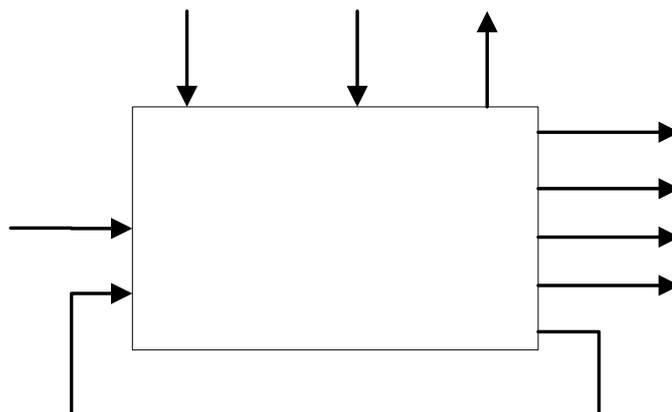
7 DISEÑO CONCEPTUAL

El presente documento es el diseño conceptual de un sistema de calentamiento solar para climatizar el agua de la piscina de la universidad EAFIT, donde se justifica la escogencia de la alternativa tecnológica que se utilizará en el diseño y se realiza una descripción del proceso. Además se escogerán los equipos requeridos en el proceso. Por último se definen las condiciones de operación y se realizan los balances de materia y energía para establecer los requerimientos energéticos. Con los resultados obtenidos se propone un PFD para la climatización de la piscina.

7.1 DIAGRAMA GENERAL DE ENTRADAS Y SALIDAS

Con el fin de tener una visión general, se elabora un diagrama general de entradas y salidas, tal como se muestra a continuación.

Figura 12. Diagrama general de entradas y salidas



Q: energía entrante por radiación solar

Q': energía saliente por radiación, convección, conducción

mw: Evaporación del agua de la piscina desde la lamina

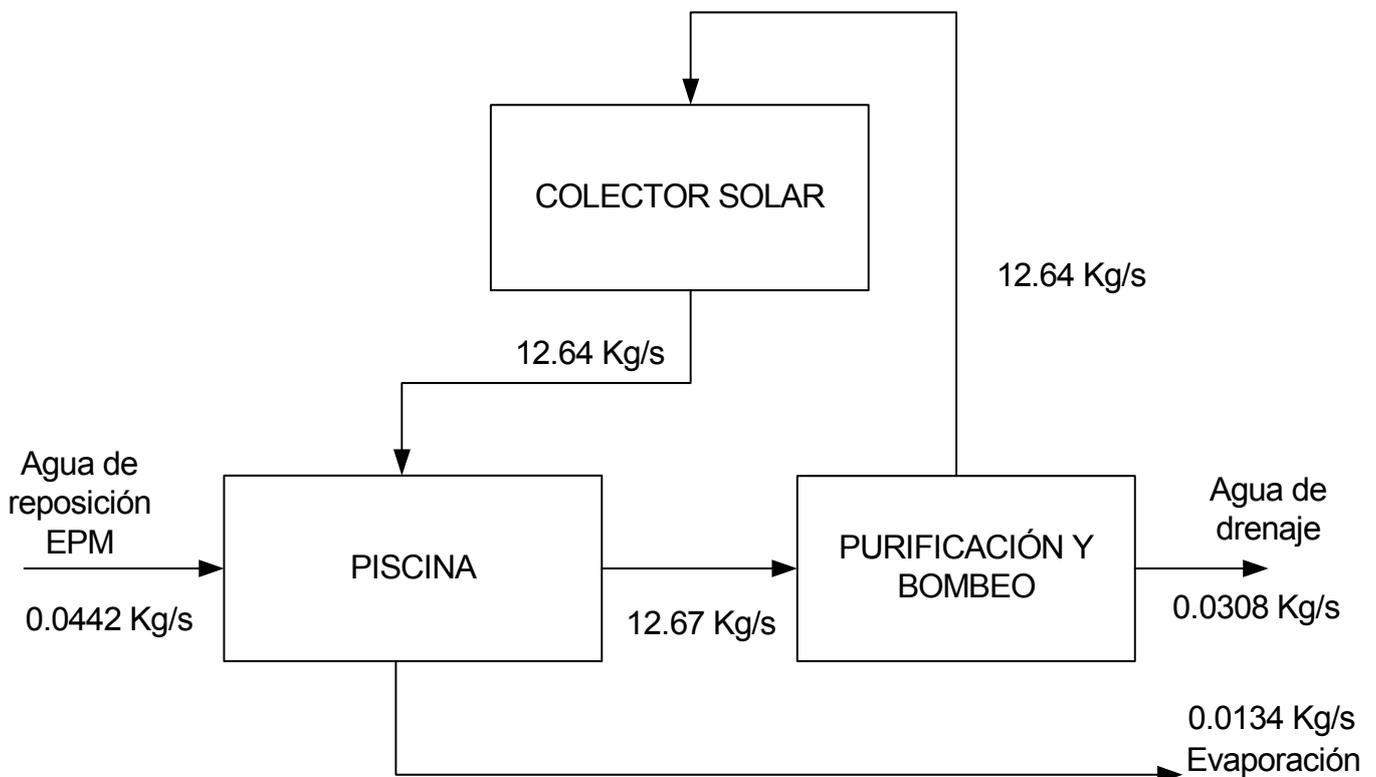
ms: Evaporación del agua desde el suelo mojado alrededor de la piscina

mp: Evaporación del agua desde el cuerpo de las personas recién salidas del agua

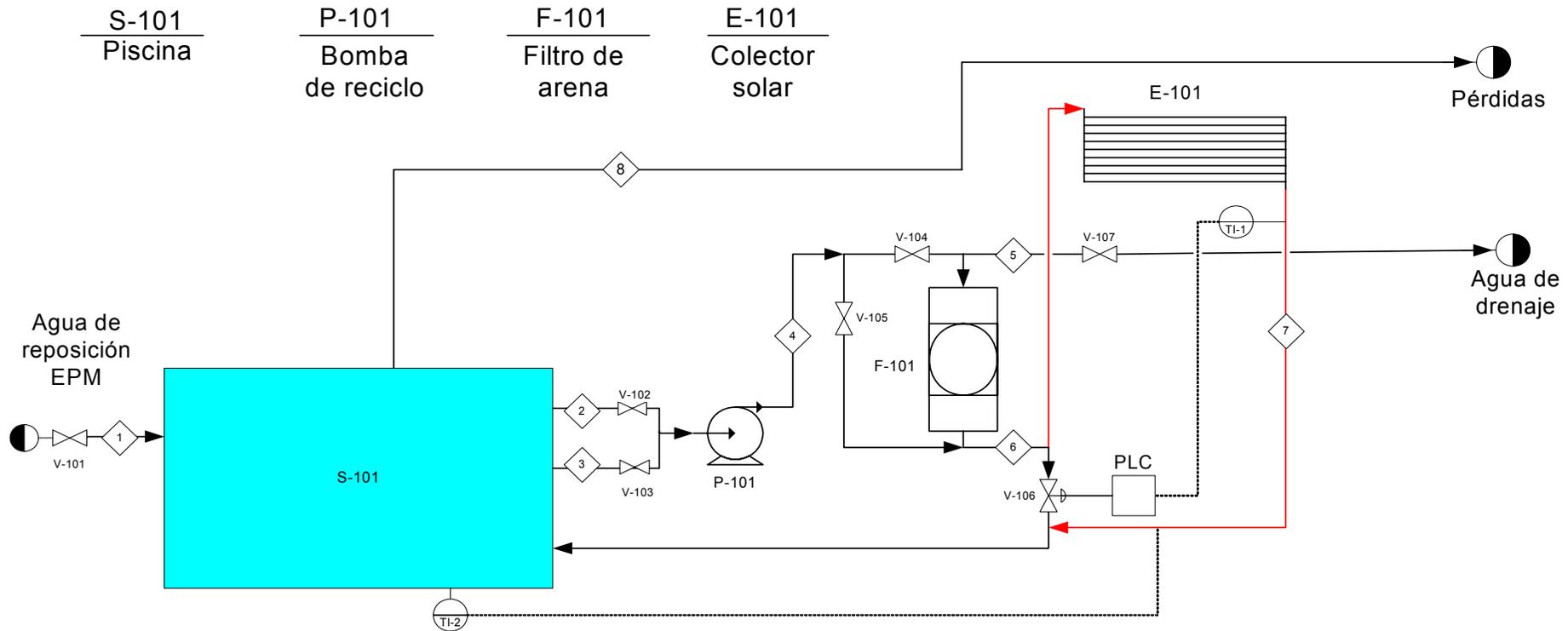
7.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DE PROCESO BFD

En este diagrama se muestra las operaciones unitarias requeridas en cada una de las etapas del proceso, lo cual ayuda a comprender la secuencia de éstas para la climatización de la piscina.

Figura 13. Diagrama de bloques de proceso.



7.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PFD



Numero Corriente	Temperatura (°C)	Presion (KPa)	Flujo (m ³ /hr)
1	22.5	101.3	0.16
2	24	-15.52	45.42
3	24	0	0
4	24	215.7	45.42
5	24	158.7	1.11
6	24	125.2	44.31
7	26	12.22	44.31

 <p>UNIVERSIDAD EAFIT Abierta al mundo Acreditada institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional</p>	SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN POR ENERGÍA SOLAR			
	Realizado por: Ricardo Valencia Naranjo Guillermo Durango Benitez			
Aprobado por: Jaime Escobar A	TAMAÑO	Nº DE FAX	Nº DIBUJO 1	REV. 2
Proyecto de Grado	ESCALA		HOJA	

7.3.1 DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

El agua de reposición EPM es alimentada a la piscina (corriente 1) la cual fue medida a una temperatura de 22.5 °C, esta alimentación se realiza para reponer el agua que se pierde por: evaporación, suelo mojado alrededor de la piscina y del cuerpo de las personas recién salidas del agua. La piscina cuenta con 2 salidas de agua controladas por válvulas independientes (V-102 y V-103), la primera se realiza por medio de cuatro SKIMMER perimetrales (corriente 2) y la segunda es usada únicamente para conectar la aspiradora durante el mantenimiento (corriente 3), estas corrientes se hacen pasar por una bomba (P-101) en la cual se aumenta la presión hasta 215.7 KPa (corriente 4) para luego ser purificada por un filtro (F-101), antes pasando por unas válvulas que controlan el paso por este (V-104 y V-105), otra válvula (V-107) ubicada junto a la entrada del filtro (corriente 5) controla el vaciado de la piscina el cual se realiza únicamente para disminuir el nivel de agua en esta. El agua sale del filtro (corriente 6) dirigiéndose a los colectores solares (E-101) en los que se le aumenta la temperatura hasta un promedio de 26 °C (corriente 7) este flujo es regulado por una válvula de control automático binaria (V-106) que se cierra cuando la temperatura de la piscina es menor que la temperatura de los colectores o se abre cuando ocurre lo contrario. El agua sale de los colectores (corriente 7) y es retornado a la piscina por 4 entradas conectadas en serie.

7.4 SELECCIÓN DE TIPO DE EQUIPOS

A continuación se realiza la selección de los equipos requeridos con base en un análisis comparativo de las alternativas disponibles y los requerimientos del proceso.

7.4.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE COLECTOR SOLAR

La climatización de piscinas con energía solar está acompañada por una variedad de diferentes tecnologías [17], entre las cuales se evaluaron:

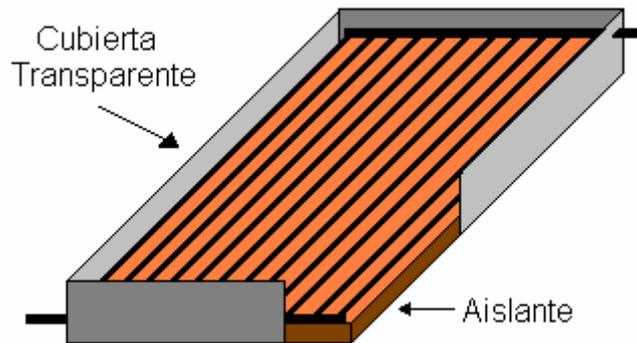
- **Colectores de placa plana no vidriados.** Son unos tubos tipo parrilla de metal o de plástico dispuestos en paralelo. No tienen caja ni cubierta de cristal. Por esta razón, el aumento de temperatura es bajo (en torno a los 30° C). Las pérdidas de calor son altas, lo que limita su aplicación, aunque su rendimiento es excelente durante los meses de verano. [18] Ver figura 15.

Figura 14. Colector solar de placa plana no vidriado.



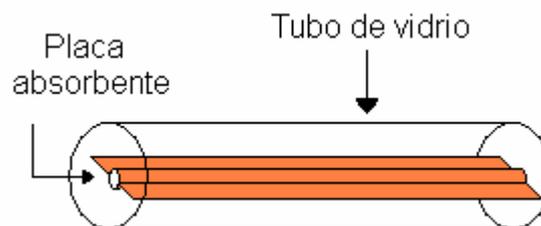
- **Colectores de placa plana vidriados.** Son unos tubos tipo parrilla de metal o de plástico dispuestos en paralelo, ubicados dentro de una caja con cubierta transparente, para disminuir pérdidas de calor y crear efecto invernadero. [6] Ver figura 16

Figura 15. Colector solar de placa plana vidriado.



- **Colectores de tubo evacuado.** Son tubos aletados que se introducen en un tubo de vidrio de alta calidad óptica y se extrae una gran parte del aire que rodea, haciendo un vacío cercano a los 10^{-4} mmHg. [2]. Ver figura 17

Figura 16. Colector solar de tubo evacuado.



La evaluación de los anteriores colectores se realizó con base en el siguiente procedimiento:

- Seleccionar las propiedades más significativas para la operación adecuada de los colectores solares.
- Asignar un factor de prioridad a cada propiedad, según la importancia en el funcionamiento de los colectores solares.
- Asignar una calificación evaluatoria a cada propiedad del material.

- Multiplicar el factor de prioridad por la calificación evaluatoria, para obtener la calificación total.
- Promediar la calificación total de las propiedades, para obtener un valor de puntuación del material.
- Seleccionar el material con mayor valor de puntuación.

Los factores de prioridad y la calificación evaluatoria se fijaron con base en la investigación, análisis y discusión de los ingenieros integrantes del proyecto

A continuación se muestran los resultados de la evaluación:

Tabla 12. Evaluación del colector de placa plana no vidriado

Parámetros de selección	Placa plana no vidriado	Factor de prioridad	Calificación evaluatoria	Clasificación total
Costo	Bajo	10	10	100
Intervalo de temperatura (°C)	20 a 40	7	7	49
Eficiencia de conversión	0.82 a 0.97	9	10	90
Factor de pérdidas térmicas (W/m ²)	10 a 30	8	6	48
Puntuación				71.75

Tabla 13. Evaluación del colector de placa plana vidriado

Parámetros de selección	Placa plana vidriada	Factor de prioridad	Calificación evaluatoria	Clasificación total
Costo	Medio	10	8	80
Intervalo de temperatura (°C)	20 a 90	7	8.5	59.5
Eficiencia de conversión	0.66 a 0.83	9	8	72
Factor de pérdidas térmicas (W/m ²)	2.9 a 5.3	8	7	56
Puntuación				66.875

Tabla 14. Evaluación del colector de tubos evacuados

Parámetros de selección	Colector de tubos evacuados	Factor de prioridad	Calificación evaluatoria	Clasificación total
Costo	Alto	10	5	50
Intervalo de temperatura (°C)	50 a 120	7	9	63
Eficiencia de conversión	0.62 a 0.84	9	8	72
Factor de pérdidas térmicas (W/m ²)	0.7 a 2	8	10	80
Puntuación				66.25

De acuerdo a los resultados obtenidos, el tipo de colectores mas adecuado para usar en el diseño de un sistema de climatización por energía solar para climatizar la piscina de la universidad EAFIT, son los colectores de placa plana no vidriados. Ya que tienen el menor costo, funcionan en un intervalo de temperaturas adecuado y presentan buenas eficiencias para las condiciones climáticas que brinda el clima de Medellín.

7.4.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE BOMBA

En el proceso de climatización de la piscina existe un requerimiento de incremento de presión, con el objeto de recircular el agua a través de los sistemas de purificación y calefacción. La bomba seleccionada para este proceso es la **Bomba Centrífuga**, Este tipo de bombas emplean impellers para mover el fluido, tienen una sola entrada y una sola salida y pueden tener más de una etapa. Estos sistemas presurizan un líquido aumentando su energía cinética y luego convirtiéndola en presión. La selección de este tipo de bomba se realizó debido a que en el sistema: no se requieren altas presiones, no hay vapor, el fluido empleado no es viscoso y se necesita un flujo uniforme. Características que se satisfacen en su totalidad con este tipo de bombas.

7.4.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE VALVULAS (MANUALES)

En el proceso de climatización de la piscina es necesario tener válvulas para el control de flujo y para el control automático de procesos. El control de flujo en las corrientes 1, 2, 3, 4, y 5 es para impedir el paso del fluido y desviar el flujo en otra dirección, por esta razón hay válvulas de compuerta ya que en estas el diámetro de la abertura a través de la cual pasa el fluido es prácticamente el mismo que el de la tubería, y no varía la dirección del flujo. Por consiguiente, una válvula de compuerta abierta introduce solamente una pequeña caída de presión. Para equilibrar el sistema y para controlar el sistema hidráulico hacia los colectores solares es necesario instalar cuatro válvulas de compuerta y dos de globo a la entrada y salida de cada serie de colectores.

7.4.4 SELECCIÓN DEL TIPO DE CONTROL AUTOMÁTICO

Para controlar el flujo hacia los colectores es necesario emplear una válvula de control automático (V-106), estas válvulas constan básicamente de dos partes que son: la parte motriz o actuador y el cuerpo. Para el sistema se utilizará un actuador eléctrico.

El control automático que se empleará, será de tipo binario, debido a que la temperatura de la piscina responde muy lentamente a las condiciones que la afectan. La velocidad de compensación con dicho control dependerá del calor útil suministrado por el colector solar y la temperatura del agua entrante a la piscina también dependerá de este calor útil, así que si hay mayor calor útil, aumenta la velocidad de compensación y la temperatura de agua entrante. La válvula actuara cuando:

$$\begin{aligned} TI_1 - TI_2 > 0 & \quad ON \\ TI_1 - TI_2 \leq 0 & \quad OFF \end{aligned} \qquad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

TI₁: Temperatura promedio de los colectores solares

TI₂: Temperatura promedio del agua de la piscina

Para medir la temperatura del agua en la piscina y efectuar el control, no se puede colocar sensores donde obstaculicen a los usuarios. Como la entrada de agua caliente esta en las paredes, no es recomendable que la medición se haga en las cercanías, antes de que el movimiento del agua homogeneice la temperatura, por lo tanto se pondrá un sensor de temperatura en el camino de agua saliente (SKIMMER) para el equipo purificador. Ver ANEXO 14. CARACTERÍSTICAS DE LA VÁLVULA DE CONTROL.

7.4.5 SELECCIÓN DEL TIPO DE TUBERÍA

La tubería que se empleara para circular el fluido a través de todo el sistema será de PVC ANSI Schedule 40.

La selección del material mas adecuado para la tubería de los colectores solares se realizó con base al procedimiento aplicado en la sección 6.4.1. A continuación se presentan las tablas 17 y 18 las cuales muestran los resultados del desarrollo de este procedimiento para el polipropileno y el cobre.

Tabla 15. Parámetros de selección para colectores de Polipropileno

Parámetros de selección	POLIPROPILENO	Factor de prioridad	Calificación evaluatoria	Clasificación total
Resistencia a la tensión a T ambiente (Mpa)	31	6	8	48
T máxima de operación (°C)	90-120	7	8	56
Conductividad térmica (W/mK) mín	0.22	9	6	54
Expansión térmica (10E-6/K) máxima	100-180	8	8	64
Calor específico (J/Kg°K) máx	1700-1900	5	5	25
Dureza knoop mín (Rockwell)	R80-100	7	8	56
Precio \$/m ²	276,098	10	10	100
Puntuación				58

Tabla 16. Parámetros de selección para colectores de Cobre.

Parámetros de selección	COBRE	Factor de prioridad	Calificación evaluatoria	Clasificación total
Resistencia a la tensión a T ambiente (Mpa)	245	6	10	60
T máxima de operación (°C)	1000	7	10	70
Conductividad térmica (W/mK) mínima	401	9	10	100
Expansión térmica (10E-6/K) máxima	17	8	9	72
Calor específico (J/Kg°K) máxima	385	5	7	35
Dureza knoop mín (Rockwell)	49	7	10	70
Precio \$/m ²	288,640	10	6	60
Puntuación				65.29

De acuerdo a los resultados obtenidos el mejor material para la construcción de los colectores es el COBRE.

7.5 BALANCES DE MASA Y ENERGÍA (BME) POR EQUIPO

Para realizar los balances de materia y energía se aplicará en las diferentes unidades de proceso la siguiente ecuación:

$$G + E = S + A$$

Ecuación 28

Donde:

G: Generación

E: Entradas

S: Salidas

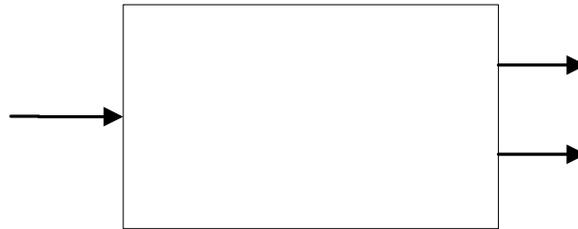
A: Acumulación

A continuación se describirán los balances de materia y energía por equipo.

7.5.1 BME EN LA PISCINA

Balance de Masa

Figura 17. Balance de masa en la piscina.



$$m_i = m_d + m_{ev} + \frac{dM_p}{dt}$$

Ecuación 29

m_p : Masa de agua en la piscina [Kg];

m_d : Es el caudal de agua saliente por drenaje [Kg/s];

m_{ev} : Es el caudal saliente por evaporación [Kg/s];

m_i : Es el caudal de agua entrante por ingreso fresco, en [Kg/s];

$M_p \approx 445000$ _Kg Este valor se obtiene con los parámetros físicos de la piscina.

Agua de reposición

EPM (mi)

El caudal entrante por ingreso fresco en un día de operación corresponde al 0.5% del volumen total de la piscina. [19]

Piscin

$V = 444.5m^3$ Volumen total de la piscina, el 0.5% corresponde a $2.223m^3$. El horario de renovación es de 14 horas

$$\text{Caudal Entrante } (m_i) = \frac{2.223m^3}{14h} = 0.159m^3/h = 159 l/h$$

$$\text{Caudal Entrante } (m_i) = 0.0442 \text{ Kg/S}$$

El caudal saliente por evaporación desde la lámina del agua, desde el suelo mojado alrededor de la piscina y desde el cuerpo de las personas recién salidas del agua, depende de:

- Temperatura ambiente
- Velocidad del aire
- Humedad relativa
- Numero de usuarios

$$\text{Caudal saliente}(m_{ev}) \approx (1,7 * 10^{-8} * (T_p - T_a)^{0,333} + 1,5 * 10^{-8} * v_a) * (P_{sp} - P_a) * A$$

Ecuación 30

[20]

T_p: Temperatura de la piscina [K]

T_a: Temperatura ambiente [K]

v_a: Velocidad del aire [m/s]

P_{sp}: Presión parcial del vapor del agua en el aire saturado con la temperatura de la piscina [N/m²]

P_a: Presión parcial de vapor del agua en el aire con la temperatura del aire sobre la piscina [N/m²]

Según [21]

$$P_a \approx \phi_{atm} * 4,969 * 10^9 * e^{-3333/(T_a-64,6)}$$

Ecuación 31

$$P_{sp} \approx 4,969 * 10^9 * e^{-3333/(T_p-64,6)}$$

Ecuación 32

ϕ_{atm} : Humedad relativa atmosférica.

$$\text{Caudal saliente}(m_{ev}) \approx 0.0134 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

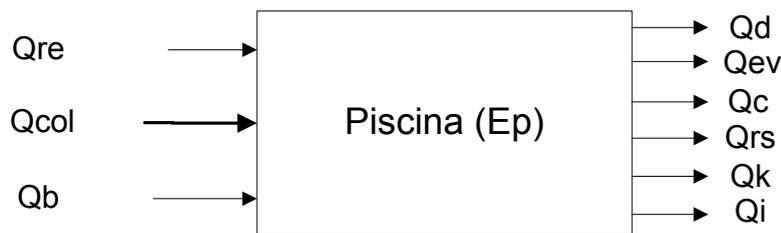
$$\text{Caudal saliente}(m_d) \approx 0.0442 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} - 0.0134 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$\text{Caudal saliente}(m_d) \approx 0.0308 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$\frac{dM_p}{dt} \approx -(0.0308 + 0.0134) + 0.0442 \text{ Kg/s} \qquad \frac{dM_p}{dt} \approx 0$$

Balance de energía

Figura 18. Balance de energía en la piscina



$$Q_{re} + Q_{col} + Q_b = Q_d + Q_{ev} + Q_c + Q_{rs} + Q_k + Q_i + \frac{dE_p}{dt} \qquad \text{Ecuación 33}$$

$$\frac{dE_p}{dt} \approx 0 \quad \text{Para que la temperatura de la piscina sea constante} \qquad \text{Ecuación 34}$$

Q_{re} : Calor entrante por radiación recibida del cielo y del sol, en [W]

Q_{col} : Calor entrante por climatización solar, en [W]

Q_b : Calor entrante por bombeo para la renovación del agua, en [W]

Q_d : Calor saliente por drenaje, en [W]

Q_{ev} : Calor saliente por evaporación, en [W]

Q_c : Calor saliente por conducción y convección superficiales, en [W]

Q_{rs} : Calor saliente por radiación emitida [W]

Q_k : Calor saliente por conducción a través a de la paredes y el fondo, en [W]

Q_i : Calor saliente por ingreso fresco, en [W]

Cálculo de pérdidas de calor en el drenaje [21]

$$Q_d = m_d * (-1,143 * 10^6 + 4,186 * 10^3 * T_p) \qquad \text{Ecuación 35}$$

$$Q_d = 0.0308 * (-1,143 * 10^6 + 4,186 * 10^3 * (26 + 273.15))$$

$$Q_d = 3.37 \text{ _ KW}$$

Cálculo de pérdidas de calor por el ingreso de agua fresca [21]

$$Q_i = q_i * (-1,143 * 10^6 + 4,186 * 10^3 * T_{atm}) \quad \text{Ecuación 36}$$

$$Q_i = 0.0442 * (-1,143 * 10^6 + 4,186 * 10^3 * (22.45 + 273.15))$$

$$Q_i = 4.18 \text{ _ KW}$$

Cálculo de pérdidas de calor por evaporación [21]

$$Q_{ev} \approx (1 + 0,7 * \frac{n}{n_{max}}) * (6,56 * 10^{-2} + 5,79 * 10^{-2} * v_a) * (P_{sp} - P_a) * A \quad \text{Ecuación 37}$$

n: número de bañistas; (5 usuarios)

n_{max}: numero máximo de bañistas (30 usuarios)

$$Q_{ev} \approx 47.813 \text{ _ KW}$$

Cálculo de pérdidas de calor por convección superficial [22]

$$Q_c \approx (3,1 + 4,1 * v_a) * (T_p - T_a) * A \quad \text{Ecuación 38}$$

$$Q_c \approx 4.88 \text{ _ KW}$$

Cálculo de pérdidas de calor por conducción a través de las paredes y el fondo de la piscina [21]

Para algunos autores Q_k solo varía entre 1% y 5%. Otros lo estiman como cero, para nuestro caso lo consideraremos como: Q_k ≈ 0

Cálculo de pérdidas de calor por radiación emitida

$$Q_{rs} \approx \varepsilon * \sigma * T_p^4 * A \quad \text{Ecuación 39}$$

$$Q_{rs} \approx 0,96 * 5,669 * 10^{-8} * T_p^4 * A$$

Donde 0,96 es el coeficiente de emisividad media del agua (ε), y $5,669 \times 10^{-8}$ es la constante de Stefan y Boltzmann (σ) en $[\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4]$.

$$Q_{rs} \approx 138.38 \text{ _KW}$$

Cálculo de ganancia de calor por radiación solar [23]

$$Q_{re} = (0,96 * 5,669 * 10^{-8} * T_{ciel}^4 + \alpha * i_s) * A \quad \text{Ecuación 40}$$

i_s es la intensidad de radiación recibida del Sol, en $[\text{W}/\text{m}^2]$;

T_{ciel} : temperatura ficticia que resume la del cielo sin Sol y la de la atmósfera terrestre, en $[\text{K}]$;

α : coeficiente de ajuste.

$$T_{ciel} \approx T_{atm} * \left(0.8 + \frac{T_{satm} - 273}{250} \right)^{1/4} \quad \text{Ecuación 41}$$

T_{satm} : temperatura de saturación del vapor de agua en la atmósfera, en $[\text{K}]$

Según [21]

$$T_{satm} \approx \frac{3333}{\frac{3333}{T_{atm} - 64,6} - \ln(\phi_{atm})} + 64,6 \quad \text{Ecuación 42}$$

$$T_{satm} \approx 288.67 \text{ K}$$

$$T_{ciel} \approx 284.88 K$$

$$Q_{re} = 161.44 \text{ _KW}$$

Cálculo de ganancia de calor en el bombeo

Según [23] Q_b no llega al 2% de los calores entrantes. Por eso y porque se compensaría con Q_k se considera: $Q_b \approx 0$

Cálculo de ganancia de calor por climatización solar

$$Q_{col} = Q_d + Q_{ev} + Q_c + Q_{rs} + Q_i - Q_{re} \quad \text{Ecuación 43}$$

$$Q_{col} = 37.183 \text{ _KW}$$

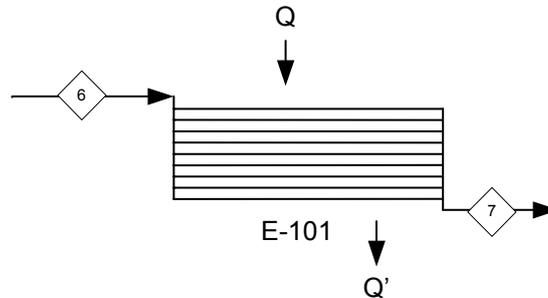
Este es el calor que deben entregar los colectores solares, el cual es necesario para suplir las pérdidas energéticas. Durante un día hay unas pérdidas de 2829.67_KW-h determinadas para el mes más desfavorable en cuanto a condiciones climáticas (octubre). Con el uso de un cobertor térmico para la superficie de la piscina durante 10 horas, las pérdidas se reducen a **843.5_KW-h**.

El cobertor térmico se utilizaría desde las 9:00 pm hasta 7:00 am que es el horario donde la piscina no tiene usuarios.

7.5.2 BME EN LOS COLECTORES SOLARES

En este numeral se presenta las ecuaciones utilizadas para el balance de materia y energía en un colector solar.

Figura 19. Diagrama esquemático de un colector solar



$$Q = Qu + Q'$$

Ecuación 44 [6]

Q: Calor entrante por radiación solar

Q': Calor saliente por conducción, convección y radiación

Qu: Calor útil que absorbe el fluido, que es igual al Q_{col} calculado en la sección 6.5.1

Consideraciones:

- Estado estacionario.
- El cambio en la energía cinética y potencial es despreciable.
- La temperatura de la placa es constante ya que se seleccionó un material de alta conductividad, por lo tanto las pérdidas por conducción son cero.

Balance de Energía

$$Q = A_c I_s \alpha_s$$

Ecuación 45 [6]

Donde:

A_c : Área efectiva total de los colectores solares

I_s : Intensidad de la radiación recibida del sol

α_s : Absortividad del absorbedor de la radiación solar

$$Q' = A_c U_c (T_c - T_a) + A_c \cdot \sigma (T_c^4 - T_a^4) \quad \text{Ecuación 46 [6]}$$

U_c : coeficiente global de transmisión de calor de las pérdidas de calor del colector

Remplazando las ecuaciones 44 y 45 en 43, se obtiene:

$$A_c = \frac{Q_u}{I_s \alpha_s - U_c (T_c - T_a) + \sigma (T_c^4 - T_a^4)}$$

$$A_c = \frac{37183}{182.9 - 4.33(300 - 295) + 5.7e - 8(300^4 - 295^4)}$$

$$A_c = 304.73 \text{ m}^2$$

Los resultados obtenidos del balance de energía se muestran a continuación en la Tabla 17

Tabla 17. Resultados del balance de energía en los colectores

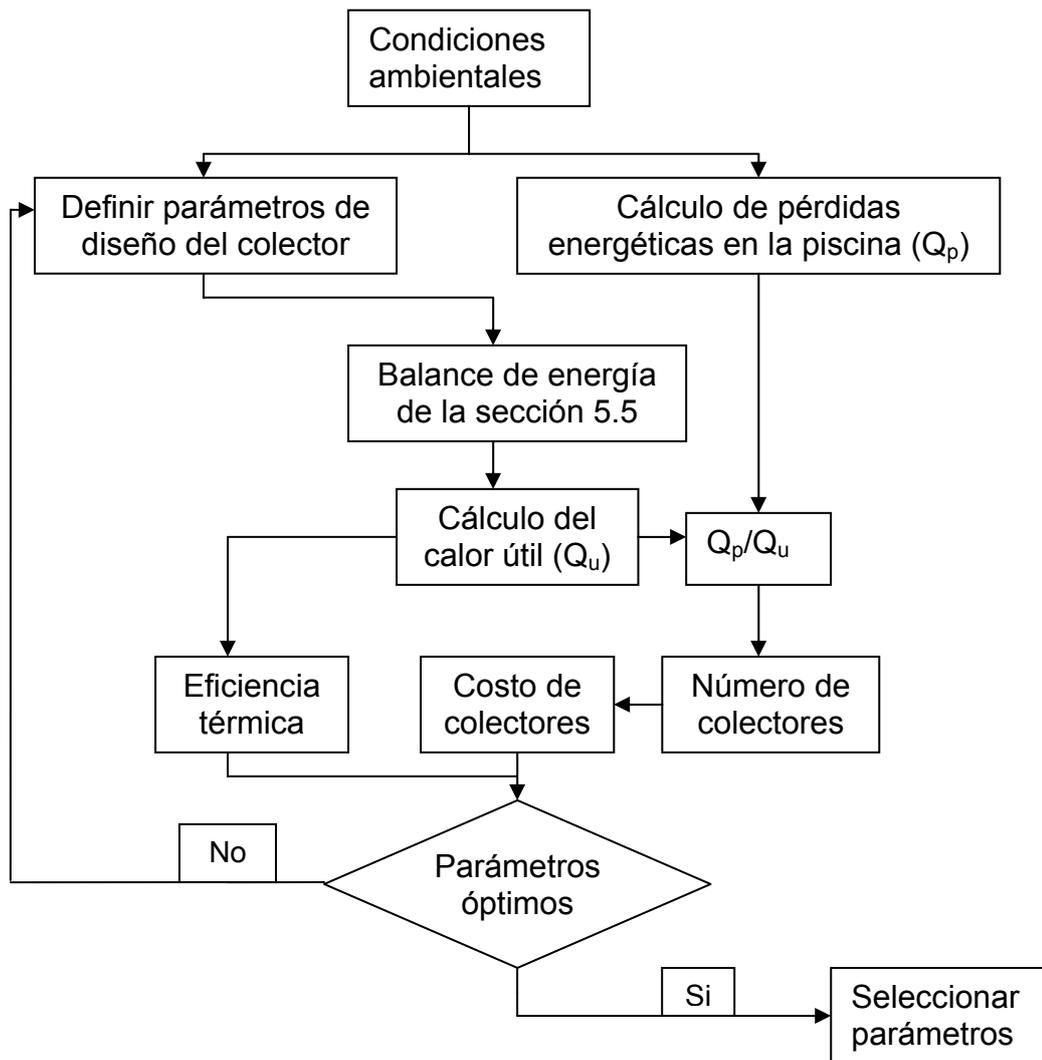
Energía	KW
Entrante por radiación solar (Q)	50.17
Saliente por pérdidas de calor (Q')	12.98
Útil (Qu)	37.18

7.5.3 DISEÑO DE LOS COLECTORES SOLARES

Para el diseño de los colectores solares se aplicó un algoritmo desarrollado en EXCEL con base en la sección 5.9 que describe el balance energético en un colector de placa plana. Este algoritmo arroja el número de colectores necesarios para satisfacer las pérdidas energéticas de la piscina (Q_{col}) a partir

de unos valores preliminares de las medidas del colector (Diámetro, Longitud de la aleta, Nro de tubos, y Distancia entre tubos).

Modelo de cálculo



El algoritmo resolvió el balance de energía para todas las posibles combinaciones entre las siguientes medidas del colector. Ver tabla 18

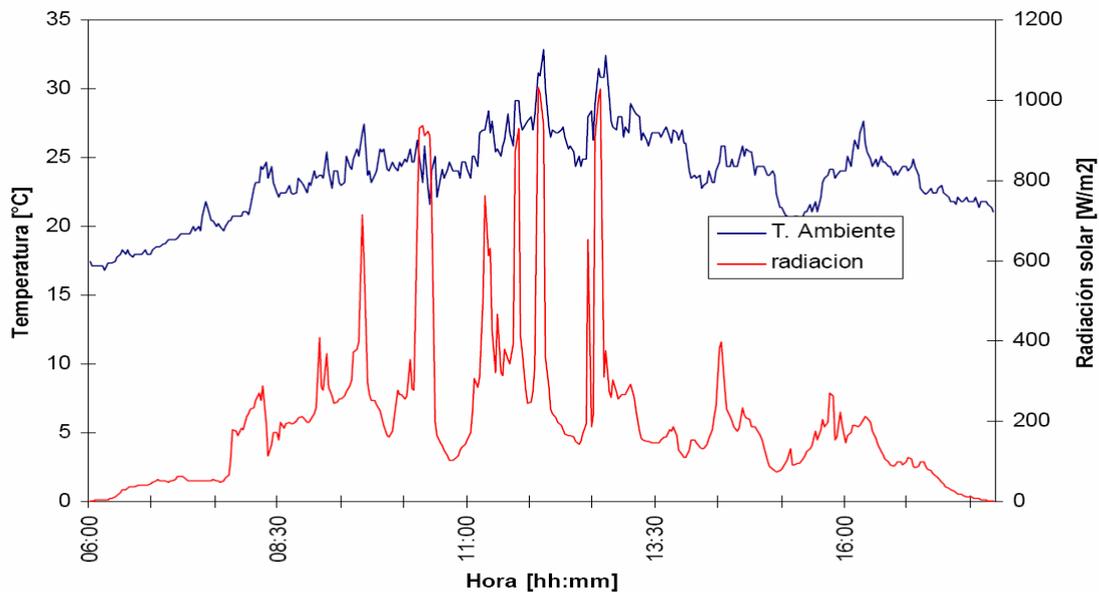
Tabla 18. Medidas evaluadas para el diseño de colectores

Medida	Valores	Unidades
ΔT	1 - 15	°C
Distancia entre tubos	6 - 19	cm
Nro de tubos	6 - 19	Und

Consideración para radiación solar en Medellín

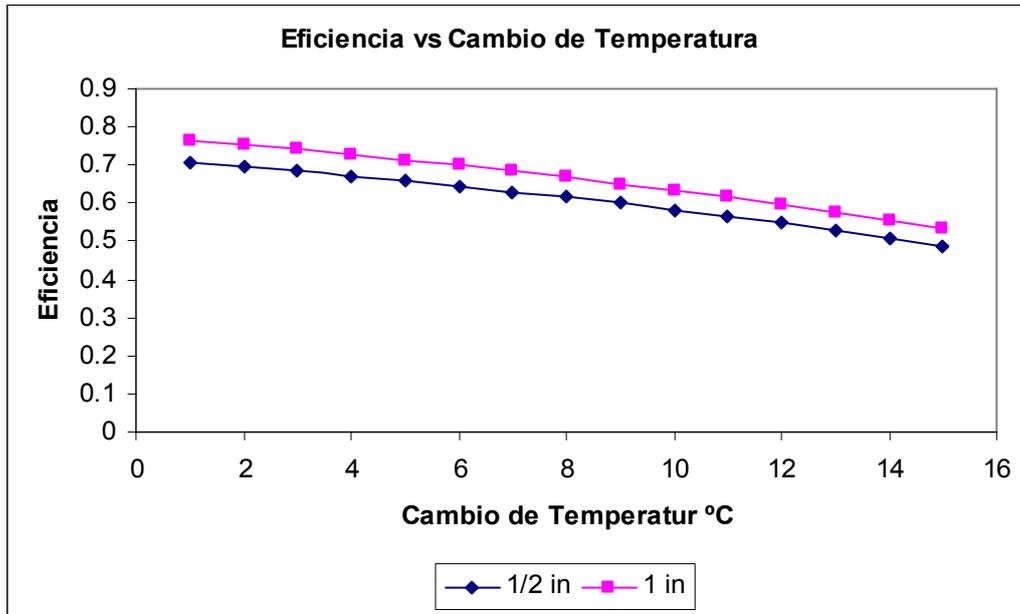
Durante un día la radiación máxima promedio ocurre entre las 8:30am y 13:30pm, por esta razón en el algoritmo se tomó una intensidad de radiación solar de 800 W/m^2 y el calor útil (Q_u) se calculó para estas 5 horas de funcionamiento con el objetivo de suplir las pérdidas energéticas que ocurren en un día de operación. La referencia [24] usa esta misma consideración. En la figura 21 se muestra la radiación solar en la ciudad de Medellín

Figura 20. Medición de la radiación solar en Medellín.[2]



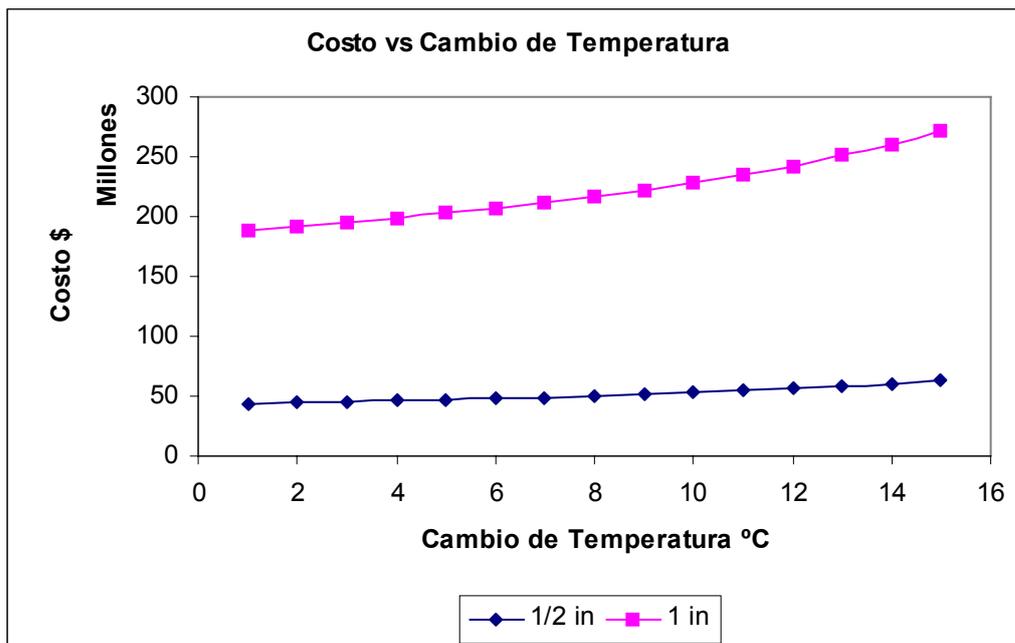
Inicialmente se analizó la diferencia entre la temperatura de entrada y salida del fluido en un colector solar, con el fin de seleccionar el flujo mas adecuado para la operación del sistema.

Figura 21. Efecto del ΔT en la eficiencia para tubos con ϕ de $\frac{1}{2}$ y 1 Pulg



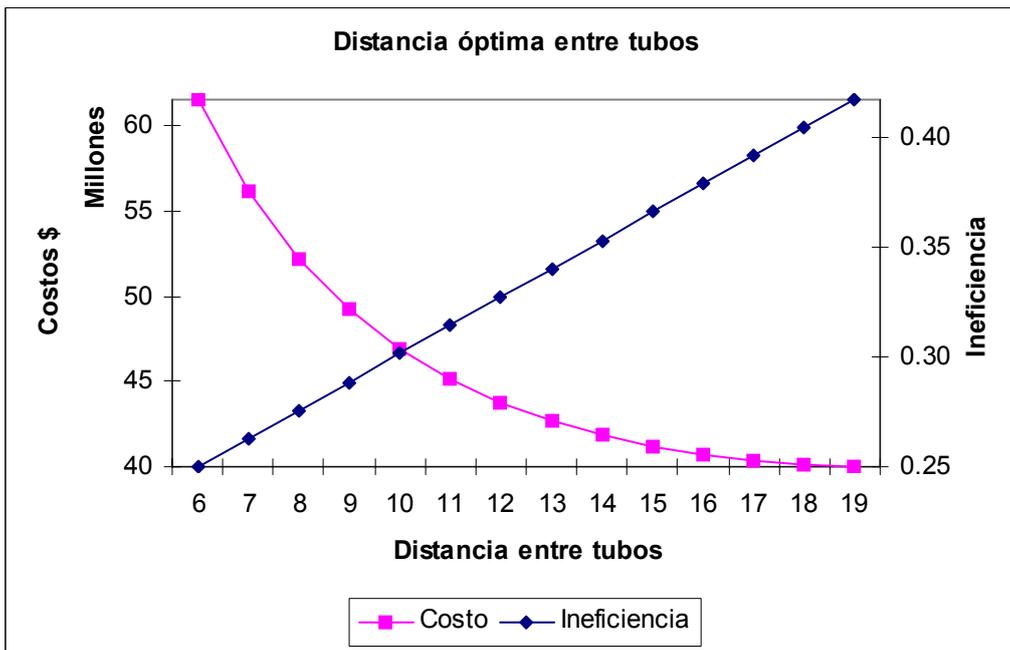
El costo se calculó para el total de colectores necesarios para una instalación con dichas condiciones.

Figura 22. Efecto del ΔT en el costo total para tubos con ϕ de $\frac{1}{2}$ y 1 Pulg



- Con base en las anteriores gráficas de tendencia se concluye que una menor diferencia entre la temperatura de entrada y salida del fluido se presenta mayores eficiencias y menores costos. Pero se debe tener en cuenta que para menores cambios de temperatura se requieren mayores flujos, lo que aumenta la caída de presión en el sistema y por lo tanto los requerimientos de potencia de la bomba son mas altos, razón por la cual el ΔT seleccionado para los colectores es de 2 °C.
- Los tubos con diámetro de 1 pulg. Se descartan de los siguientes análisis debido a que presentan costos altos comparados con los de ½ pulg.
- Luego se analizó la distancia en cm que deben estar separados los tubos del colector para obtener un mejor funcionamiento del mismo, a menores costos. A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante un gráfico de costo-eficiencia, en el que para efectos de cruce se graficó la ineficiencia (1-eficiencia).

Figura 23. Efecto de la distancia entre tubos en el costo y la eficiencia.



- De la anterior gráfica, se concluye que la distancia óptima entre los tubos es de 10 cm, en donde se presenta la mejor relación de costo-eficiencia.

Por ultimo se analizó el número de tubos por colector, mas adecuado para el diseño del sistema. A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Figura 24. Efecto del número de Tubos en el costo total

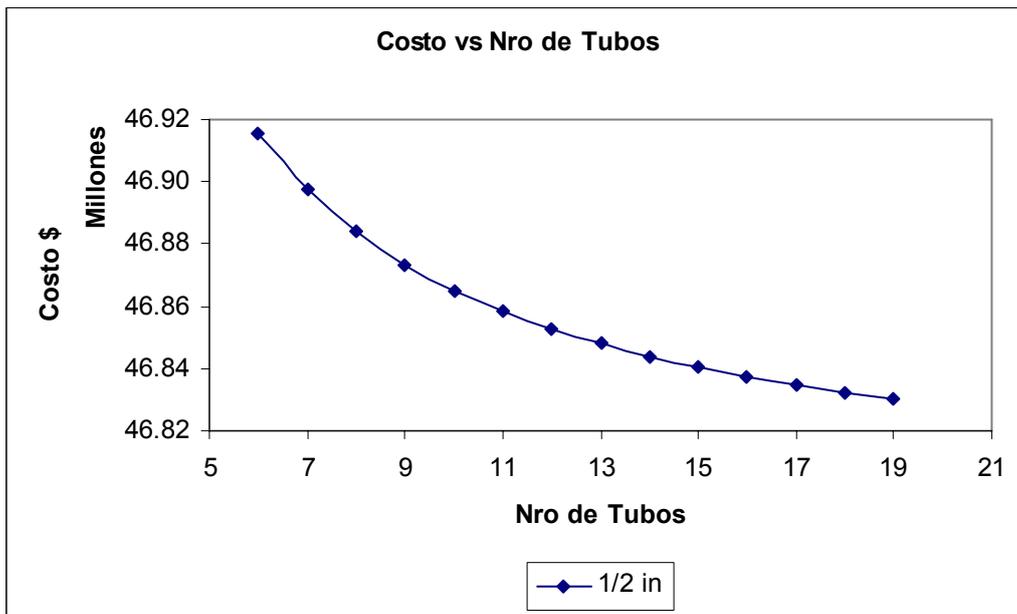
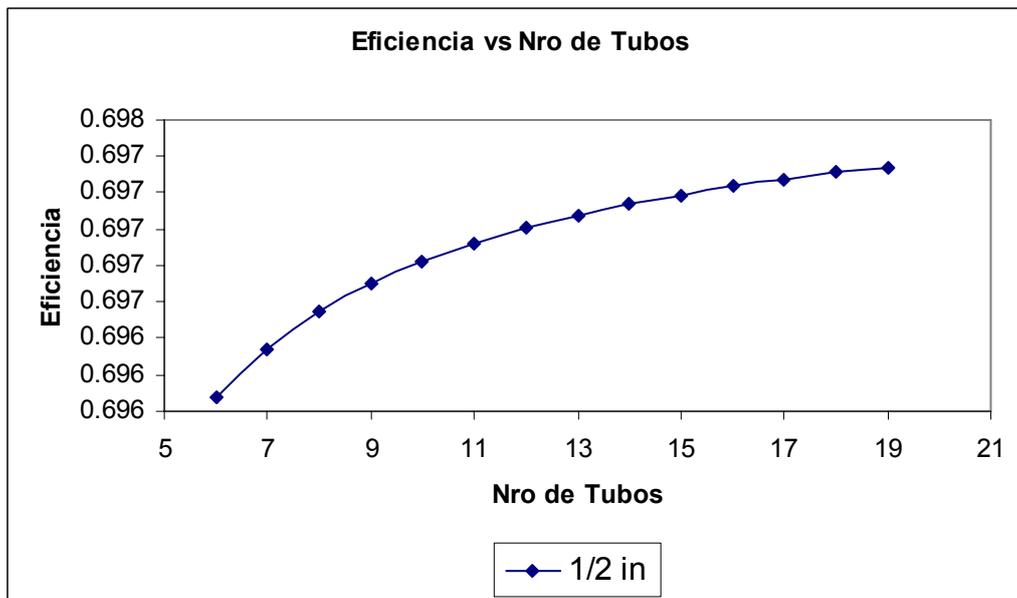


Figura 25. Efecto del número de Tubos en la Eficiencia.

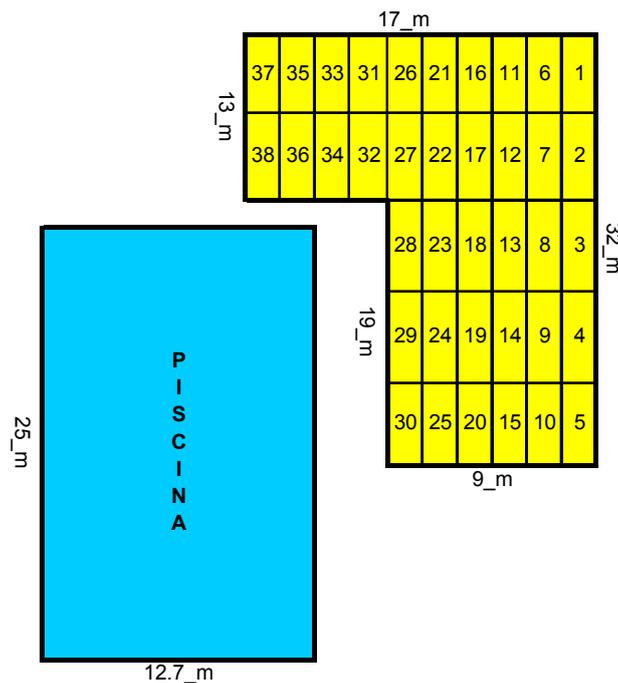


- De las anteriores gráficas, se concluye que a mayor número de tubos por colector, menores costos y mayores eficiencias. Como la variación en el costo y la eficiencia no es significativa, \$82500 y 0.1% respectivamente se analizaron además otros parámetros que restringen el número de tubos en un colector solar, como:

- Dificultad de construcción e instalación de los colectores.
- Espacio disponible para la ubicación de los colectores.

Los colectores no pueden ser muy anchos ya que presentarían dificultades de transporte en la instalación, otra consideración importante en el diseño de colectores solares, es el ancho disponible para la ubicación de los mismos. El ancho máximo disponible en la zona de los camerinos es de 9 m, y el número de tubos que separados una distancia de 10 cm aprovecha mejor el espacio es 13. El ancho de cada colector será entonces de 1.3 m, logrando ubicar 6 colectores en 9 m separados a una distancia de 20 cm.

Figura 26. Esquema preliminar de la ubicación de los colectores.



Finalmente el colector se diseñó con las siguientes especificaciones:

Tabla 19 Medidas del Colector.

Diámetro de los tubos (pulg)	1/2
------------------------------	-----

Longitud de los tubos (m)	6
Numero de tubos	13
Espesor de la placa (mm)	1
Distancia entre tubos (cm)	10

Y presento los siguientes resultados:

Tabla 20 Resultados del colector.

Eficiencia (%)	72
ΔT (°C)	2
Flujo (m ³ /hr)	1.8
Área (m ²) por colector	7.8
Numero de colectores	38
Calor útil (KW)	22

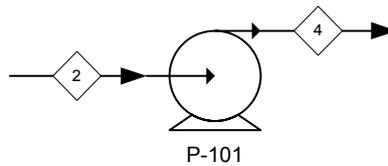
Tras la evaluación del área disponible sobre el techo de los camerinos para la ubicación de los colectores solares, se encontró que esta es menor que la necesaria para ubicar los colectores solares, por lo tanto se debe aumentar la extensión de la superficie del techo, (Ver ANEXO 3. Layout de la extensión de la superficie del techo de los camerinos y ANEXO 4 Plano arquitectónico de la distribución de los colectores).

7.5.4 BME PARA LA BOMBA

El modelo utilizado para realizar los balances de materia y energía se presenta a continuación:

P-101, Bomba en la cual se aumenta la presión del agua para circular el fluido por el filtro y los colectores solares.

Figura 27. Diagrama esquemático de la Bomba



Como el espacio disponible para realizar la extensión de la superficie del techo no permite distribuir los colectores de una manera homogénea, se utilizaron los simuladores de análisis de redes hidráulicas: PIPE-FLO y PIPE-FLOW los cuales aplican las ecuaciones de Darcy-Weisbach, Kirchoff y permiten simular redes para mejorar aspectos en el diseño.

Diseño de la red hidráulica

Mediante la red hidráulica se consigue transportar la energía de los colectores solares a la piscina. Fue necesario dimensionar esta red de tubería para que por ella pueda circular un caudal $68.14 \text{ m}^3/\text{h}$, con una pérdida de carga que no sobrepase los límites reglamentarios (Menor que 120Psi), y una velocidad máxima de 5 m/s

Limites de la velocidad del agua en la tubería.

El ruido, la erosión, los costos de instalación y mantenimiento limitan la velocidad máxima y mínima de la red de tuberías. Si las medidas de las tuberías son demasiado pequeñas, los niveles de ruido, erosión y los costos de bombeo son desfavorables. Si las tuberías son demasiado grandes, el costo de instalación es excesivo. Por consiguiente, las medidas de las tuberías se eligen para minimizar el costo inicial de la instalación evitando los indeseables efectos del exceso de velocidad.

Una velocidad de flujo razonable para sistemas de distribución de fluido es de aproximadamente 3 m/s (alrededor de 10 ft/s). Un desempeño apropiado de una bomba requiere velocidades mas bajas en su entrada, aproximadamente 1 m/s (alrededor de 3 ft/s)

Equilibrado de circuitos

En la instalación, hay que conseguir que todos los circuitos que contienen los colectores solares tengan la misma pérdida de carga, ya que si no se equilibran, los caudales no serán homogéneos para cada colector solar, circulando más agua por los circuitos con menor ΔP , y en los que se tenga más ΔP , circulará menos de la deseada. Para equilibrar la instalación, lo que se realizó fue aumentar la pérdida de carga de los circuitos con menor pérdida, reduciendo el diámetro de las tuberías y/o adicionando válvulas de equilibrado. Estas válvulas también permiten mayor variabilidad en caso de alguna obstrucción o fallas en la operación del sistema.

En el ANEXO 4. PLANO ARQUITECTÓNICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS COLECTORES, se puede observar la ubicación de los colectores en el sistema.

La metodología empleada y los resultados se muestran en el ANEXO 10. METODOLOGÍA Y RESULTADOS DEL DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA RED HIDRÁULICA

La simulación arrojó los siguientes resultados para la bomba requerida en el sistema:

Tabla 21. Parámetros para la selección de la bomba

Parámetro	Valor	Unidades	Valor	Unidades
ΔP	472.1	Kpa	68.49	Psi
H_B	48.23	m	158.19	ft
NPSHa	6.518	m	21.38	ft
Flujo	68.14	m ³ /hr	300	gpm

En el ANEXO 11. PLANO DE TUBERÍAS DE LA SECCIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES, se puede observar los diámetros y válvulas requeridas para garantizar flujos homogéneos en la sección de los colectores.

7.5.5 SELECCIÓN DE LA BOMBA.

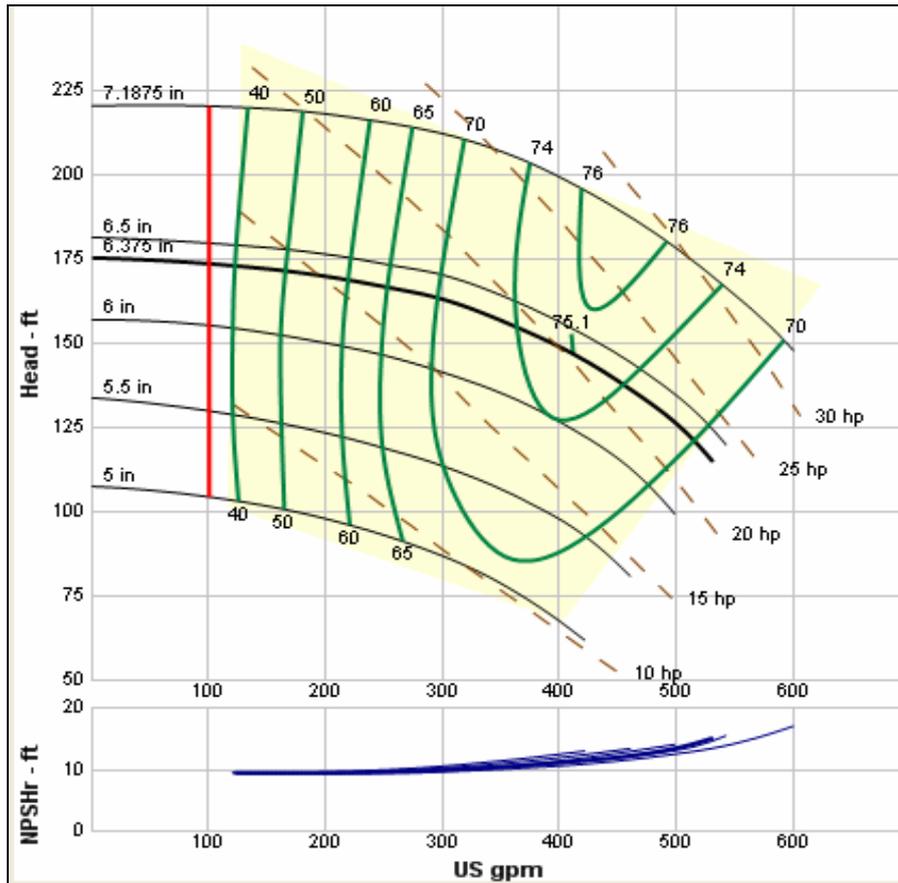
En la tabla 22 se muestran las características principales para la selección de la bomba.

Tabla 22. Características generales para la selección de la bomba

Tipo de Bomba	centrífuga
Características del Líquido	
Temperatura (°C)	26
Peso específico (Kg/m ³)	997.1
Viscosidad (cP)	0,894
Electricidad	
Voltaje (V)	110/220
Frecuencia (Hz)	60

Con ayuda del simulador PUMP-FLO se seleccionó la curva de la siguiente bomba: ver Figura 29

Figura 28. Curva de la bomba ANSI 3x4-7 3600



El material de construcción de la bomba es hierro fundido, este es el más conveniente, económico y versátil utilizado para el bombeo de agua dulce [25] En la tabla 23 se muestran las características de la bomba necesaria para el sistema.

Tabla 23. Especificaciones de la Bomba seleccionada

P-101 (ANSI 3x4-7 3600)	
Caudal (m ³ /h)	68.14
Rpm	3550
Potencia requerida (KW)	23
Potencia de freno (KW)	33
NPSHr (m)	3.03
Eficiencia (%)	70.3
H _B (m)	50
Diámetro (mm)	161.25

7.6 DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

El flujo másico que circula a través de los colectores presenta las siguientes variaciones en cuanto a su magnitud. Si es muy grande; se aumentara la caída de presión en el sistema y los requerimientos de potencia para la bomba serán mayores pero el número de colectores requeridos será menor debido a que la eficiencia por colector aumenta. Si es muy bajo se logrará un mayor incremento en su temperatura, pero a su vez aumentaran las pérdidas energéticas durante el recorrido por el sistema hidráulico y el número de colectores requeridos, además como el volumen de la piscina es grande, un flujo pequeño no logrará modificar las condiciones energéticas de la piscina. Al variar el flujo se puede observar incrementos o disminución en los costos de operación debidos a los requerimientos de potencia y los costos de instalación debidos al número de colectores requeridos.

La función objetivo se determina según presenta la referencia [26]. Se realizó una optimización paramétrica en los colectores solares, considerando el flujo másico como la variable de decisión. La función se construye con base al cálculo del NPV.

$$OBJ = FCI_{TM} + COM_d(P / A, i, n)(PF, i, n_{startup})$$

Donde;

FCI_{TM} son las inversiones de capital sobre el módulo del costo total.

COM_d , son los costos de operación sin depreciación, que se expresan como:

$$COM_d = 0.180FCI + 2.73C_{OL} + 1.23(C_{UT} + C_{WT} + C_{RM})$$

Donde:

C_{OL} : Costos de la mano de obra.

C_{UT} : Costos de Utilities.

C_{WT} : Costo de tratamiento del agua.

C_{RM} : Costos de materia prima.

Los costos de mano de obra, tratamiento de agua y materia prima no son relevantes para la optimización, puesto que permanecen constantes con el flujo másico, por lo tanto, la función objetivo queda en términos de FCI y de C_{UT} :

$$OBJ = FCI_{TM} + (0.18FCI_{TM} + 1.23C_{UT})(P/A, i, n)(P/F, i, n_{startup})$$

Para analizar los costos de capital y distribuirlos con los costos operacionales, se establece una vida útil del sistema de 10 años después del start-up, un mes de start-up y una tasa interna de retorno del 10%, la ecuación anterior se reduce a:

$$OBJ = FCI_{TM} + (0.18FCI_{TM} + 1.23C_{UT})(6.145)(0.909)$$

Realizando las operaciones necesarias, se llega a que la función objetivo es:

$$OBJ = 2.005FCI_{TM} + 6.871C_{UT}$$

7.7 ANÁLISIS TOPOLÓGICO Y PARAMÉTRICO DEL PFD

En la evaluación y optimización de un proceso es necesario realizar, inicialmente el análisis topológico con el fin de determinar la mejor configuración de los equipos del proceso y luego llevar a cabo el análisis paramétrico para modificar variables que hacen parte de cada unidad y mejorar su desempeño.

7.7.1 REVISIÓN TOPOLÓGICA

Cuando se está evaluando la topología de un proceso, resultan muy útiles las siguientes preguntas, que se deben responder en el mismo orden en que son planteadas, estas preguntas fueron adaptadas del TURTON para este caso [26]:

- ¿Se puede eliminar equipos o rearrreglarlos?
- ¿Se puede utilizar otras configuraciones de los colectores solares?
- ¿Como se puede disminuir las perdidas de calor?

A continuación se presenta el análisis realizado para cada uno de estos cuestionamientos, aplicados al proceso de climatización de la piscina de la universidad EAFIT.

1. Eliminación y rearrreglo de equipos

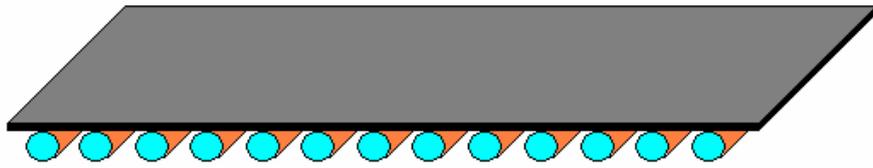
Se evaluó la inclinación óptima a la que se deberían ubicar los colectores solares para absorber la mayor cantidad de radiación, con el fin de mejorar la eficiencia del sistema, la cual según la literatura es igual a la latitud ($6^{\circ}11'$). Pero como estudios recientes han demostrado que no tener un colector inclinado al ángulo óptimo no reducirá significativamente el funcionamiento de los colectores [27], se toma la decisión de no inclinarlos ya que esto incrementaría los costos de instalación y no se obtendría un resultado significativo.

2. Configuración de los colectores solares.

En un colector solar de placa plana el área de transferencia de calor es igual al área necesaria para la ubicación de los colectores, lo que crea una limitación en aquellos lugares en los que no se cuenta con suficiente espacio, con el fin de analizar la posibilidad de utilizar un menor espacio, a continuación se evaluó la siguiente configuración de colector:

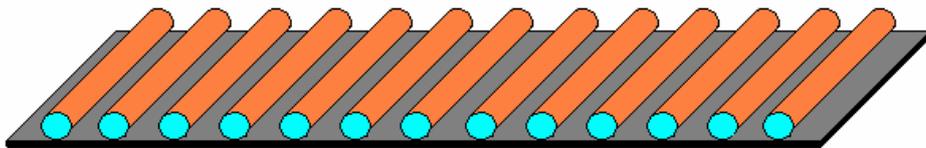
Los cálculos y balances de materia y energía, fueron realizados para colectores con la siguiente configuración:

Figura 29. Configuración de tubos abajo en un colector.



El área efectiva de un colector con la configuración anterior, es igual al área de la placa plana absorbente de la parte superior (7.8 m^2). Con el fin de tener una mayor área efectiva en un menor espacio, se consideró configurar los colectores de la siguiente manera:

Figura 30. Configuración de tubos arriba en un colector.



Donde el área efectiva en un colector con la anterior configuración, es mayor debido a la curvatura de los tubos de cobre. Tomando la mitad de la circunferencia más el espacio entre tubos, como área de incidencia se obtiene un valor de área efectiva por colector de 10.45 m^2 . A continuación se presentan los resultados obtenidos para un sistema con esta configuración de colectores:

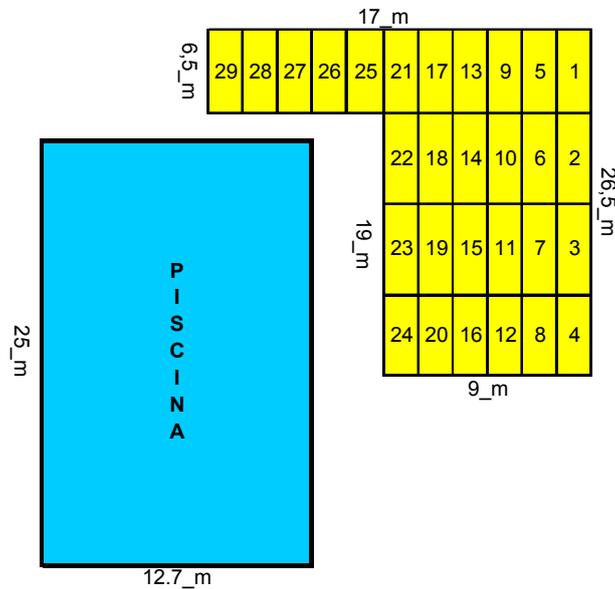
Tabla 24. Resultados colector optimizado.

Eficiencia (%)	71
ΔT (°C)	2
Flujo (m^3/hr)	1.8
Área por colector(m^2)	10,5
Numero de colectores	29
Calor útil (KW)	30

En el ANEXO 1. HOJA TÉCNICA DEL COLECTOR, se puede observar en detalle las especificaciones del colector solar.

Debido a que se requieren menor cantidad de colectores por el aumento en el área efectiva de cada colector, los colectores podrán distribuirse en un menor espacio. A continuación se muestra un esquema (Figura 32) de la distribución de estos.

Figura 31. Esquema optimizado de la ubicación de los colectores.



(Ver ANEXO 5. Layout optimizado de la extensión de la superficie del techo de los camerinos y ANEXO 6 Plano arquitectónico optimizado de la distribución de los colectores).

Según la simulación realizada en PIPE-FLO para este diseño optimizado con 29 colectores, la bomba requerida se describe a continuación en la tabla 25

Tabla 25. Especificaciones de la bomba para el sistema optimizado con revisión topológica

P-101 (ANSI 2X3-6 3600)	
Caudal (m ³ /hr)	51.35
Rpm	3500
Potencia requerida (KW)	9
Potencia de freno (KW)	13
NPSHr (m)	3.32
Eficiencia (%)	74.9
H _B (m)	27.56
Diámetro (mm)	127

3. Como se puede disminuir las pérdidas de calor.

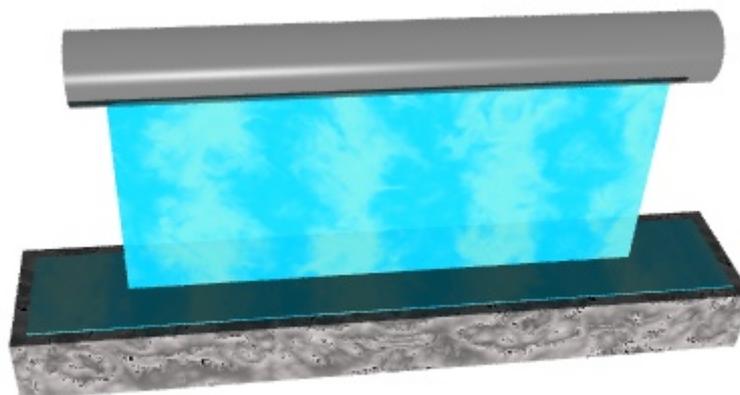
En la climatización de piscinas con energía solar, ocurren pérdidas de calor por, convección, conducción, radiación, y evaporación. De estas pérdidas energéticas las más relevantes son aquellas que están relacionadas directamente con la velocidad del viento. Para disminuir la velocidad del viento es necesario ubicar objetos que interrumpan su flujo natural, para este caso se utilizaran árboles, plantas y rejas teniendo en cuenta, que la ubicación de estos objetos no genere interferencia con la radiación solar (sombra) dirigida a los colectores.

Se utilizara una manta térmica, la cual es otra importante aplicación en la disminución de perdidas de calor por radiación, convección y evaporación en horarios de no funcionamiento (noche).

Otra posible mejora que se propone es una cortina de agua con el fin de cortar la velocidad del viento y además aumentar la humedad relativa en este, disminuyendo así la transferencia de masa con la superficie de la piscina y por lo tanto las perdidas energéticas por convección y evaporación. En el ANEXO 5. LAYOUT OPTIMIZADO DE LA EXTENSIÓN DEL TECHO DE LOS CAMERINOS, se puede observar la ubicación de esta alternativa.

La cortina de agua (Ver figura 33) seria un sistema independiente que básicamente circula agua desde un estanque hacia un tubo perforado ubicado encima de este, generando la precipitación del agua de forma similar a una regadera. Esta alternativa únicamente es mostrada como posible mejora, los cálculos y el análisis de factibilidad financiera se proponen como recomendación para la continuidad del proyecto.

Figura 32. Cortina de agua



7.7.2 REVISIÓN PARAMÉTRICA

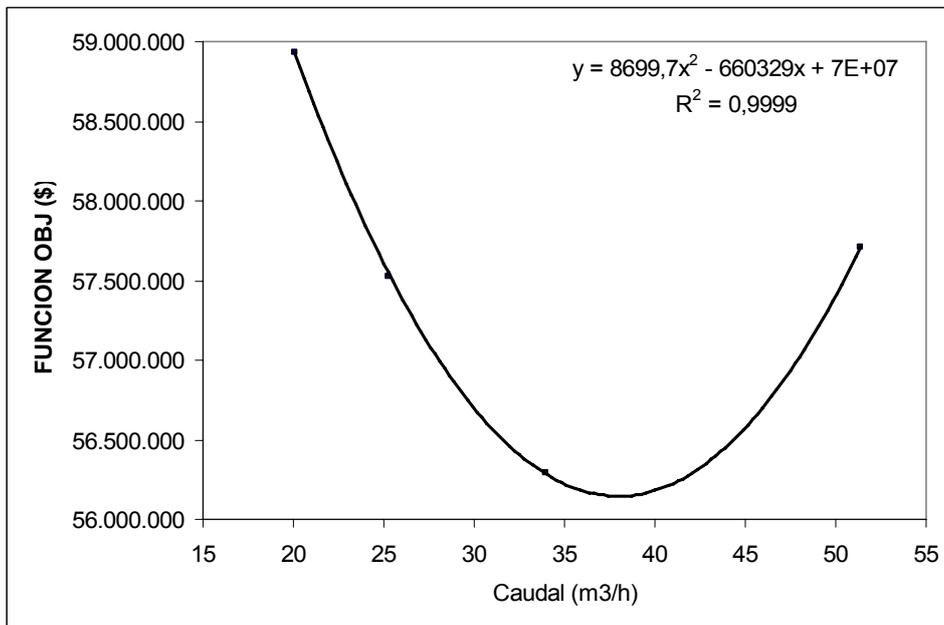
La revisión paramétrica se ocupa de las variables de operación, para este caso de estudio, se escogió como variable; el flujo másico del sistema como se explico anteriormente en el numeral 7.6, y con ayuda del simulador PIPE-FLO se seleccionó la bomba requerida para cada sistema, teniendo en cuenta que al disminuir el flujo, bajan los requerimientos de potencia pero aumenta el numero de colectores necesarios para satisfacer las perdidas energéticas de la piscina. A continuación se muestran los resultados comparativos de simulaciones a deferentes flujos para el sistema optimizado anteriormente en la revisión topológica.

Tabla 36. Comparación de costos con respecto al caudal.

Flujo	ΔT	Colectores	HB	Potencia	Costo bomba	Costo colector	FUNCION OBJ
m ³ /hr	(°C)	Nro	m	KW	\$	\$	\$
51,35	2	29	28	13	1.892.000	26.832.835	57.705.837
33,97	3	29	13	9	1.206.000	26.832.835	56.292.143
25,29	4	30	8,22	5	912.000	27.758.105	57.524.076
20,08	5	31	5,678	2	700.779	28.683.375	58.932.110

Con los datos de la anterior tabla se graficó la función objetivo versus el caudal del sistema, luego se calculó la ecuación de la grafica y se derivó para determinar cual es el flujo que me minimiza la inversión y los costos de operación.

Figura 33. Grafica de la función objetivo



$$\text{Flujo optimo} \Rightarrow \frac{dy}{dx} = 0$$

$$\text{Flujo optimo} = \frac{660329}{2 * (8699.7)} = 37.95 \text{ m}^3 / h$$

Observando la tabla anterior, se puede concluir que el número de colectores necesarios para climatizar la piscina con el caudal óptimo sigue siendo 29, por que la variación en la eficiencia a disminuir el flujo de 45.22 m³/hr a 37.95 m³/hr no es significativa. Luego se realizó la simulación del sistema en PIPE-FLO con el objetivo de determinar la bomba mas adecuada para dicho flujo. A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 26. Especificaciones de la bomba para el sistema optimizado con revisión paramétrica.

P-101 (ANSI 2X3-6 3600)	
Caudal (m3/hr)	37.95
Rpm	3500
Potencia requerida (KW)	5
Potencia de freno (KW)	7
NPSHr (m)	3.08

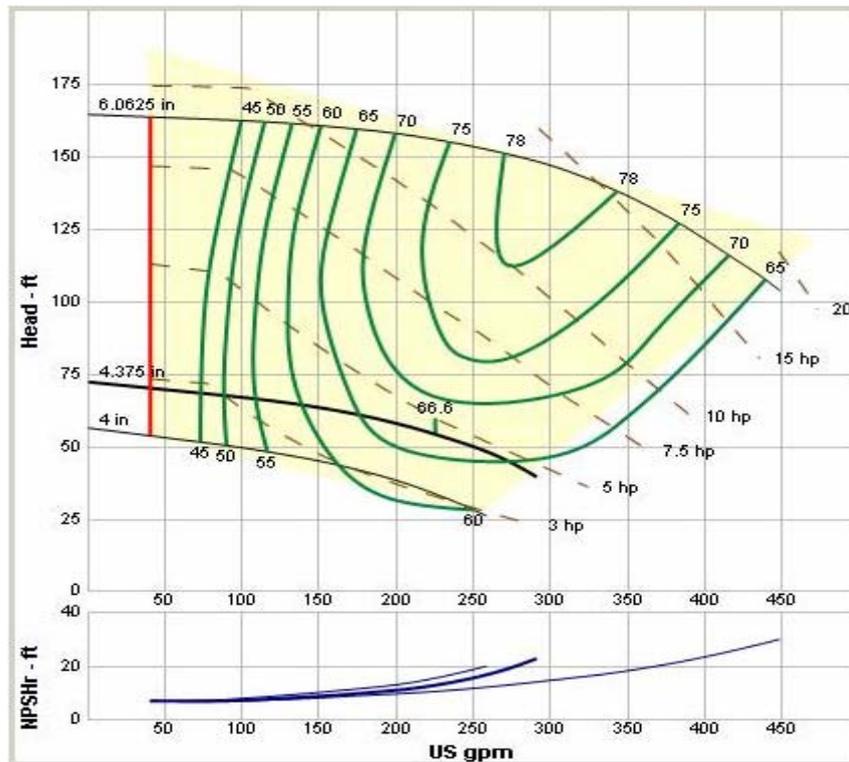
Eficiencia (%)	62.7
H_B (m)	16.8
Diámetro (mm)	108

La bomba seleccionada para este caudal óptimo, sigue siendo la misma que la seleccionada en la optimización topológica, solo que para operar con un menor flujo se requiere un menor diámetro del impulsor.

Como el proveedor de la bomba que actualmente tiene la piscina de la Universidad para la purificación del agua únicamente nos informo el caudal de operación, se realizo la simulación en PIPE FLO con el fin de determinar los parámetros con los que actualmente opera la bomba.

Con ayuda del simulador PUMP-FLO se seleccionó una posible curva para la bomba actual, la cual se muestra a continuación:

Figura 33. Curva de la bomba actual



Con la curva anterior y las especificaciones escritas en la placa del motor como; diámetro del impeler y RPM se logra establecer las especificaciones de la bomba que se muestran a continuación:

Tabla 27. Especificaciones bomba actual.

P-101 (SIHI Monoblock)	
Caudal (m ³ /hr)	45.42
Rpm	3600
Potencia requerida (KW)	7.52
Potencia de freno (KW)	11.47
NPSHr (m)	3.53
Eficiencia (%)	65.6
H _B (m)	18.78
Diámetro (mm)	110

Observando las especificaciones de la bomba actual y comparándolas con la seleccionada para el flujo óptimo, se concluye que la bomba con la que actualmente cuenta la piscina para el proceso de purificación, cumple con los requerimientos de potencia necesarios para circular el fluido por los colectores solares y el filtro. Para utilizarla sería necesario regular el flujo por medio de una válvula a la salida de la bomba.

Otra opción es operar el sistema con el caudal actual, lo que presenta beneficios como: la recirculación del volumen de agua total de la piscina en un día de operación (11 horas), y mayor eficiencia del sistema. Además se observa que la diferencia entre el flujo al que actualmente opera la bomba de la piscina de la universidad EAFIT y el óptimo calculado anteriormente, no es muy significativa, alrededor de un 1% con relación a la función objetivo. Por estas razones se realizó una simulación del sistema con dicho caudal $45.42 \text{ m}^3/\text{h}$ para determinar los nuevos parámetros de operación. A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 28. Especificaciones bomba Necesaria.

P-101 (SIHI Monoblock)	
Caudal (m^3/hr)	45.42
Rpm	3600
Potencia requerida (KW)	7.55
Potencia de freno (KW)	10
NPSHr (m)	3.14
Eficiencia (%)	70.3
H_B (m)	24
Diámetro (mm)	120

Se observa que para poder utilizar la bomba de EAFIT y trabajar con el caudal actual sería necesario cambiar el impulsor por uno con mayor diámetro (de 110 mm a 120 mm). Ver:

ANEXO 2. HOJA TÉCNICA DE LA BOMBA.

8 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

A continuación se detallan los costos e inversiones en el que se incurren en la puesta en marcha y operación del presente proyecto. Para conocer si el proyecto es viable económicamente se realiza un flujo de efectivo.

8.1.1 INVERSIONES

En la siguiente tabla se muestra la inversión en equipos y accesorios para el proceso. Los costos de los equipos se obtuvieron a través cotizaciones realizadas a diferentes proveedores. En el ANEXO 13. DETALLE DE LAS INVERSIONES, se muestra el detalle de las inversiones en accesorios, tuberías y otros.

Tabla 29. Inversión en la maquinaria y accesorios

Equipo	Costo (\$)
Accesorios	4.693.411
Tuberías	25.685.826
Lamina de Cobre	5.737.437
Bomba Centrifuga	1.660,455
Ampliación techo	30.392.000
Otros	5.000.000
Total	\$ 73'169.129

8.1.1.1 Inversiones diferidas

Las inversiones diferidas, se dividen en: los gastos pre-operativos, como el estudio de factibilidad, asesorías y las inversiones en capacitación del personal. Estas inversiones se resumen en la siguiente tabla:

Figura 34. Resumen de las inversiones diferidas

Activos Intangibles			
Inversión en Capacitación	# Empleados	Inv / Empleado	Subtotal
	2	\$ 50.000	\$ 100.000
Asesoría para montaje del sistema	# horas	Costo / hora	Subtotal
	200	\$ 45.000	\$ 9'000.000
Estudio legal	\$ 5'000.000		
Total Activos Intangibles	\$ 14'100.000		

8.1.1.2 Depreciaciones y amortizaciones

Con base en las inversiones iniciales anteriormente presentadas, se procede a calcular los montos anuales de la depreciación y amortización, se emplea el método de línea recta, los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 30. Depreciaciones y Amortizaciones

Depreciaciones y Amortizaciones a 10 Años en millones de pesos											
	Total a Depreciar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Maquinaria y Equipos	73.2	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
Activos intangibles	14.1	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4

8.1.2 COSTOS DE OPERACIÓN

Los costos del proyecto se definieron a partir de los costos de producción mensuales estimados para el primer año. Es importante tener en cuenta que el aumento anual de estos costos de producción se calculará en el flujo del proyecto empleando un valor para la inflación (año corrido) de 4.19%. [28]

8.1.2.1 Costos de los Servicios

A continuación se presenta el resumen de los requerimientos de los utilities para el proceso

Tabla 31. Requerimientos de utility del proceso

Costos de los Servicios			
UTILITY	\$/ Kw-h	Kw-h/mes	total (\$/mes)
Energía	253	4.817	1'218.802
	\$ m3	m3/mes	
Agua EPM	4941	115	567.776

Los datos del costo de los servicios se tomaron de la referencia [29]

8.1.2.2 Mano de obra directa

La mano de obra directa que actualmente se tiene para el proceso de mantenimiento de la piscina es de un Operario, que estará supervisando en horas de la mañana durante el arranque del sistema, y otro en la tarde hasta que el sistema se apague. Para el caso del sistema de climatización se necesita el mismo número de operarios.

Para el cálculo del costo de mano de obra se tiene en cuenta que, el salario mínimo en Colombia actualmente (2007) es de \$433.700 y además se incluye un factor prestacional de 1.7 para la mano de obra directa y de 1.5 para la indirecta, donde se encuentran los aportes tanto de pensiones y cesantías como los parafiscales.

En la tabla 42 se presenta el resumen de los costos directos de operación, estimados mensualmente para el primer año.

Tabla 32. Costos de mano de obra

Costos Directos				
Mano de Obra Directa (2 Turnos)	# Empleados	Salario base	Factor prestacional	Subtotal
Operarios	2	433700	1.7	\$ 737.290

Tabla 33. Costos directos de operación

Costo total de los servicios	1,786.578
Costo total de la mano de obra	737.290
Total costos directos de operación mensuales para el primer año	\$ 2'526.868

8.1.3 CAPITAL DE TRABAJO

Se define que el capital de trabajo será equivalente a los costos operativos del primer mes de trabajo del sistema de climatización, hallados en el numeral anterior.

8.1.4 INGRESOS OPERATIVOS: AHORRO DE ENERGÍA

Las ventas se determinaron con base en el costo de la energía eléctrica, calculando el costo anual de suplir las pérdidas energéticas de la piscina.

8.1.5 ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE EFECTIVO

Se proyectaron tres flujos de efectivo (Energía Solar, Gas natural, Bomba de calor) con el fin de realizar un análisis comparativo entre las diferentes fuentes de energía para climatizar la piscina. A continuación se enumeran las consideraciones tenidas en cuenta:

- Se asume un crecimiento de las ventas (costo de la energía eléctrica) igual a la inflación (año corrido) de 4.19%. [30].
- Se trabaja con una tasa de impuestos de 38% sobre la utilidad bruta.
- Los costos de operación se calcularán en el flujo del proyecto empleando un valor de inflación de 4.19% (año corrido).
- Para el sector energético la tasa de oportunidad se encuentra entre el 20 y 25%, por tanto se asumirá una tasa de oportunidad del 25%.
- La inversión corresponde al costo de cada una de las diferentes instalaciones

ANÁLISIS DE OTRAS DE FUENTES DE ENERGÍA

Con el objetivo de determinar cual es la fuente de energía más económicamente factible para la climatización de piscinas se analizaron las siguientes fuentes de energía: Gas natural, Bomba de calor

- **Climatización con calderín de gas natural:** En la siguiente tabla se presentan la características y los costos de operación de esta fuente de energía de acuerdo a la condiciones de la piscina de la universidad Eafit.

Tabla 34. Parámetros del calderín a gas

Parámetros	Unidades	Valores
Precio del Gas Natural	\$/m ³	736.45
Rendimiento Global		0.8
Poder calorífico	Btu/m ³	32.000
Calor neto obtenido para calentar el agua	Btu/m ³	25.600
Consumo diario de gas natural	m ³ /día	98.22
Costo del consumo diario de gas natural	\$/día	72.289
Valor del consumo mensual	\$/mes	2'168.697
Inversión(31)	\$	12'829.361

Los precios actuales en Colombia para:

- Electricidad: \$ 253/KW-h [29]
- Gas Natural: \$ 736.45/m³ [29]

Otra posible fuente de energía que se analizó para climatizar la piscina, fue una bomba de calor, la cual se cotizó a ES ENERGÍA SOLAR LTDA [32]. A continuación se muestran los parámetros que el proveedor especificó para las necesidades energéticas de la piscina.

Tabla 35. Parámetros de la bomba de calor.

Parámetros	Unidades	Valores
Capacidad de la bomba de calor	BTU/h	450,000
Potencia del equipo	KW	25.8
Horas diarias de trabajo	h/día	10.3
Eficiencia del intercambiador	%	95
Precio de la energía eléctrica	\$/Kw-h	253
Costo del consumo diario de la energía eléctrica	\$/día	67.232
Costo del consumo mensual de la energía eléctrica	\$/mes	2,016.967
Precio Unitario con IVA	\$	48,372.000
Inversión Total	\$	64'960.000

Se sugiere que el tiempo de operación de una bomba de calor sea inferior a 12 horas por día, ya que de esta forma el compresor trabaja cómodamente y aumenta su vital útil. Además para este tipo de sistemas se necesitan los siguientes equipos:

- Tablero electrónico trifásico de 24 circuitos, con tierra (neutro), alimentado con cable para atender un consumo de 150 Amperios, 6 Breaker tripulares de 30 amperios cada uno y tomas 110 V y 220V para mantenimiento

- Motobomba en buenas Condiciones de funcionamiento para operar con un caudal de 326.547 GPM

A continuación se presenta una tabla comparativa del costo de cada uno de las instalaciones, en donde se puede observar que la instalación que requiere menor inversión inicial es la de gas natural, seguido por la bomba de calor y por ultimo la energía solar. Pero las instalaciones de gas natural y bomba de calor necesitan de un suministro de energía mayor para su funcionamiento.

Tabla 45. Costo de la inversión para diferentes fuentes energéticas

Fuente	Equipo	Inversión (\$)
Energía solar	Colectores	89'275.129
Gas Natural [31]	Calentador	12'829.361
Bomba de calor [32]	Bomba	64'960.000

En los siguientes flujos de efectivo para cada tipo de instalación, se puede observar el comportamiento de cada una de las inversiones dentro de un periodo económico de 10 años, con el fin de compáralos y ver cuan factible económicamente es la inversión en los colectores solares para climatizar la piscina de la universidad EAFIT.

Tabla 36. Flujo de efectivo de calefacción solar comparado con energía eléctrica.

Flujo de Efectivo en Millones de pesos											
Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ventas		76,8	80,0	83,4	86,9	90,5	94,3	98,3	102,4	106,7	111,2
Costos directos		-30,3	-31,6	-32,9	-34,3	-35,7	-37,2	-38,7	-40,4	-42,1	-43,8
Depreciaciones		-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3
Amortizaciones		-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4
Utilidad antes de impuesto		37,8	39,8	41,8	43,9	46,1	48,4	50,8	53,3	55,9	58,6
Impuesto (38%)		-14,4	-15,1	-15,9	-16,7	-17,5	-18,4	-19,3	-20,3	-21,2	-22,3
Utilidad neta		23,4	24,6	25,9	27,2	28,6	30,0	31,5	33,0	34,7	36,3
Depreciaciones		7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
Amortizaciones		1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Inversión inicial	-87,27										
Inversión en capital de trabajo	-2,5										
Flujo de Efectivo	-89,8	32,2	33,4	34,6	35,9	37,3	38,7	40,2	41,8	43,4	45,1

Tabla 37. Indicadores financieros con calefacción solar

VPN	\$ 126,0
TIR	37%

Tabla 38. Flujo de efectivo de calefacción a gas comparado con energía eléctrica.

Flujo de Efectivo en Millones de pesos											
Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ventas		76,8	80,0	83,4	86,9	90,5	94,3	98,3	102,4	106,7	111,2
Costos directos		-59,4	-61,9	-64,5	-67,2	-70,0	-72,9	-76,0	-79,2	-82,5	-85,9
Depreciaciones		-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3
Amortizaciones		-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4
Utilidad antes de impuesto		14,7	15,5	16,2	17,0	17,8	18,7	19,6	20,5	21,5	22,5
Impuesto (38%)		-5,6	-5,9	-6,2	-6,5	-6,8	-7,1	-7,4	-7,8	-8,2	-8,6
Utilidad neta		9,1	9,6	10,1	10,5	11,1	11,6	12,1	12,7	13,3	14,0
Depreciaciones		1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Amortizaciones		1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Inversión inicial	-12,83										
Inversión en capital de trabajo	-5,0										
Flujo de Efectivo	-17,8	11,8	12,3	12,7	13,2	13,7	14,3	14,8	15,4	16,0	16,6

Tabla 39. Indicadores financieros con calefacción a gas

VPN	\$ 60,3
TIR	70%

Tabla 40. Flujo de efectivo comparado con bomba de calor.

Flujo de Efectivo en Millones de pesos											
Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ventas		76,8	80,0	83,4	86,9	90,5	94,3	98,3	102,4	106,7	111,2
Costos directos		-48,6	-50,6	-52,7	-54,9	-57,2	-59,6	-62,1	-64,7	-67,4	-70,3
Depreciaciones		-6,5	-6,5	-6,5	-6,5	-6,5	-6,5	-6,5	-6,5	-6,5	-6,5
Amortizaciones		-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4
Utilidad antes de impuesto		20,4	21,5	22,8	24,1	25,4	26,8	28,2	29,8	31,3	33,0
Impuesto (38%)		-7,7	-8,2	-8,7	-9,1	-9,7	-10,2	-10,7	-11,3	-11,9	-12,5
Utilidad neta		12,6	13,4	14,1	14,9	15,7	16,6	17,5	18,5	19,4	20,5
Depreciaciones		6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Amortizaciones		1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Inversión inicial	-64,96										
Inversión en capital de trabajo	-4,0										
Flujo de Efectivo	-69,0	20,5	21,3	22,0	22,8	23,7	24,5	25,4	26,4	27,3	28,4

Tabla 41. Indicadores financieros con calefacción por bomba de calor

VPN	\$ 68,9
TIR	30%

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS FINANCIEROS

Con el fin de comparar las tres alternativas para climatizar la piscina se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se halló el VPN y se escogió la alternativa que tubo mayor VPN positivo
2. A la alternativa seleccionada, se halló la TIR
3. A la TIR se le comparó con la TIO y si es mayor, esta es la mejor opción.

El mejor VPN (\$ 126) es para el proyecto con energía solar la TIR (37%) para dicho proyecto es mayor que la TIO (25%) por lo tanto se concluye que la mejor alternativa para climatizar la piscina es con energía solar.

9 CONCLUSIONES

- En la climatización de piscinas con energía solar el factor de mayor relevancia en cuanto a las pérdidas energéticas de la piscina, es la velocidad del viento, por esta razón antes de pensar en algún sistema de calentamiento es necesario estudiar la posibilidad de cortar el viento, con el fin de obtener menores requerimientos de energía y lograr un diseño de menor envergadura. Para el caso de la piscina de la universidad EAFIT la velocidad promedio del viento es de 0.3 m/s que se midió durante dos meses a diferentes horas del día (8:00 am, 12:00 m y 5:00 pm), este valor promedio es bajo comparado con reportes de la estación meteorológica (1.61 m/s), esto se debe a que actualmente los alrededores de la piscina cuentan con diferentes obstáculos que impiden la formación de fuertes corrientes de viento (rejas, Arbustos, Árboles, Edificaciones).

- Una de las variables más importantes a tener en cuenta en un sistema de climatización con energía solar, es el flujo que pasa por cada colector ya que un flujo turbulento facilita la transferencia de calor mejorando así la eficiencia del colector y haciendo que se requiera menor cantidad de colectores para satisfacer las necesidades energéticas del sistema, pero a su vez incrementa los costos de operación al requerir una bomba de mayor potencia, por lo que fue indispensable calcular el flujo óptimo en el que se minimizan los costos operacionales y de inversión, el cual tiene un valor de 37.95 m³/hr.

- Los colectores configurados con los tubos arriba presentaron un mejor comportamiento que los de placa plana (área efectiva por colector 7.8 m^2) debido a que presentan una mayor área de transferencia (área efectiva por colector con los tubos arriba 10.45 m^2) lo que conlleva a que la inversión inicial sea menor ya que el número de colectores se reduce de 38 a 29 (en un 24%).

- El área disponible que actualmente existe para la ubicación de los colectores solares (Superficie del techo de los camerinos, 80 m^2) es menor que el área necesaria para la ubicación de estos por tal motivo se debe realizar una ampliación en 210.5 m^2 adicionales. De acuerdo a las características del proyecto, esta ampliación presenta restricciones de forma por la distribución de los lugares aledaños a la piscina. La forma con la que se estuvo de acuerdo fue una configuración en forma de L. La ventaja mas significativa que presenta esta configuración es que recibe menor cantidad de sombra proveniente de los árboles, evitando así la tala de estos y siendo fieles al concepto de Universidad parque.

- Con los simuladores Pipe-FLO y Pipe-Flow se realizó un diseño que garantiza un flujo similar en cada uno de los colectores solares ($1.8 \text{ m}^3/\text{h}$). Para garantizar un flujo homogéneo en los colectores fue necesario adicionar 6 válvulas de equilibrado (4 de compuerta y 2 de globo) y disminuir progresivamente el diámetro en las secuencias de colectores. El simulador Pump-FLO ayudo en la selección de la bomba mas apropiada para el sistema.

- Para la climatización de la piscina no fue necesario cambiar totalmente la bomba hidráulica solo se debe aumentar el diámetro del impeler de 110 mm a 120 mm.

- Según el estudio financiero la mejor inversión para este tipo de proyectos es la climatización con energía solar ya que presenta el mayor VPN (\$ 126) y una TIR (37%) mayor que la TIO (25%)

- Para garantizar una temperatura media de 26 °C en el agua de la piscina se debe tener personal capacitado en el manejo correcto del sistema durante el tiempo de operación.

- El ángulo de inclinación óptima de los colectores solares no se calculo rigurosamente porque según investigaciones recientes esta variable no es significativa en el funcionamiento de los colectores cuando se esta cercano a la zona del ecuador.

- Según los cálculos hidráulicos no hay que cambiar el sistema de tuberías que existe actualmente para la purificación de la piscina, solo hay que adicionar el sistema hidráulico de los colectores y otra bomba hidráulica para garantizar el funcionamiento del sistema cuando unas de las bombas hidráulicas este en mantenimiento.

10 RECOMENDACIONES

- En la sección 7.7.1 se propuso colocar una cortina de agua en la parte norte de la piscina con el fin de disminuir las pérdidas de calor de la piscina por efectos de evaporación. Por lo tanto recomendamos realizar un estudio de la factibilidad económica y operativa de esta mejora para su futura implementación.

- Se recomienda evaluar la posibilidad de un sistema híbrido entre energía solar y una bomba de calor para garantizar la climatización de la piscina sin importar las condiciones climáticas.

- Se recomienda realizar una ampliación del cuarto de bombas para facilitar su mantenimiento y evitar posibles accidentes de los operarios debido a la dificultad de acceso.

- Como los colectores van a estar expuestos al sol, es mayor la probabilidad de que se ensucien, reduciendo su funcionamiento, por tal motivo se recomienda que los colectores se estén limpiando con regularidad. Aunque anteriormente se menciono que no es necesario una inclinación debido a la cercanía con la zona ecuatorial, se recomienda estudiar el sobre costo de inclinar los colectores 6° al Sur con el fin de obtener un lavado por lluvia contribuyendo así con el mantenimiento del sistema.

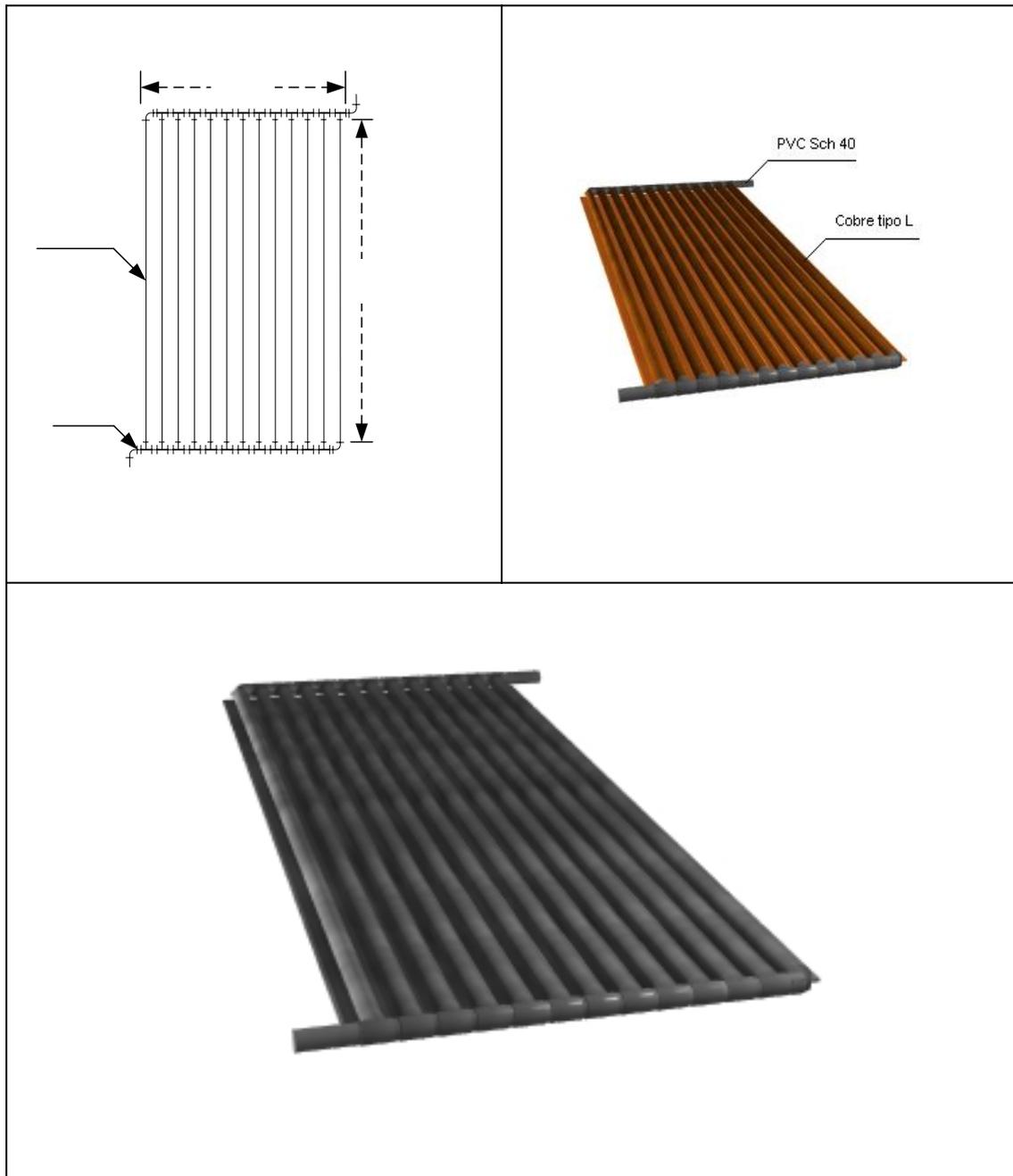
- Se recomienda construir el prototipo de un colector con el fin de evaluar los resultados experimentales con las predicciones teóricas

- Debajo de la nueva ampliación se recomienda la posibilidad de instalar un gimnasio con equipos especializados para el fortalecimiento de los deportistas.

ANEXO 1. HOJA TÉCNICA DEL COLECTOR

HOJA TÉCNICA - COLECTOR SOLAR					
Características físico químicas					
Material	Cobre tipo L				
Resistencia a la corrosión	No sufre corrosión				
Resistencia a la electrolisis	No sufre electrolisis				
Resistencia a los agentes atmosféricos	Resiste las radiaciones UV				
Resistencia a la tensión a T ambiente	30 Mpa				
Conductividad térmica	401 W/m °K				
Expansión térmica máxima	17 e-6 / °K				
Dureza	80-100 Rockwell				
Características mecánicas y de instalación					
Temperatura máx. de funcionamiento	40 °C				
Presión máx. de funcionamiento	60 KPa 40 °C				
Longitud	m	6	Superficie captora	m ²	10,45
Distancia entre tubos	cm	10	Peso de los colectores	kg	98
Diámetro de los tubos	in	1/2"	Capacidad de agua	kg	3271
Flujo y pérdidas de carga a lo largo de los paneles solares					
Mínimo flujo aconsejado	m ³ /hr	1,2			
Corresp. Pérdidas de carga	Kpa	0,83			
Flujo óptimo aconsejado	m ³ /hr	1,3			
Corresp. Pérdidas de carga	Kpa	2,86			

Figura 35. Especificaciones de los colectores solares

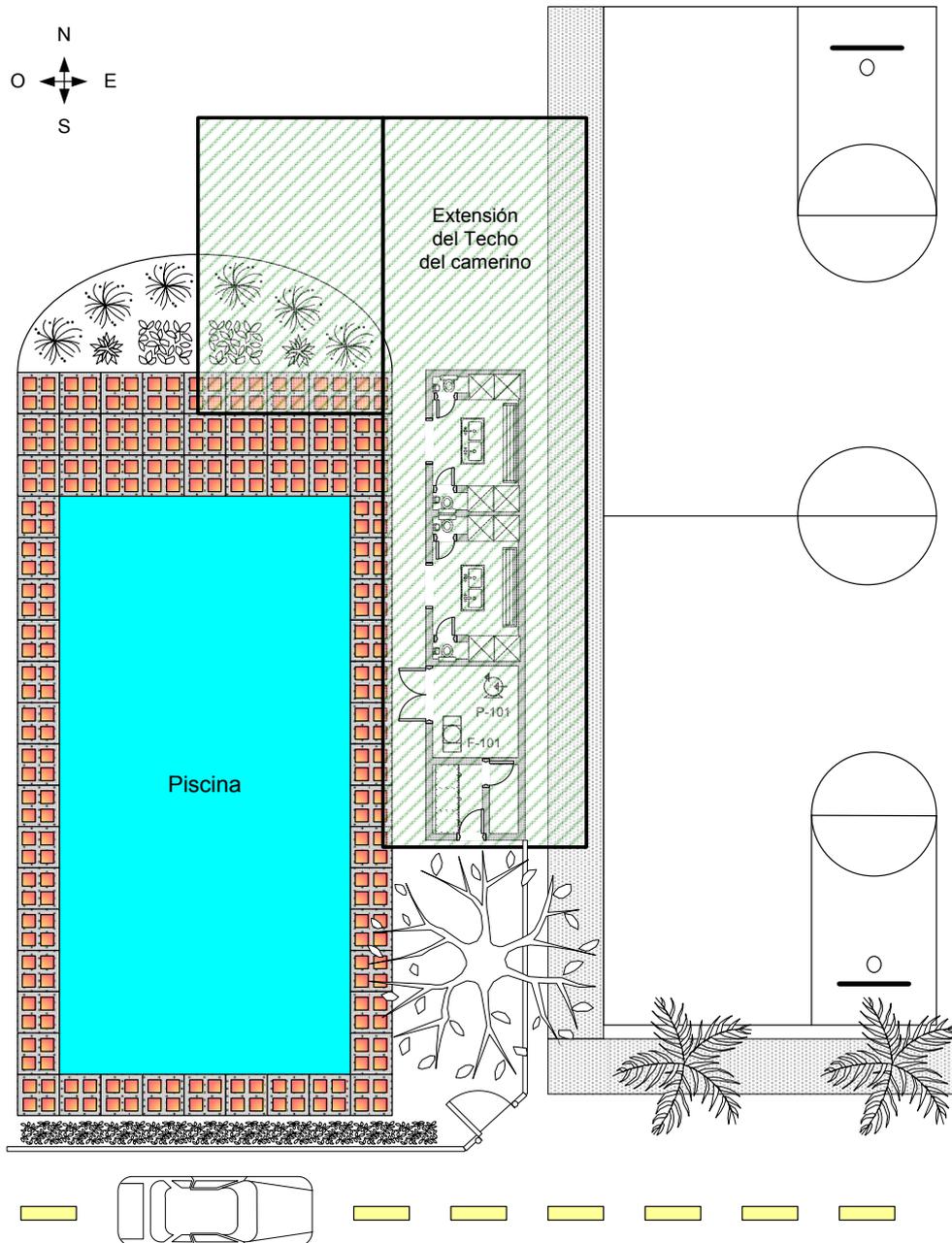


ϕ 1_in

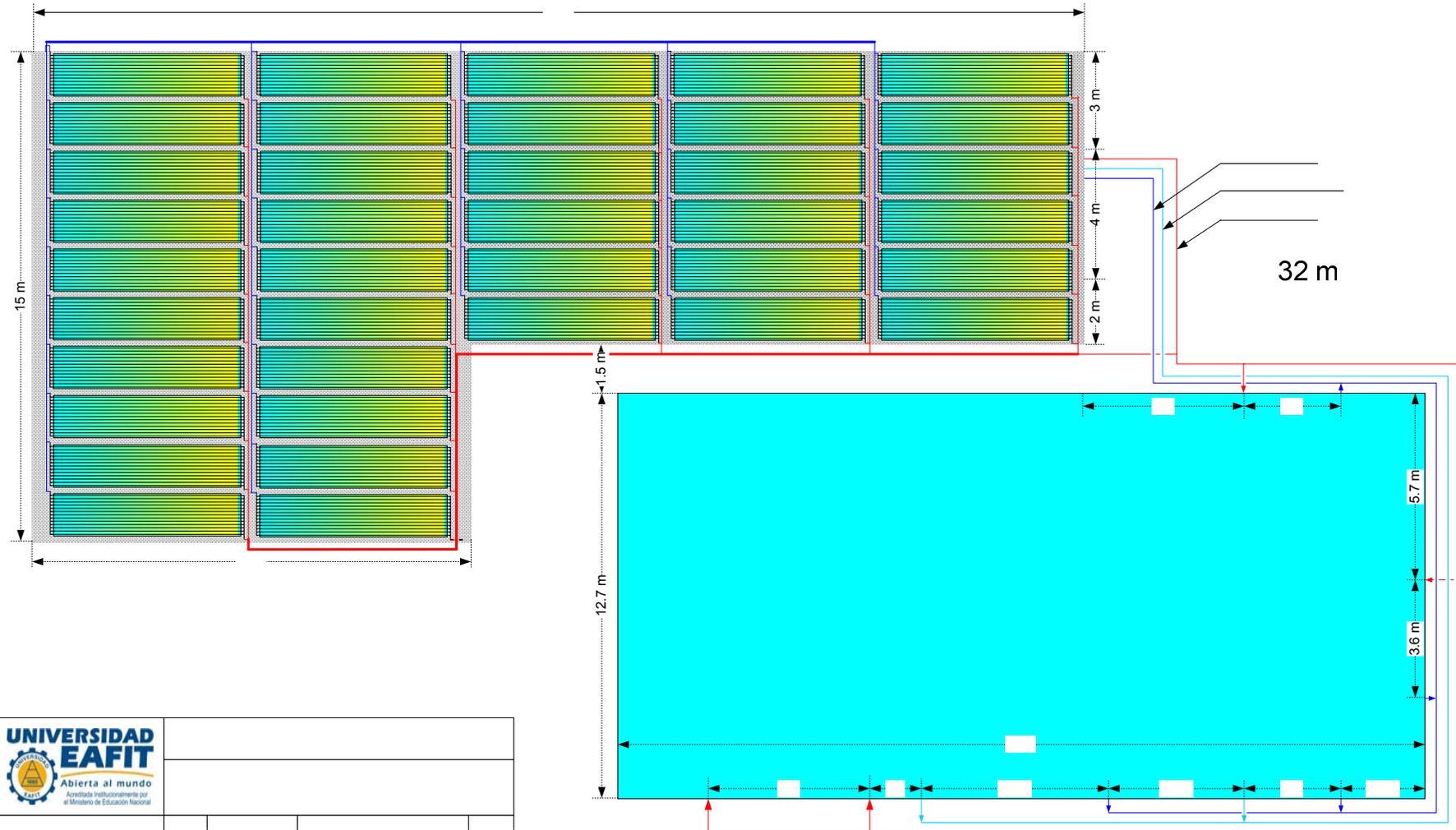
ANEXO 2. HOJA TÉCNICA DE LA BOMBA

HOJA TÉCNICA - BOMBA P-101 A/B		
Condiciones de Operación		
Fluido que transporta	Agua	
Flujo total que entra (m ³ /h)	45.42	
	ENTRADA	SALIDA
Temperatura (°C)	26	26
Presión (KPa)	-15.52	215.7
Viscosidad (N s/m ²)	894	894
Diseño		
Diámetro del impulsor (mm)	120	
Revoluciones por minuto (Rpm)	3600	
Eficiencia (%)	70.3	
ΔP (KPa)	156.6	
Potencia requerida (KW)	7.55	
Potencia de freno (KW)	10	
Cabeza de la Bomba (m)	24	
NPSHr (m)	3.14	
Material de Construcción	Hierro fundido	
Tipo de Bomba	Centrífuga	

ANEXO 3. DISTRIBUCIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL TECHO DE LOS CAMERINOS

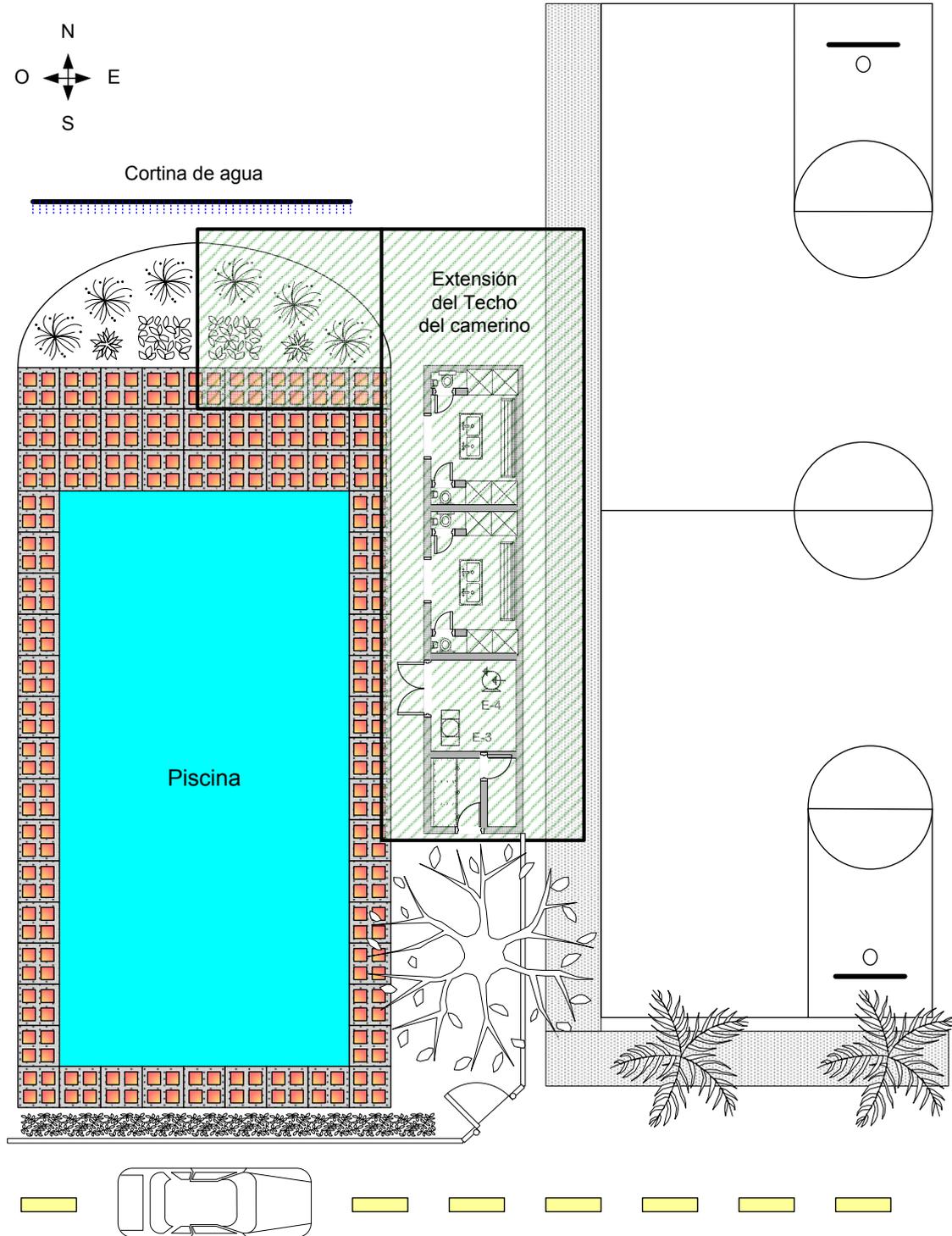


ANEXO 4. PLANO ARQUITECTÓNICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS COLECTORES

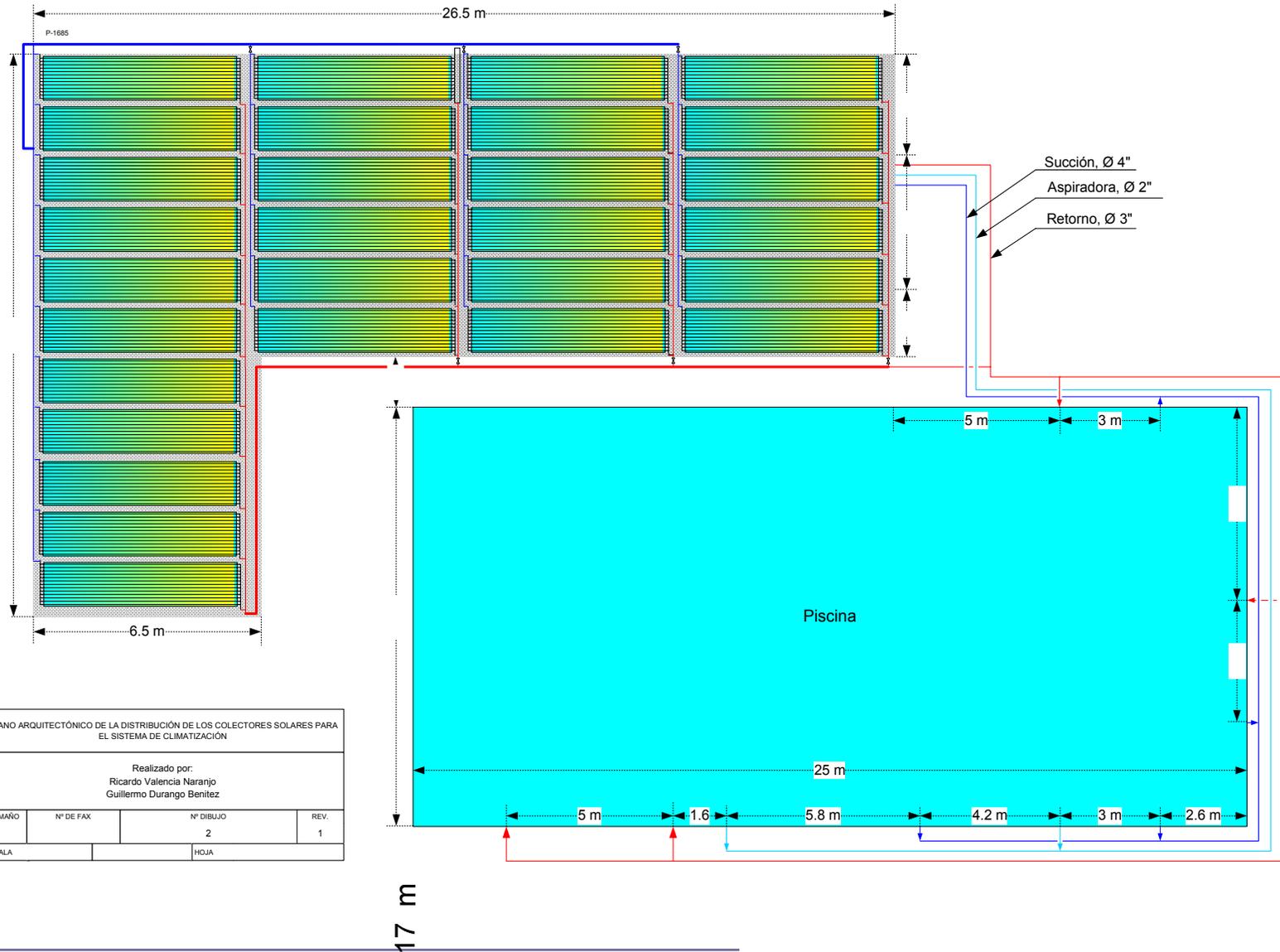


 UNIVERSIDAD EAFIT Abierta al mundo Acreditada Institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional			

ANEXO 5. LAYOUT OPTIMIZADO DE LA EXTENSIÓN DEL TECHO DE LOS CAMERINOS

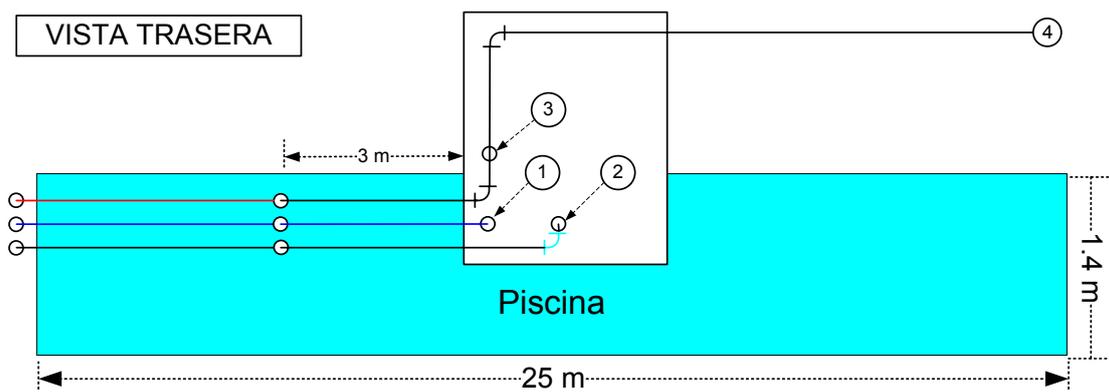
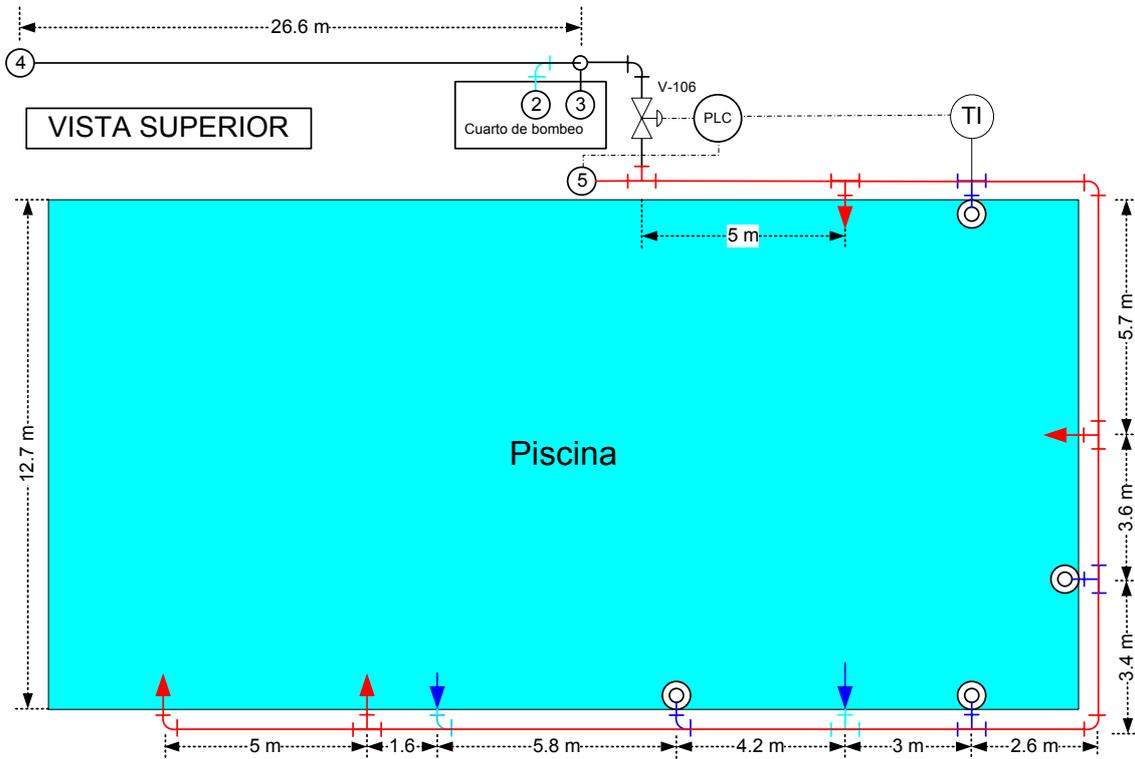


ANEXO 6. PLANO ARQUITECTONICO OPTIMIZADO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS COLECTORES

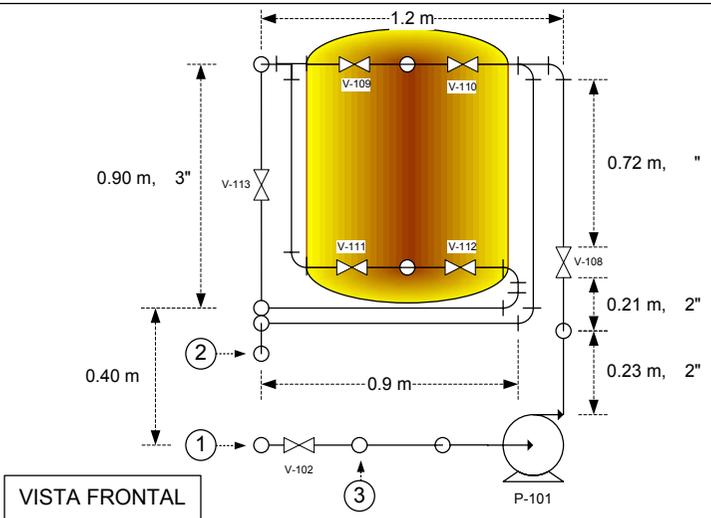
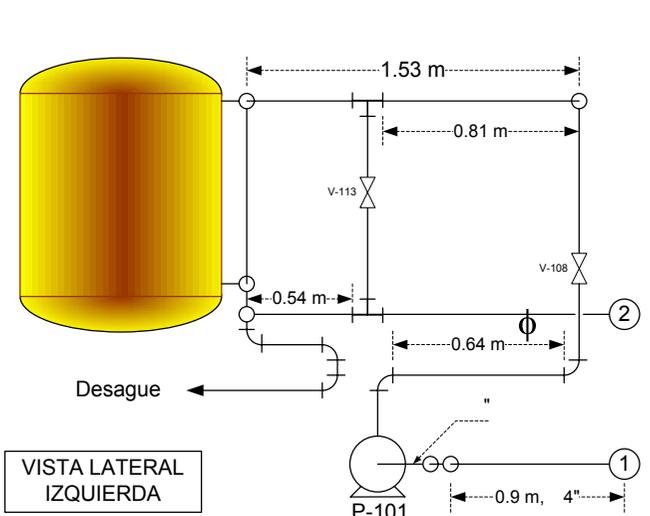
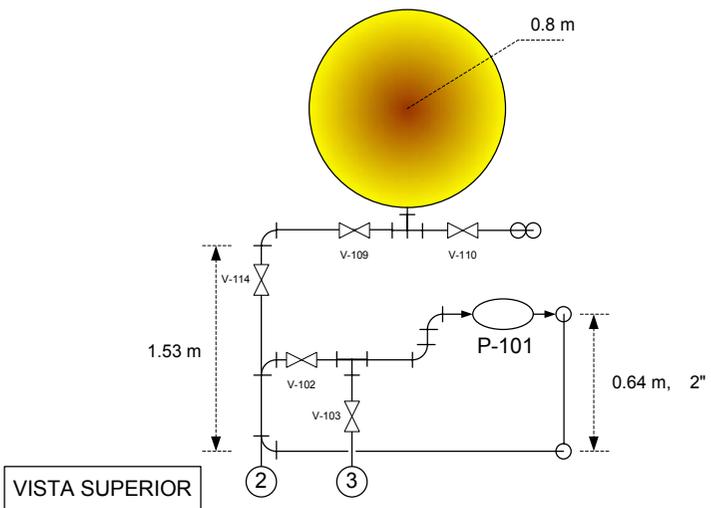


 <p>UNIVERSIDAD EAFIT Abierta al mundo Acreditada Institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional</p>	PLANO ARQUITECTÓNICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES PARA EL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN				
	Realizado por: Ricardo Valencia Naranjo Guillermo Durango Benitez				
Aprobado por: Jaime Escobar A	TAMAÑO	N° DE FAX	N° DIBUJO	REV.	
Proyecto de Grado	ESCALA		2	1	
			HOJA		

ANEXO 7. PLANO DE TUBERÍAS DE LA PISCINA



ANEXO 8. PLANO DE TUBERIAS DEL CUARTO DE BOMBEO (VISTAS)



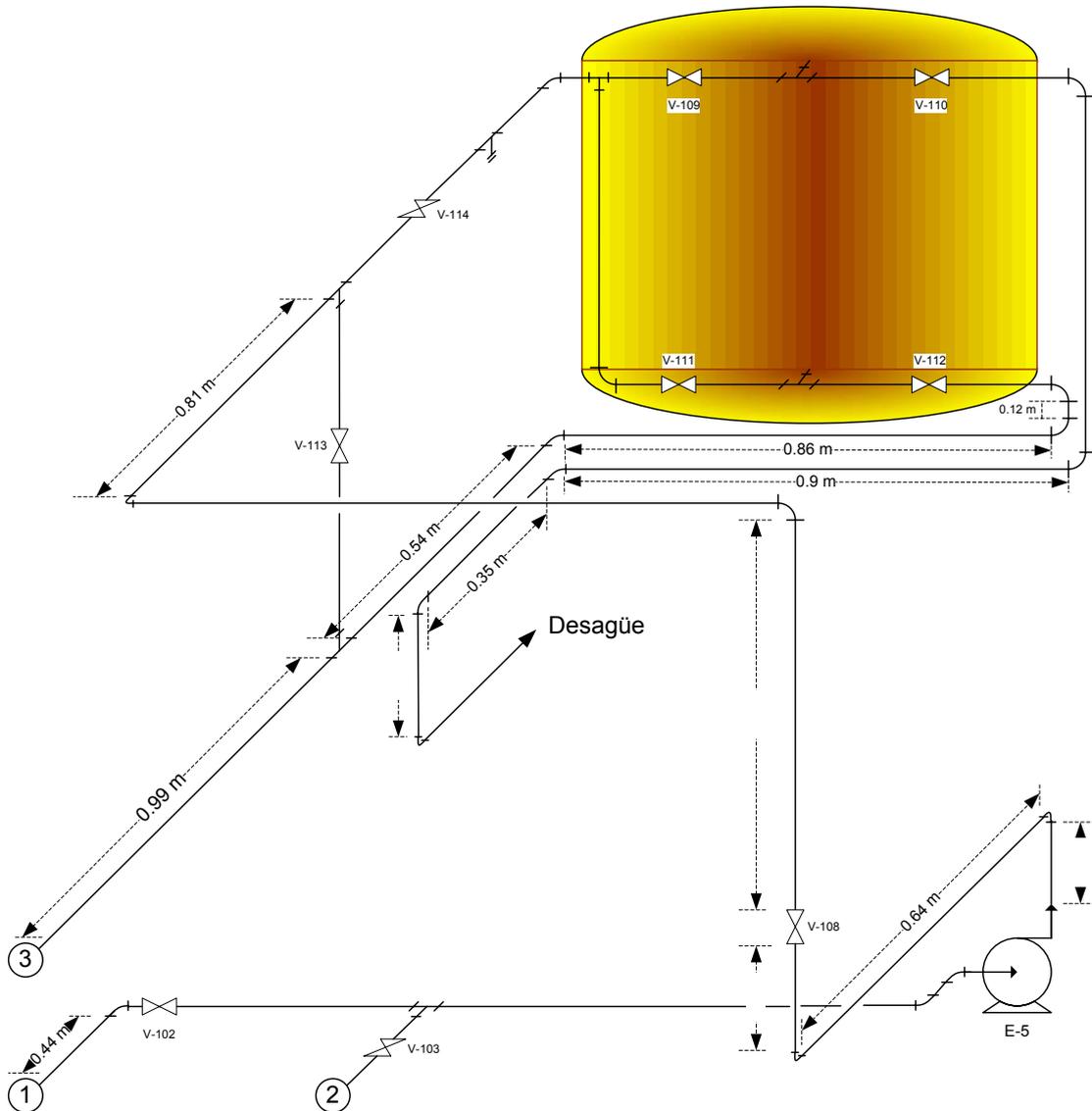
Lista de válvulas		
Equipo	Diámetro (in)	Clase de válvula
V-102	3	Compuerta
V-103	2	Compuerta
V-108	2	Mariposa
V-109	3	Compuerta
V-110	3	Compuerta
V-111	3	Compuerta
V-112	3	Mariposa
V-113	3	Compuerta
V-114	3	Compuerta

<p style="font-weight: bold; font-size: 1.2em;">UNIVERSIDAD EAFIT</p> <p style="font-size: 0.8em;">Abierta al mundo Acreditada Institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional</p>	PLANO DE TUBERÍAS ACTUAL DE LA SECCIÓN DEL CUARTO DE BOMBAS		
	Realizado por: Ricardo Valencia Naranjo Guillermo Durango Benitez		
Aprobado por: Jaime Escobar A	TAMAÑO	Nº DE FAX	Nº DIBUJO
Proyecto de Grado	ESCALA		1
			REV. 1
			HOJA

φ

**ANEXO 9. PLANO DE TUBERÍAS DEL CUARTO DE BOMBEO
(ISOMÉTRICO)**

ISOMÉTRICO



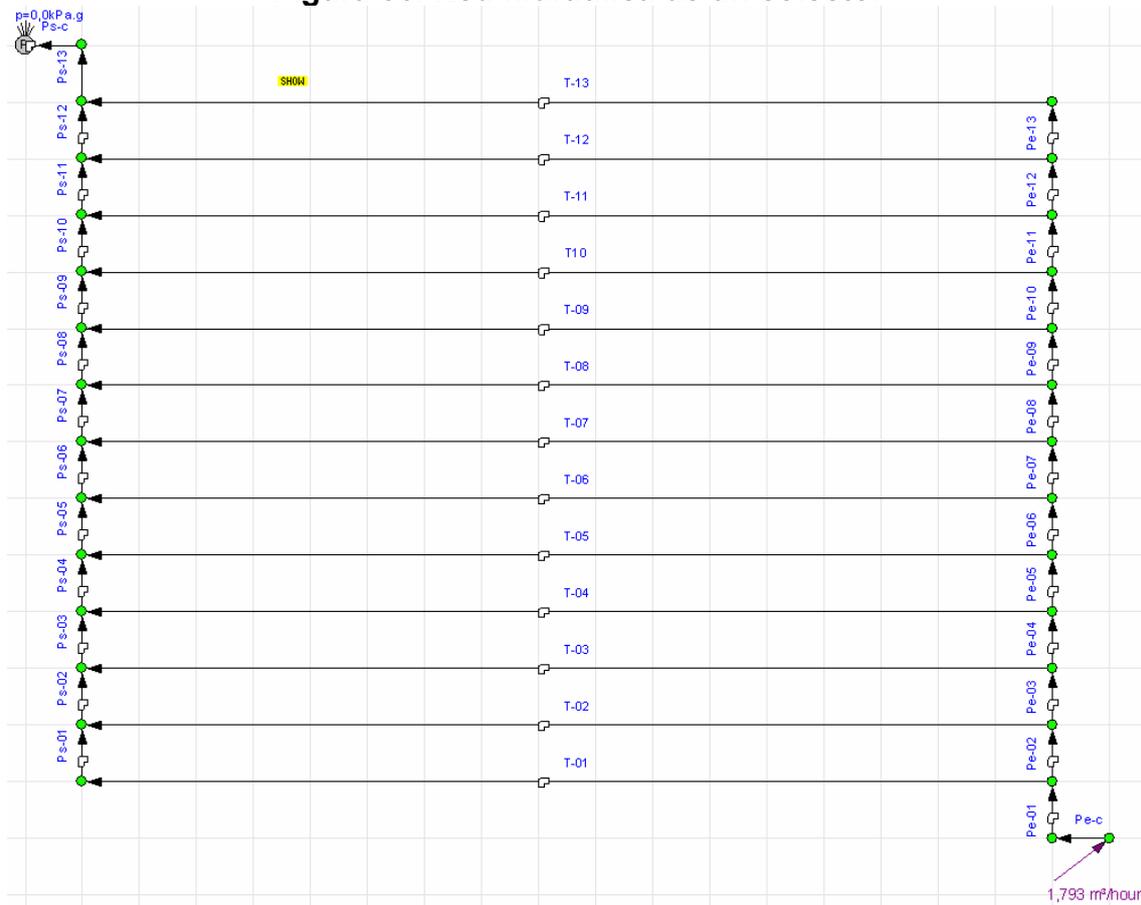
	PLANO DE TUBERÍAS ACTUAL DE LA SECCIÓN DEL CUARTO DE BOMBAS			
	Realizado por: Ricardo Valencia Naranjo Guillermo Durango Benitez			
Aprobado por: Jaime Escobar A	TAMAÑO	Nº DE FAX	Nº DIBUJO 1	REV. 1
Proyecto de Grado	ESCALA		HOJA	

ANEXO 10. METODOLOGÍA Y RESULTADOS DEL DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA RED HIDRÁULICA

A continuación se muestra el diseño de la red hidráulica utilizado para el cálculo.

Inicialmente se realizó el cálculo para el diseño de la red hidráulica de un colector, según el balance de materia y energía, el flujo de entrada es 1.793 m³/hr, como lo indica la Tabla 20 Resultados del colector.

Figura 36. Red hidráulica de un colector



Pe: Tuberías de entrada, ubicadas al lado derecho de la figura.

Ps: Tuberías de salida, ubicadas al lado izquierdo de la figura.

T: Tuberías de cobre, ubicadas en el medio de la figura.

Tabla 42. Resultados tubería de espaciado en un colector

**Material: PVC ANSI Sch 40.
 Longitud: 10 cm.
 Diámetro: 1".**

Nombre	Flujo	Velocidad	ΔP
	m ³ /hr	m/seg	kPa
Pe-01	1.797	1.303	0.274
Pe-02	1.552	0.930	0.639
Pe-03	1.359	0.814	0.491
Pe-04	1.209	0.724	0.390
Pe-05	1.095	0.656	0.320
Pe-06	1.007	0.604	0.271
Pe-07	0.938	0.562	0.236
Pe-08	0.859	0.515	0.198
Pe-09	0.790	0.473	0.168
Pe-10	0.703	0.421	0.133
Pe-11	0.588	0.352	0.094
Pe-12	0.438	0.263	0.052
Pe-13	0.245	0.147	0.009
Ps-01	0.245	0.147	0.009
Ps-02	0.438	0.263	0.052
Ps-03	0.588	0.352	0.094
Ps-04	0.703	0.421	0.133
Ps-05	0.790	0.473	0.168
Ps-06	0.859	0.515	0.198
Ps-07	0.938	0.562	0.236
Ps-08	1.007	0.604	0.271
Ps-09	1.095	0.656	0.320
Ps-10	1.209	0.724	0.390
Ps-11	1.359	0.814	0.491
Ps-12	1.552	0.930	0.639
Ps-13	1.797	1.303	0.274

Los anteriores resultados corresponden a el flujo que pasa por las tuberías de PVC que se encuentran entre el espaciado de los tubos de cobre de un colector. Donde se puede observar que las velocidades y la caída de presión están entre los límites permisibles.

Tabla 43. Resultados tubería absorbente en un colector

**Material: Cobre tipo L.
Longitud: 6 m.
Diámetro: ½”.**

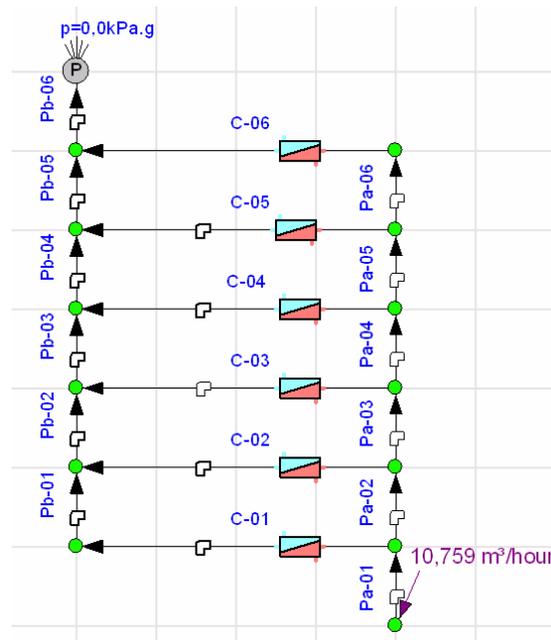
Nombre	Flujo	Velocidad	ΔP
	m ³ /hr	m/seg	kPa
T-01	0.245	0.484	1.872
T-02	0.193	0.383	1.242
T-03	0.150	0.296	0.803
T-04	0.114	0.226	0.507
T-05	0.087	0.172	0.321
T-06	0.069	0.137	0.218
T-07	0.079	0.157	0.274
T-08	0.069	0.137	0.218
T-09	0.087	0.172	0.321
T-10	0.114	0.226	0.507
T-11	0.150	0.296	0.803
T-12	0.193	0.383	1.242
T-13	0.245	0.484	1.872

Los anteriores resultados corresponden al flujo que pasa por cada uno de los tubos de cobre de un colector, donde se observa que la mayor cantidad del flujo que entra se va por los tubos de los extremos, disminuyendo a medida que se acerca al medio, mostrando los menores resultados para los tubos T-06, T-07 y T-08. Para este caso no se realizaron variaciones de diámetro debido a que los tubos de cobre del colector según el numeral 6.5.3 debe ser de ½” y cualquier variación de diámetro en los tubos de PVC ubicados en el espacio entre los tubos de cobre, muestra resultados insignificantes, que se deben a la poca longitud de estos, tampoco se adicionaron válvulas de equilibrado ya que el efecto en los costos sería muy significativo. Por estas razones se considero que la distribución del flujo a través de un colector no es significativa para el sistema de calentamiento.

Luego de realizar la simulación para un colector, se calculo la distribución de flujo para secuencias de 6 y 10 colectores en paralelo, fijando los flujos en

10.759 m³/h y 17.932 m³/h respectivamente, que corresponden al flujo necesario para un colector 1.793 m³/h multiplicado por el número de colectores en la secuencia.

Figura 37. Red Hidráulica de una secuencia de 6 colectores en paralelo



Pa: Tuberías de abastecimiento para los colectores

Pb: Tuberías de recolección en los colectores

C: Tubería que simula el comportamiento en un colector solar

En la figura anterior se observan componentes de pérdida de presión, los cuales fueron utilizados para simular el comportamiento de cada colector. A cada componente se le fijó una caída de presión igual a 5.41 KPa, resultado obtenido de la simulación de la red hidráulica de un colector, con el fin de determinar la distribución de flujo en secuencias de 6 y 10 colectores.

Tabla 44. Resultados tuberías de abastecimiento y recolección. S-6

Material: PVC ANSI Sch 40.

Nombre	Diámetro	Longitud	Flujo	Velocidad	ΔP
		M	m³/hr	m/seg	kPa
Pa-01	2"	0.1	10.76	1.57	0.046
Pa-02	2"	1.5	8.929	1.303	1.475
Pa-03	2"	1.5	7.132	1.041	0.956
Pa-04	2"	1.5	5.368	0.783	0.554
Pa-05	1½"	1.5	3.604	0.879	0.888
Pa-06	1"	1.5	1.82	1.09	1.443
Pb-01	1"	1.5	1.83	1.096	1.491
Pb-02	1½"	1.5	3.627	0.885	0.883
Pb-03	2"	1.5	5.391	0.787	0.558
Pb-04	2"	1.5	7.155	1.044	0.962
Pb-05	2"	1.5	8.939	1.305	1.478
Pb-06	2"	0.1	10.76	1.57	1.808

Los anteriores resultados corresponden al flujo que pasa por las tuberías de abastecimiento y recolección en los colectores, ubicadas a los costados de la figura anterior. Donde se puede observar que las velocidades y caídas de presión no sobrepasan los límites permisibles.

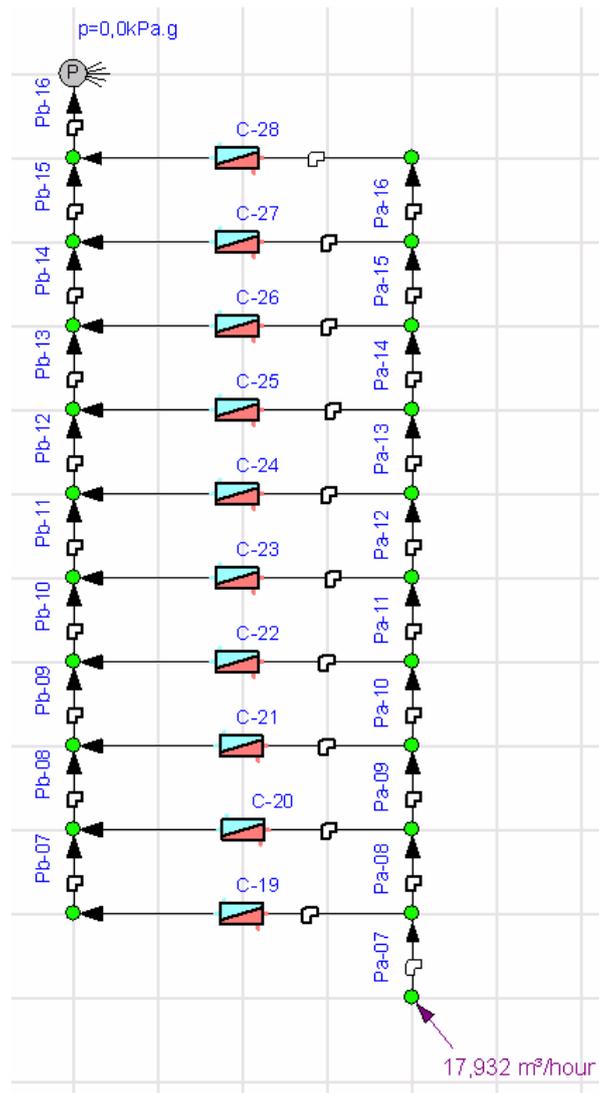
Tabla 45. Resultados para 6 colectores en paralelo.

Nombre	Flujo	Velocidad	ΔP
	m ³ /hr	m/seg	kPa
C-01	1.83	1.096	5.39
C-02	1.797	1.077	5.41
C-03	1.764	1.057	5.33
C-04	1.764	1.057	5.34
C-05	1.784	1.069	5.41
C-06	1.82	1.09	5.45

Como se ha mencionado anteriormente el flujo de agua necesario para retirar el calor absorbido por un colector es 1.793 m³/hr, y para garantizar un valor

aproximado en cada uno de los colectores de la secuencia, se redujo el diámetro de las tuberías de abastecimiento Pa-05, Pa-06 y recolección Pb-01, Pb-02. En la tabla anterior se puede observar la proximidad de los resultados del flujo y caída de presión.

Figura 38. Red hidráulica de una secuencia de 10 colectores en paralelo.



A continuación se muestran los resultados para una secuencia de 10 colectores en paralelo, para este caso fue necesario realizar una mayor cantidad de modificaciones con el fin de lograr un valor aproximado para el flujo en cada colector.

Tabla 46. Resultados tuberías de abastecimiento y recolección. S-10

Nombre	Diámetro	Longitud	Flujo	Velocidad	ΔP
		m	m ³ /h	m/seg	kPa
Pa-07	2½"	0.1	17.93	1.823	0.362
Pa-08	2½"	1.5	16.08	1.635	2.075
Pa-09	2½"	1.5	14.39	1.463	1.672
Pa-10	2½"	1.5	12.65	1.286	1.302
Pa-11	2½"	1.5	10.84	1.103	0.966
Pa-12	2½"	1.5	9.013	0.916	0.676
Pa-13	2"	1.5	7.172	1.047	1.049
Pa-14	1½"	1.5	5.343	1.303	1.89
Pa-15	1¼"	1.5	3.606	1.212	1.763
Pa-16	1"	1.5	1.882	1.127	1.349
Pb-07	1"	1.5	1.848	1.107	1.304
Pb-08	1¼"	1.5	1.898	1.189	2.037
Pb-09	1½"	1.5	5.282	1.288	1.8
Pb-10	2"	1.5	7.088	1.034	1.185
Pb-11	2½"	1.5	8.918	0.907	0.740
Pb-12	2½"	1.5	10.76	1.094	0.952
Pb-13	2½"	1.5	12.59	1.28	1.29
Pb-14	2½"	1.5	14.32	1.475	1.657
Pb-15	2½"	1.5	16.05	1.632	2.067
Pb-16	2½"	1.5	17.93	2.617	5.627

En la tabla anterior se pueden observar las variaciones en el diámetro que se realizaron para obtener los siguientes valores aproximados

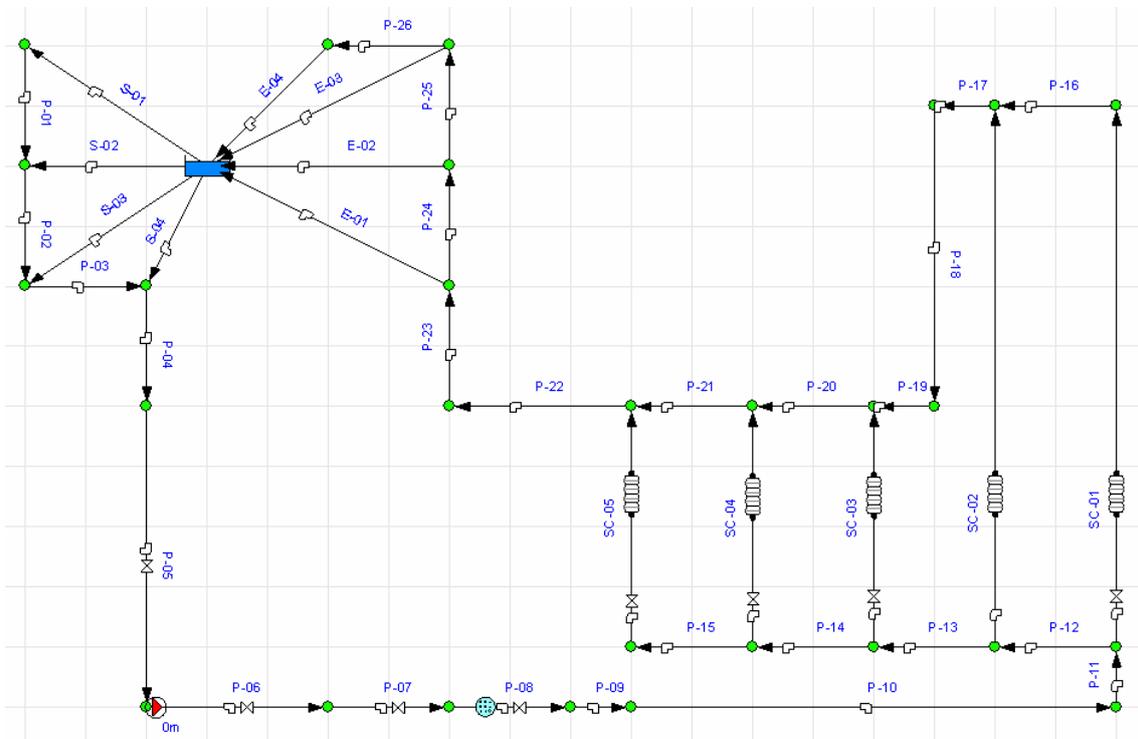
Tabla 47. Resultados para 10 colectores en paralelo.

Nombre	Flujo	Velocidad	ΔP
	m ³ /hr	m/seg	kPa
C-01	1.84	1.107	5.88
C-02	1.692	1.014	4.74
C-03	1.741	1.043	5.11
C-04	1.806	1.082	5.61
C-05	1.83	1.097	5.83
C-06	1.841	1.103	5.89
C-07	1.829	1.096	5.81

C-08	1.736	1.04	5.2
C-09	1.725	1.033	5.09
C-10	1.882	1.127	5.8

Luego los resultados de caída de presión obtenidos en las simulaciones de las secuencias de 6 y 10 colectores en paralelo 12.57 KPa y 24.54 KPa respectivamente, se emplearon para calcular la distribución del flujo en el sistema completo.

Figura 39. Red hidráulica del sistema completo.



S: Tubería de salida de la piscina.

P: Tubería general para conducir el fluido a los componentes.

SC: Tubería que simula el comportamiento en una secuencia de colectores en paralelo

E: Tubería de entrada a la piscina.



Componente de pérdida de presión, simulado para una secuencia de 6 (SC-05, SC-04 y SC-03) y 10 (SC-02 y SC-01) colectores en paralelo.

-  Componente de pérdida de presión, simulado para el filtro.
-  Componente de adición de presión (Bomba)

Tabla 48. Resultados tuberías generales del sistema

Nombre	Diámetro	Longitud	Flujo	Velocidad	ΔP
		m	m ³ /hr	m/seg	kPa
P-01	4"	7.2	0.710	0.027	0.001
P-02	4"	6	3.297	0,124	0.025
P-03	4"	11.9	14.410	0.540	0.572
P-04	4"	17.5	68.140	2.554	16.1
P-05	3"	0.1	68.140	4.446	17.49
P-06	2"	1.32	68.140	*9,944	121.7
P-07	3"	2.925	68.140	4.446	51.46
P-08	3"	2.51	68.140	4.446	30.330
P-09	3"	35.34	68.140	4.446	114.1
P-10					
P-11	3"	0.2	68.14	4.446	18.48
P-12	3"	6	50.21	3.276	12.08
P-13	3"	6	32.28	2.106	5.217
P-14	3"	6	21.52	1.404	2.423
P-15	3"	6	10.76	0.702	0.660
P-16	3"	6	17.930	1.170	1.719
P-17	3"	12	35.860	2.340	12.74
P-18					
P-19					
P-20	3"	6	46.620	3.042	10.49
P-21	3"	6	57.380	3.744	15.580
P-22	3"	5	68.140	4.446	19.76
P-23	3"	2	68.140	4.449	14.13
P-24	3"	11.3	13.71	0.894	*19.74
P-25	3"	24.2	1.9	0.124	0.089
P-26	3"	5	0.376	0.025	0.001

En la tabla anterior se observa que en la tubería P-06, la cual corresponde a la descarga de la bomba, la velocidad sobrepasa los 5 m/s (9.944 m/s), para este punto se trabajar con esta velocidad ya que la presión en la tubería (53 psi) no

sobrepasa el límite para el PVC de 125 psi, que es la tubería con la cual se diseñó el sistema.

Tabla 49. Resultados tuberías de entrada y salida de la piscina

Longitud: 10 cm.

Nombre	Diámetro	Flujo	Velocidad	ΔP
		m³/hr	m/seg	kPa
E-01	3"	54.43	3.552	*19.65
E-02	3"	11.81	0.770	0.091
E-03	3"	1.524	0.099	0.002
E-04	3"	0.376	0.025	0
S-01	4"	0.71	0.027	0
S-02	4"	2.587	0.097	0.001
S-03	4"	11.12	0.417	0.026
S-04	4"	53.73	2.014	0.598

Tabla 50. Resultados secuencia de colectores en el sistema

Nombre	Flujo	Velocidad	ΔP
	m³/hr	m/seg	kPa
SC-01	17.93	1.823	24.54
SC-02	17.93	1.823	24.54
SC-03	10.76	1.57	12.57
SC-04	10.76	1.57	12.57
SC-05	10.76	1.57	12.57

Para fijar los flujos requeridos en cada secuencia de colectores, 17.93 m³/hr en las secuencias de 10 y 10.76 m³/hr en las secuencias de 6, se adicionaron válvulas. Estas válvulas además controlan la operación en caso de presentarse obstrucciones o fallas en el sistema, en la instalación será necesario incorporar manómetros luego de estas válvulas para informar si la presión del sistema es correcta y en caso contrario abrir o cerrar para equilibrar el sistema. A continuación se muestra una tabla de resultados con la información sobre las válvulas.

Tabla 51. Resultados de presión en las válvulas de equilibrado

Nombre	Flujo	Presión de salida	ΔP
	m³/hr	KPa	kPa
FCV-01	17.93	92.23	10.36
FCV-02	10.76	65.85	22.65
FCV-03	10.76	55.36	30.72
FCV-04	10.76	39.77	45.64

ANEXO 11. PLANO DE TUBERÍAS DE LA SECCIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES

Revisar el formato A2 adjunto al final del documento

ANEXO 12. SOPORTE DIGITAL

Ver archivos de las simulaciones realizadas en el CD adjunto

ANEXO 13. DETALLE DE LAS INVERSIONES

Tabla 52. Detalle de las inversiones en maquinaria y accesorios

Accesorios					
Tipo	Material	Diámetro	Und	\$/Und	Costo (\$)
Codos	PVC	3"	10	21.170	211.700
	PVC	2"	3	6.298	18.894
	PVC	1 ½ "	2	1.070	2.140
	PVC	1"	122	1.070	130.540
Subtotal Codos					363.274
Tees	PVC	3"	10	27.385	273.850
	PVC	2 ½ "	12	19.698	236.376
	PVC	2"	8	8.048	64.384
	PVC	1 ½ "	6	5.053	30.318
	PVC	1 ¼ "	2	3.849	7.698
	PVC	1"	507	2.071	1.049.997
Subtotal Tees					1.662.623
Contracción repentina	PVC	3 – 2 ½ "	6	9622	57.732
	PVC	3 - 1"	4	12540	50.160
	PVC	3 - 2"	4	9.622	38.488
	PVC	2 ½ -2"	5	4329	21.645
	PVC	2 -1 ½ "	6	2918	17.508
	PVC	2 ½ - 1"	20	4329	86.580
	PVC	2 - 1"	40	2.315	92.600
	PVC	1 ½ - 1"	20	1951	39.020
	PVC	1 ½ -1 ¼ "	2	1951	3.902
	PVC	1 ¼ - 1"	12	1022	12.264
	PVC	1 – ½ "	754	563	424.502
Subtotal Contracciones					844.401
Uniones	PVC	3"	9	11.262	101.358
	PVC	2 ½ "	5	9.177	45.885
	PVC	2"	2	2.315	4.630
	PVC	1 ½ "	2	1.412	2.824
	PVC	1 ¼ "	1	1.035	1.035

Proyecto de grado
Sistema de calentamiento con energía solar para climatizar la piscina de EAFIT

	PVC	1"	7	563	3.941
	PVC	½ "	0	218	0
Subtotal Uniones					159.673
Válvulas	Compuerta	2"	4	243.600	974.400
	Globo	2"	2	344.520	689.040
Tuberías					
Material	Diámetro	Metros	\$/Und	Costo (\$)	
PVC	3"	55,56	21786	1.210.449	
	2 ½ "	31,7	16314	517.159	
	2"	12,9	10065	129.843	
	1 ½ "	12	6559	78.704	
	1 ¼ "	2,5	5028	12.569	
	1"	43,63	2792	121.822	
Cobre	½ "	2262	10440	23.615.280	
Subtotal Tuberías					25.685.826
Laminas					
Material	Espesor	m²	\$/m²	Costo (\$)	
Cobre	1 mm	226,2	25.364	5.737.437	
Bomba Hidráulica					
Tipo		KW	Und	Costo (\$)	
Centrifuga		11,47	1	\$ 1'660,455	
Otros					
Tipo		Unidad	\$/Und	Costo (\$)	
Manta Térmica		1	2030000	2'030.000	
Termo control		1	1950000	1'950.000	
Medidores de presión		2	120000	240.000	
Válvula rompedor de vació		1	50000	50.000	
Extensión de la superficie de los camerinos		30'000.000			
Otros		1'122.000			
Total			\$ 73'169.129		

ANEXO 14. CARACTERÍSTICAS DE LA VÁLVULA DE CONTROL

Sensor + controlador

Termoresistencia	Tipo RTD-PT-100
Marca:	Golink
Bulbo	: Acero inoxidable 304 desde 1" hasta 10" de Longitud X ¼" de diámetro
Conexión	: ¼" o ½" NPT macho
Rango	: 0-80°C
Conexión eléctrica:	Cabezal estándar en aluminio
Salida	: 3 hilos recubiertos en Teflón

Segunda parte: elemento final de control (electrovalvula)

Electroválvula ON-OFF Marca OMAL (Italia) REF: VIP;
Con actuador eléctrico 5/2 Marca BOSCH

Características de Diseño

Diámetro Nominal	: 3"
Cuerpo	: Bronce recubierto con Aleación Ni-Plata
Rango	: 150 PSI (10 BAR)
Caudal máximo	: 69 m ³ /h
Conexión a proceso:	Rosca NPT Macho
Actuador eléctrico	: Tipo solenoide 2 vías.
Alimentación	: 110 V AC.

11 BIBLIOGRAFÍA Y CIBERGRAFÍA

- 1 AYUDASENERGIA. Piscinas con energía solar. Disponible en: <http://www.ayudasenergia.com/energia-termica/piscinas/piscina-con-energia-solar.html>. Consulta: 15 de marzo de 2007
- 2 MODULO DE LA ENERGIA SOLAR. Universidad Pontificia Bolivariana. Isaac Pilatowsky Figueroa. Medellín, Colombia, Febrero, 2006
- 3 ENERGÍA SOLAR TÉRMICA. Calentamiento del agua de las piscinas. Disponible en: <http://www.cecucolombiana.org/campanas/medio%20ambiente/res%20y%20rue/htm/dossier/3%20solar%20termica.htm>. Consulta: 28 de febrero de 2007
- 4 RENEWABLE Energy. Solar water heaters for swimming pools. Disponible en: <http://www.infinitepower.org/pdf/FactSheet-21.pdf> Consulta: 21 de Febrero 2007.
- 5 MONTIEL, Alberto. 2006. [Online]. Sistemas solares térmicos en instalaciones colectivas. Disponible en: <http://www.tinet.org/~ftarraco/edificacio9solartermcolectivas>. Consulta: 23 de junio 2006
- 6 FERNANDEZ, Pedro. Colectores de placa plana. Disponible en <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/EnergiasAlternativas/solar/PDFs/Solar3%20.pdf> Consulta: 22 de marzo de 2007
- 7 IDEAM. Información temática. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/atlas/index4.htm>, consulta: 5 de enero 2007.
- 8 Mapas de Medellín y sus corregimientos. Disponible en: http://www.medellin.gov.co/alcaldia/jsp/modulos/V_medellin/mapasciudad1.jsp?idPagina=951, Consulta: 5 de enero 2007.
- 9 . MAPA EAFIT, Medellín, Colombia Disponible en: Google Earth
- 10 TUTIEMPO. Datos climáticos. Disponible en: http://www.tutiempo.net/clima/Medellin_Olaya_Herrera/12-2006/801100.htm Fecha de infreso 26 de febrero de 2007
- 11 IDEAM. "DECRETO No. 1594 DEL 26 DE JUNIO DE 1984" Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/legal/decretos/1980/d1594-1984.htm> , consulta: 2 de septiembre 2006.

- 12** INFOJARDIN. “Mantenimiento de Piscinas”. Disponible en:
http://www.infojardin.com/articulos/piscinas_consejos_mantenimiento_2.htm,
consulta: 11 de Diciembre de 2006.
- 13** COMERCIAL KENCH S.L. Aguas de piscinas, disponible en:
<http://www.comercialkench.com/proddetail.php?prod=0509> , consulta: 20 de agosto 2006.
- 14** CORFINSURA. Disponible en:
[www.corfinsura.com/InvEconomicas/\(xx2suhumx1zchlyvp0ipbbuu\)/Indicadores/EconomicosHijos.aspx?Id=32&C](http://www.corfinsura.com/InvEconomicas/(xx2suhumx1zchlyvp0ipbbuu)/Indicadores/EconomicosHijos.aspx?Id=32&C), consulta: 15 de agosto 2006
- 16** Textos científicos. Montaje de los colectores solares. Disponible en:
<http://www.textoscientificos.com/energia/calentador-solar/montaje-colectores-solares> , Consulta: 25 de enero 2007
- 17.** PROCOBRE. “Tipos de colectores solares”. Disponible en:
www.procobre.org consulta: 11 de Diciembre 2006.
- 18** “Energía solar en la comunidad de Madrid”. Disponible en:
http://alumni.ipt.pt/~caria/pdfs/ENERGIA_termica.pdf consulta: 4 noviembre del 2006
- 19** GINER PEDRO. Calculo de cargas para el calentamiento del agua de las piletas. 6 de abril del 2004
- 20** Sill B.(1983) Free and forced convective effects on evaporation. J. Hydr. Eng. Asce 109(9): 1216.
- 21** Glaria j. (1995). Ecuaciones del aire. Informe interno, Dep. Electrónica, Universidad de santa María. Valparaíso, chile
- 22** Australian Standards (1997). Solar Heating systems for swimming pools. Standard 3634. North Sydney, Australia.
- 23** Smith C., G. Lof y R. Jones (1993). Energy Requirements and potential savings for heated indoor swimming pools. ASHRAE trans. 99(2): 864.
- 24** S. Medved, C. Arder, B. Cerne. Science@direct. A large-panel unglazed roof-integrates liquid solar collector-energy and economic evaluation SOLAR ENERGY 75 (2003) 455-467.
- 25.** Materiales en ambientes corrosivos. Disponible en:
www.mctca.com/informacion_corrosion.htm Consulta: 30 de octubre 2006.

26 TURTON R., BAILIE R, WHITING W., SHAEIWITZ J. (2003). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. New Jersey. Prentice Hall. Segunda edición.

27 ENERGY Efficiency and Renewable Energy. Siting a Solar Swimming Pool Heating System's Collector. Disponible en:
http://www.eere.energy.gov/consumer/your_home/water_heating/index.cfm/mytopic=13260 Consultado: 7 de Febrero del 2007.

28 Banco Agrario. Disponible en: www.bancoagrario.gov.co Consulta: 26 de marzo de 2007.

29 Empresas Publicas de Medellín E.S.P. Tarifas Disponible en:
<http://www.eppm.com/epmcom/contenido/tarifas/acueducto.htm> Consulta 1 de Febrero del 2007

30 Banco Agrario. Disponible en: www.bancoagrario.gov.co Consulta: 1 de febrero de 2007.

31. AQUAZONE. Todo para su piscina. Disponible en:
<http://www.aquazone.es/tienda> Consulta 09 de abril del 2007

32 ES ENERGIA SOLAR LTDA. Disponible en: www.esenergiasolar.com.
Consulta 1 de febrero de 2007.