

Design of a variable refrigerant flow air conditioning system based on solar energy

Diseño de un sistema de climatización de Flujo de Refrigerante Variable basado en energía solar

Juan Peralta-Jaramillo¹, Emérita Delgado-Plaza¹, Jorge Abad-Moran¹, Bryan Coello¹, Danilo Arévalo¹, Ian Sosa², Marco Flores³

¹ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Guayaquil, Ecuador, e-mail: jperal@espol.edu.ec, eadelgad@espol.edu.ec, jabad@espol.edu.ec, brymacoe@espol.edu.ec, danwlaire@espol.edu.ec

²Electrical Engineering Department, Instituto Tecnológico de Sonora, México e-mail: ian.sosa@itson.edu.mx

³Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), Honduras e-mail: marco.flores@unah.edu.hn

Abstract—The city of Guayaquil has registered an increase in environmental temperature with 34 °C and maximum of 38 °C in recent years. This increase in temperature in practice directly affects the design and installations of systems that allow maintaining the thermal comfort of existing buildings in the city.

The present article shows a case study of design to satisfy the need for cold through an air conditioning system for a building of the ESPOL Polytechnic University, through the design of a hybrid Variable refrigerant flow (VRF) system based on solar energy using the cooling load temperature difference method to calculate building thermal loads. Subsequently, the design of the hybrid system was carried out, based on the meteorological data of the area, due to area limitations it was not possible to fully supply the energy demand of the air conditioning system, so we proceeded to calculate the quantity of solar panels and photovoltaic system energy production

Finally, it was determined that the hybrid air conditioning system will be profitable, obtaining an NPV greater than zero, estimating a saving of \$ 21,821.27, during the useful life of the installation, in addition to an estimated reduction of CO₂ emissions of 1,111.16 Tons

Keywords— solar energy, climatization, variable refrigerant flow, sustainable building

Resumen- La ciudad de Guayaquil ha registrado un aumento de la temperatura ambiental con un 34 °C y picos de 38°C en los últimos años. Este incremento de la temperatura en la práctica afecta directamente en el diseño e instalaciones de sistemas que permitan mantener el confort térmico de las edificaciones existentes en la ciudad.

El presente trabajo muestra el caso de estudio del diseño de un sistema de climatización de frío, para una edificación de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), analizando como un sistema de volumen de refrigerante variable (VRF) híbrido, basado en energía solar. Se ha utilizado el método de diferencia de temperaturas para carga de enfriamiento con la finalidad de calcular las cargas térmicas del edificio. Seguidamente se realizó el diseño del sistema híbrido, a partir

de los datos meteorológicos de la zona del emplazamiento, debido a limitaciones de área no fue posible abastecer de manera completa la demanda energética del sistema de climatización, por lo que se procedió a calcular la cantidad de paneles solares y la producción de energía del sistema fotovoltaico

Finalmente, se determinó que el sistema de climatización híbrido es rentable, obteniendo un VPN mayor a cero. El sistema producirá un ahorro de \$21.821,27 durante la vida útil del proyecto, además una reducción estimada de las emisiones de CO₂ en 1,111.16 Toneladas.

Palabras Claves—Energía Solar, Climatización, volumen de refrigerante variable, edificación sostenible.

I. INTRODUCCIÓN

Debido al calentamiento global, en los últimos años se ha registrado un aumento considerable en las temperaturas ambientales a nivel mundial. En últimos años el incremento de la temperatura ambiental derivado al cambio climático ha provocado en los sectores urbanos un incremento en las necesidades de climatización, por ende, los sistemas de climatización deben ser renovados o reemplazados para cumplir las condiciones de confort. [1]

Debe señalarse, que la climatización de edificaciones es un aspecto fundamental para el mejoramiento de las condiciones higrotérmicas, de calidad del aire, de iluminación y acústicas, contribuyendo de forma directa a la seguridad ocupacional y salud pública. En esta perspectiva, se hace necesario la implementación de sistemas de climatización que garanticen condiciones térmicas óptimas que permitan obtener el máximo confort térmico posible. Sin embargo, estas mejoras producen un incremento en el consumo eléctrico por el uso de estos sistemas.

Por otra parte, a nivel mundial se logrado importantes avances en la migración de fuentes renovables siendo el sector eléctrico el de mayor relevancia, en comparación con la calefacción y

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.502>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

refrigeración y el transporte, Fig. 1. En este escenario resulta prioritario desarrollar estrategias para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad energética en el uso térmico de la energía, incluyendo la generación de iniciativas que incorporen las energías renovables en el desarrollo de soluciones de climatización. [2]

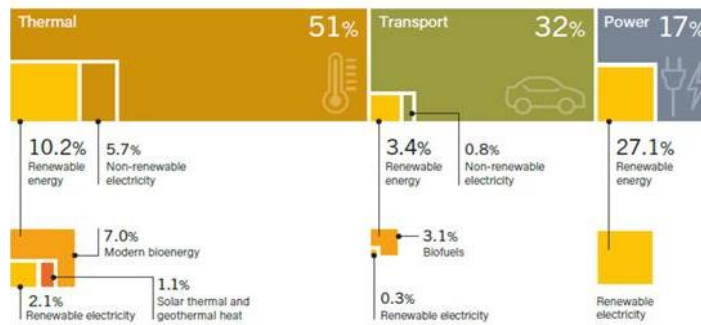


Fig 1. Uso Finales de la Energía

Por ende, es necesario buscar un equilibrio desde el punto de vista técnico, social y ambiental para el desarrollo de sistemas de climatización que consideren que consideren criterios de sostenibilidad y contribuyan a la resiliencia urbana en base a lo establecido en los objetivos de desarrollo sostenible. [3]

Por otra parte, los sistemas de climatización brindan una oportunidad para la innovación e implementación de energías renovables, como fuente auxiliar y/o complementaria de generación de energía para estos sistemas, reduciendo los costos energéticos y las emisiones de CO₂. Por otro lado, estudios realizados en Alemania y replicados en México han demostrado que mientras la fracción de energía solar utilizada sea menor al 80%, el sistema será rentable. [4, 5]

Un punto importante para recalcar es que Ecuador posee una matriz energética basada en combustibles fósiles e hidroenergía, sin embargo, el plan nacional de desarrollo establece la necesidad de migrar a una matriz sostenible que permita la integración de fuentes renovables de energía. Por consiguiente, los sistemas de climatización pueden emplear soluciones energéticas que permita el fomento de la sostenibilidad energética en el marco de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). [3, 6, 7]

II.PROBLEMÁTICA

Cabe considerar, que la ciudad de Guayaquil posee un clima tropical mega térmico seco en cualquier época del año, con una temperatura media anual histórica de 25.2°C. Debido al calentamiento global, en los últimos años, este valor ha incrementado alcanzando los 26.2°C como valor medio anual y temperaturas máximas de 34.8°C. [8, 9, 10]

Desde una perspectiva más general, este aumento de temperatura representa un riesgo para la salud y conlleva una reducción del desempeño de actividades humanas (laboral,

educativo, entre otros) que se puede traducir en pérdidas económicas y afectaciones a la salud ocupacional. [11, 12] Debe señalarse, que la Escuela Superior Politécnica del Litoral, en el marco de los ODS, ha establecido un programa integral de sostenibilidad para la administración y manejo del Campus “Gustavo Galindo” con el fin de realizar contribuciones activas para abordar la dimensión ambiental y coordinar acciones en las dimensiones económica y social con las distintas facultades y unidades que conforman la institución. En este sentido, uno de los puntos claves de actuación es la implementación o adecuación de sus edificios bajo un modelo de sostenibilidad basado en la arquitectura bioclimática.

III.DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

La ESPOL campus “Gustavo Galindo” se encuentra ubicada en la ciudad de Guayaquil; en el Km. 30½ de la Vía Perimetral, cuenta con un aproximado de 724 hectáreas, de las cuales 570 son consideradas bosque protector juntos al área protegida de la Prosperina que colindan con el cerro Azul y el cerro Blanco, correspondiente a la cordillera Chongón, Fig. 2. [13, 14]



Fig. 2 Campus “Gustavo Galindo” ESPOL

II.CONDICIONES AMBIENTALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los datos referenciales de las condiciones climáticas de la zona fueron tomados de la Estación Meteorológica ubicada en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción en el campus Gustavo Galindo de la ESPOL desde el 2008, ubicada en las coordenadas 2°07'32"S y 79°50'48"O. La adquisición de datos se realiza cada segundo y luego son promediados a valores diez-minutales. [15]. En la tabla 1, se presenta un resumen mensual de los datos climáticos registrados por la estación.

De acuerdo con los requerimientos de parámetros de diseño de un sistema de climatización [16] ,se deberá analizar los siguientes parámetros:

- La temperatura del aire exterior es un factor importante para un correcto diseño de una solución de climatización, se empleará la temperatura de bulbo seco que tiene un valor de 34.7 °C (media máxima anual.)
- La humedad relativa es la presencia de vapor de agua en cierta cantidad de aire, correspondiente a una media máxima anual de 85% para la ubicación del edificio
- Finalmente, se ha considerado la presión atmosférica para la ciudad de Guayaquil presenta un valor promedio de 1012 hPa.

TABLA I
RESUMEN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Mes	Temperatura ambiental (°C)	Humedad (%)	Insolación global (W/m ²)	Velocidad de Viento (m/s)
ene	25.5	79.7	136.2	1.4
feb	25.6	85.7	157.7	1.2
mar	26.5	79.3	185.7	1.4
abr	26.6	79.2	186.6	1.4
may	25.9	76.0	171.8	1.9
jun	24.8	77.0	144.3	2.1
jul	24.1	77.0	143.9	2.5
ago	23.6	76.8	159.6	2.9
sep	23.8	74.8	189.4	3.1
oct	23.7	73.7	186.4	3.0
nov	23.9	72.1	175.2	2.8
dic	25.3	71.1	144.0	2.1

III. EDIFICACIÓN

La edificación seleccionada para la realización del proyecto es el bloque 9B del campus Prosperina de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, el edificio está constituido por dos plantas con un área de construcción de 30m x 28.4 m (área de 852m²). En la Fig. 3, se muestra una vista aérea de la edificación.



Fig. 3. Ubicación geográfica de la edificación (Google Earth)

El edificio tiene la siguiente distribución: 6 aulas para actividades de docencia, 2 laboratorios de computación y 3 espacio para actividades administrativas y de cogobierno estudiantil.

IV. MARCO TEÓRICO

Confort Térmico

El término confort térmico está relacionado con los parámetros que intervienen para que una persona tenga una sensación de satisfacción, en el medio en el que se encuentra. ASHRAE establece que; para un llegar al confort térmico la temperatura de bulbo seco debe situarse entre los rangos de 21°C a 28°C con una humedad relativa del 30% al 70%. [17]

Cargas térmicas

Las cargas térmicas del edificio se determinan a partir del método de Diferencia de Temperaturas para Carga de Enfriamiento denominado en sus siglas en inglés CLDT (Cooling Loading Difference Temperature), para esto es necesario conocer ciertos parámetros tales como; condiciones ambientales, ubicación del edificio, materiales de la edificación, entre otros. Adicionalmente es necesario conocer las condiciones de confort térmico acorde a la actividad que se realizara al interior del edificio.

Sistema de Volumen de refrigerante variable

Los sistemas de Volumen de refrigerante variable o más conocido por sus siglas en inglés VRF, consiste en una unidad exterior que utiliza el aire exterior para condensar el líquido refrigerante y así distribuirlo a las diferentes unidades interiores. Por medio de las válvulas de expansión electrónicas este sistema regula la cantidad de refrigerante que necesita cada unidad interior. La ventaja principal de este sistema en comparación con los Split, es que el sistema VRF permite conectar una unidad exterior a más de dos unidades interiores que funcionan de manera independiente, lo que implica un ahorro energético en comparación a los otros sistemas de climatización existentes

Los sistemas VRF se clasifican en 2 tipos básicos, siendo: los sistemas de Bomba de calor (Heat Pump) y los sistemas de Recuperación de calor (Heat Recovery). Se diferencia por el manejo de la dirección de flujo y la capacidad de generar frío y calor [17]

Sistemas híbrido basado en energía solar

Considerando las fluctuaciones de la irradiación solar, un sistema basado únicamente en una solución energética fotovoltaica demandaría una gran cantidad de baterías y un gran número de paneles solares, haciendo que los costos incrementen. Sin embargo, la mayoría de los autores en el campo de la arquitectura sostenible sugieren la implementación de sistemas híbridos como solución más económica y viable en varios países de Europa. Asimismo, un estudio similar se replicó en México y como resultado se obtuvo un ahorro

energético del 44 %. Por otra parte, varios estudios en la región han estimado una fracción de energía solar límite que se puede emplear en los sistemas de climatización del 80%, valores superiores a esta fracción de la energía conllevaría que el sistema sea inviable económicamente. [18, 19, 20]

V.METODOLOGÍA

Requerimientos de diseño

En primer lugar, es necesario conocer las condiciones ambientales exteriores de la edificación y las condiciones de confort térmico esperadas. En la tabla 2 y 3 se presentan las condiciones de diseño a ser consideradas. [20]

TABLA II

PARÁMETROS AMBIENTALES DE DISEÑO

Parámetro	Valor
Temperatura de bulbo seco (°C)	34.7
Humedad relativa (%), Max	95
Presión atmosférica (hPa)	1015
Altitud (m)	13.2

TABLA III

PARÁMETROS DE CONFORT INTERIOR DE DISEÑO

Parámetro	Valor
Temperatura de bulbo seco (°C)	22
Humedad relativa (%)	50

Por otra parte, como complemento del análisis de confort térmico se ha utilizado el diagrama bioclimático de Olgay a partir de las condiciones climáticas de la zona de estudio, con el fin de conocer de forma referencial si es posible una solución pasiva de bioclimática, para ello, se ha utilizado la herramienta BcChart v2.1. [21] Los resultados obtenidos del análisis de la carta bioclimática sugieren el empleo de alguna técnica de refrigeración evaporativa directa, con un 68% del tiempo con necesidad de ventilación. (Fig. 4)

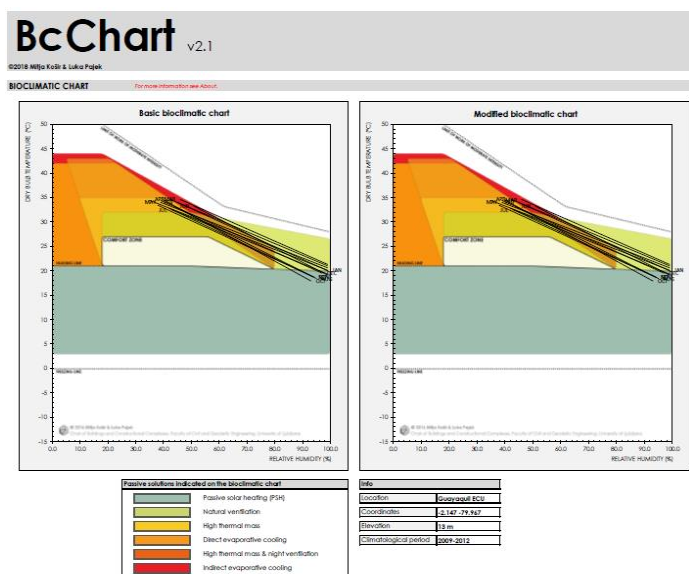


Fig. 4 . Análisis bioclimático básico para la ubicación de edificio creado con BcChart v2.0

Cálculo de carga térmica

El edificio recibe calor de diversas fuentes, entre estas fuentes podemos citar:

1. Conducción de calor a través de estructura exteriores (paredes, techo, vidrios).
2. Radiación solar a través de las ventanas.
3. Iluminación.
4. Personas
5. Equipos Eléctricos
6. Infiltración o suministro de aire exterior.

Dichas fuentes pueden otorgar ganancias de calor sensible provocando un aumento en la temperatura o calor latente produciendo un incremento en los niveles de humedad del recinto, las paredes en los exteriores 1,2 y 3 involucra una ganancia de calor sensible, y las paredes exteriores 4, 5 y 6, y ventanas puede tener parte de calor sensible y latente. En la tabla 4 y 5, se muestran las ganancias de calor sensible y latente obtenidas para el edificio. Para el cálculo de carga térmica se considera el mes y la hora más crítica del año para obtener la mayor ganancia de calor del edificio, para el análisis se considera el mes de marzo a las 12AM. Para determinar la carga térmica de conducción a través de estructuras exteriores se utiliza la ecuación 1:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{CEe} \quad (1)$$

Q: Ganancia de calor [Btu/h]

U: Coeficiente general de transferencia de calor [BTU/h-ft²-°F]

A= Área de la estructura exterior [ft²]

ΔT_{CEe}: Diferencia de temperatura para carga de enfriamiento corregido [°F]

TABLA IV

GANANCIAS DE CALOR EN LA PLANTA ALTA

Tipo	ancho (m)	alto (m)	orientación	material	Área (ft ²)	Q (BTU/h)
aula 9ba103						
pared exterior 1	10.80	3.35	NNE	bloque 8in	246.62	3183.41
pared exterior 2	7.10	3.35	WNW	bloque 8in	255.93	2099.83
ventana 1	7.80	1.70	NNE	vidrio sencillo	142.68	3688.84
techo	10.80	6.77	-	concreto ligero 6in	786.73	2003.20
oficina de profesores						
pared exterior 3	7.29	3.35	WNW	bloque 8in	262.78	2156.02
techo	10.80	6.77	-	concreto ligero 6in	786.73	2003.20

aula 9ba104						
pared exterior 4	7.20	3.35	WNW	bloque 8in	259.53	2129.41
pared exterior 5	10.80	3.35	SSW	bloque 8in	246.62	1830.14
ventana 5	7.80	1.70	SSW	vidrio sencillo	142.68	3688.84
techo	10.80	6.87	-	concreto ligero 6in	798.35	2032.79
aula 9ba105						
pared exterior 6	10.60	3.35	SSW	bloque 8in	223.92	1661.66
ventana 6	8.65	1.70	SSW	vidrio sencillo	158.23	4090.83
techo	10.60	7.80	-	concreto ligero 6in	889.64	2265.23
asociación de estudiantes						
pared exterior 7	10.80	3.35	SSW	bloque 8in	215.42	1598.58
pared exterior 8	8.70	3.35	ESE	bloque 8in	313.60	4293.85
ventana 7	10.10	1.60	SSW	vidrio sencillo	173.88	4495.60
techo	10.80	8.56	-	concreto ligero 6in	994.74	2532.85
aula 9ba101						
pared exterior 9	11.04	3.35	ESE	bloque 8in	397.95	5448.75
pared exterior 10	10.80	3.35	NNE	bloque 8in	202.72	2616.73
ventana 10	10.20	1.70	NNE	vidrio sencillo	186.58	4823.87
techo	11.04	10.69	-	concreto ligero 6in	1269.87	3233.39
aula 9ba102						
pared exterior 11	10.80	3.35	NNE	bloque 8in	211.33	2727.85
ventana 11	9.73	1.70	NNE	vidrio sencillo	177.98	4601.60
techo	10.80	10.54	-	concreto ligero 6in	1224.83	3118.72

TABLA V
GANANCIAS DE CALOR EN LA PLANTA BAJA

Tipo	ancho (m)	alto (m)	orientación	material	área (ft ²)	Q (btu/h)
aula ppl 1						
pared exterior 1	10.80	3.30	NNE	bloque 8in	383.00	4950.13
pared exterior 2	21.55	3.30	WNW	bloque 8in	765.00	6278.31
pared exterior 3	10.80	3.30	SSW	bloque 8in	323.00	2400.26
ventana 3 (3 ventanas)	1.55	1.20	SSW	vidrio sencillo	60.00	1552.32
aula ppl 2						
pared exterior 4	10.80	3.30	SSW	bloque 8in	323.45	2400.26
pared exterior 5	10.80	3.30	NNE	bloque 8in	383.49	4950.13
ventana 4 (3 ventanas)	1.55	1.20	SSW	vidrio sencillo	60.04	1552.32
laboratorio delta						
pared exterior 6	10.80	3.30	SSW	bloque 8in	209.60	1555.46
pared exterior 7	7.80	3.30	ESE	bloque 8in	276.96	3792.20
ventana 6	10.10	1.60	SSW	vidrio sencillo	173.88	4495.60
sala profesores						
pared exterior 8	3.55	3.30	NNE	bloque 8in	68.70	886.83
ventana 8	3.33	1.60	NNE	vidrio sencillo	57.33	1482.21

Carga térmica por Iluminación

La iluminación del área a climatizar genera una ganancia de calor para el recinto, para determinar esta ganancia de calor debido a iluminación se considera la densidad de potencia de iluminación que es de 0.81 W/ft² para universidades, esta carga se estima por medio de la ecuación 2:

$$Q = 3.4 \cdot LPD \cdot A \quad (2)$$

Donde:

Q= Ganancia de calor debido a iluminación BTU/h

LPD= Densidad de potencia de iluminación W/ft²

A= Área del recinto ft²

Carga térmica por Personas

La ganancia de calor por personas se clasifica en calor sensible y latente, la ASHRAE establece que para un trabajo de oficina moderado sentado, se obtiene una ganancia de calor sensible de 250 BTU/h por persona, y una ganancia de calor latente de 200 BTU/h por persona (ecuación 3). [22]

$$Q_s = q_s \cdot n \quad (3)$$

Donde:

Q_s = Calor sensible BTU/h

q_s = ganancia de calor sensible BTU/h

n = número de personas

El calor latente se estima a través de la ecuación 4

$$Q_l = q_l \cdot n \quad (4)$$

Donde; q_l es el calor latente.

Carga térmica debido a equipos eléctricos

La ganancia térmica generada por los equipos electrónicos se puede estimar por medio de la ecuación 5.

$$Q = 3.4 \cdot W \quad (5)$$

Donde:

Q = Ganancia neta de calor debido a equipos eléctricos BTU/h

W =Vatios de los equipos eléctricos W

Carga térmica debido a Ventilación mecánica

ASHRAE, considera la necesidad de renovación de aire para una calidad aceptable del aire interior, para cualquier edificación. Las infiltraciones de aire se desprecian cuando se inyecta aire por medio de un ventilador. De igual manera la carga térmica que se genera por la ventilación mecánica se estima por medio de la ecuación 6:

$$Q_s = 1.1 \text{ CFM} \cdot CT \quad (6)$$

Donde:

Q =Calor sensible debido a ventilación BTU/h

CFM =Flujo de aire de ventilación ft³/min

CT = Cambio de temperatura entre el aire exterior e interior

Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Número de paneles

El número de paneles a instalar para satisfacer de manera completa la demanda energética del sistema de climatización viene dado mediante la ecuación mostrada, la cual depende de la relación entre el consumo diario máximo y la radiación incidente para el mes con menor irradiación P , el rendimiento del panel R_{panel} y el área de captación del panel A .

$$P = \frac{E_d}{G_t} \quad (7)$$

$$N_p = \frac{1.1 \cdot P}{R_{panel} \cdot A} \quad (8)$$

Donde:

N_p = Número de paneles

E_d = Consumo diario [Kw. día]

G_t =Radiación incidente [$\frac{kWh}{m^2} \cdot dia$]

A = Área de captación [m^2]

Potencia fotovoltaica del sistema

Considerando que el área que se puede utilizar para la instalación del sistema de captación es limitada y los criterios

de diseño de sistemas híbridos de energía m la potencia que generaría el sistema se estima por medio de la ecuación (9), la cual depende del área de captación del panel A , el número de paneles N_p , la irradiación incidente $G_{(b,t)}$ y el número de paneles R_{panel} . [23]

$$E = (A \cdot N_p \cdot G(b, t) \cdot R_{panel})/1.1 \quad (9)$$

Donde

N_p = Número de paneles

E = Potencia diaria [Kw.día]

$G(b,t)$ =Irradiación incidente [$kWh/m^2 \cdot dia$]

A = Área de captación [m^2]

R_{panel} = Eficiencia del panel

Pérdidas por orientación

Un factor determinante en la producción de energía del sistema fotovoltaico es el ángulo acimutal, el cual es el ángulo entre el plano vertical que contiene al sol sobre el observador y el plano vertical del meridiano del observador, lo idóneo es que dicho ángulo sea cero, con vista al hemisferio opuesto a donde se encuentra instalado el sistema fotovoltaico [24],de igual manera, se determina un ángulo acimutal de -18° para la edificación, Las pérdidas por orientación fueron estimando empleando el programa PVsyst, tal como se muestra en la figura 5.

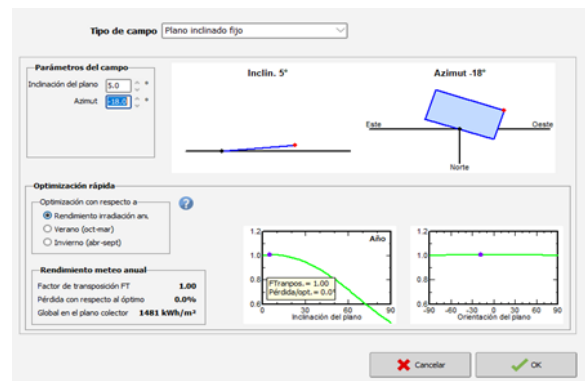


Fig. 5. Estimación de pérdidas por orientación

Distancia mínima entre paneles

El sistema de captación debe poseer una distancia mínima entre cada arreglo de paneles fotovoltaicos, con el fin de minimizar la generación de sombras entre arreglos contiguos, esta distancia depende de la longitud del panel L , la latitud y la inclinación de este, tal como se muestra en la ecuación 10.

$$d = l \cdot \sin(5^\circ) / \text{tg}(61^\circ - \lambda) \quad (10)$$

Donde.

d = Distancia entre arreglos [mm]

l = largo del panel solar [mm]

λ =Latitud

Análisis de sombra

La edificación se encuentra libre de obstáculos cercanos que puedan afectar en el rendimiento del sistema fotovoltaico. Sin embargo, la instalación condensadoras del sistema de climatización podrán afectar el rendimiento de producción de energía, derivado a la generación de sombras. Para el análisis de sombras, se empleó el programa PVsyst, identificando a enero como mes crítico, con pérdidas por sombras a partir de las 17h00 horas alcanzando el valor máximo de 0.1 a las 18h00, debido a que las pérdidas aparecen a partir de las 17h00, hora a partir de la cual la demanda energética del sistema de climatización se reduce considerablemente y que el valor máximo de perdidas no es elevado, se consideraron las perdidas por sombra como despreciables.

VI.RESULTADOS

Con relación al cálculo de la carga térmica del edificio, se consideró un ventilador con recuperación de energía (ERV) obteniendo una carga térmica de 903606 BTU/h, lo que implica representa un ahorro 20% de energía, en comparación al empleo de un ventilador normal.

Debe señalarse, que se utilizó el programa Hisense VRF para la selección de los equipos de climatización, siendo el parámetro de diseño ingresando la carga térmica de cada área obteniéndose el listado de equipos a utilizar tanto como unidades interiores y exteriores, los metros de tubería, accesorios para el sistema y la cantidad de carga de refrigerante adicional. En la tabla 6, se detalla los equipos capacidades y consumo de energía de los equipos seleccionados.

TABLA VI
CAPACIDAD Y CONSUMO DE LOS EQUIPOS DE CLIMATIZACIÓN

Tipo	Capacidad BTU/h	Consumo kW	Cantidad
Unidades Exteriores (Condensadoras)			
UC-1	382000	32.84	1
UC-2	286000	23.37	1
UC-3	232000	17.56	1
Unidades Interiores (Evaporadoras)			
CASSETTE	27300	0.06	12
CASSETTE	38220	0.13	4
CASSETTE	47770	0.13	2
MINI CASSETTE	12280	0.02	1
FANCOIL	21500	0.15	1
FANCOIL	38220	0.3	3
FANCOIL	76430	1.03	2
PISO TECHO	28660	0.07	1
PISO TECHO	38220	0.13	1

Por otra parte, el consumo total de potencia del sistema que corresponde al consumo de las unidades de condensadoras, evaporadoras y ventiladores es de 83.14 kW. La descripción representativa del sistema VRF se muestra en la Fig 6.

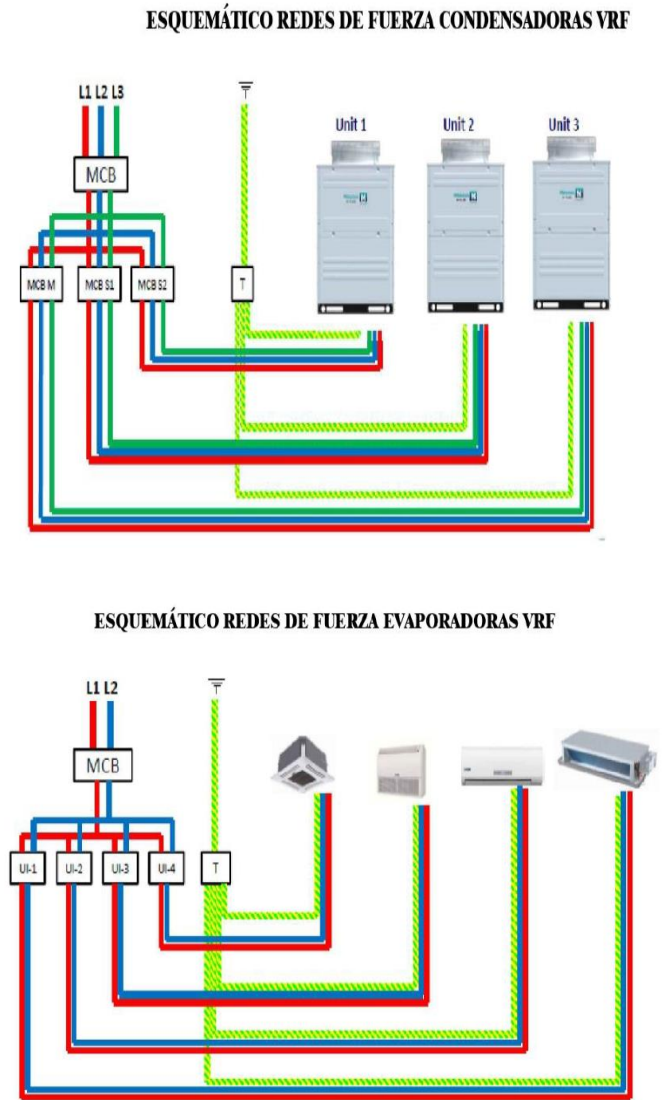


Fig. 6. Diagrama Unifilar del Sistema de Climatización

Costos del sistema de climatización

El costo total del sistema de climatización es de \$100,874.81, este valor corresponde al total de equipos incluido la instalación de estos. La inversión del sistema de ventilación mecánica con recuperación de calor corresponde a \$14,012.31 lo que equivale a un 14% del costo del sistema total.

Considerando el análisis descrito en el apartado de “Dimensionamiento del sistema fotovoltaico” se estima que para abastecer la demanda energética total del sistema de climatización se necesitan alrededor de 590 paneles. Sin embargo, por limitaciones en la infraestructura se decide cubrir una parte del porcentaje de la demanda energética del sistema equivalente al 43.6%, aprovechando al máximo el área de captación disponible, por lo que el sistema híbrido consta de 256 paneles fotovoltaicos de 370 W de la marca LOGIN, que serán distribuidos en 8 arreglos colocados en paralelo, en donde cada arreglo consta de 32 paneles en serie, el sistema trabajara con un voltaje y corriente de operación de 840V y 92.16A, respectivamente. Adicionalmente se seleccionó un inversor de la marca Solis 30k-LV, debido a que la corriente en cortocircuito del campo de captación es mayor a la que puede soportar el inversor, se decidió utilizar 3 inversores, los cuales se conectarán a un AC combiner box. (Fig. 7) (Fig. 8)

Item	Article	Picture	Description	Quantity	Unit Price	Amount (USD)
1	LR4-60HPH-370M		LONGi Solar per: half cell mono370w	256	\$83.25	\$21,312.00
2	DC combiner box		5 inputs, 5 outputs DC Breaker,SPD,Switches IP65	3	\$580.00	\$1,740.00
3	Grid tie inverter Solis-30K-LV 30000w		Three phase Voltage: AC 220V 60Hz Waveform:Pure sine wave	3	\$3,525.00	\$10,575.00
4	Wifi monitoring system			3	\$60.00	\$180.00
5	AC combiner box		3 inputs, 1 output	1	\$1,125.00	\$1,125.00
6	DC PV Cable		PV 10mm2 cables 100m/roll (red or black) PV 4mm2 cables 100m/roll (red or black)	200 600	\$1.80 \$1.20	\$360.00 \$720.00
7	MC4 Connector		Rated current: 30A Rated voltage: 1000VDC	150	\$1.20	\$180.00
8	Concrete Roof Mounting System		customized, including all the parts 5 degrees of inclination	1	8335.36	\$8,335.36
Total EXW cost						\$44,527.36

- 1.Payment term: 30%T/T in advance, 70% balance before shipment
- 2.Lead time: 15-20 working days after receiving deposit.
- 3.Quote Validity: 15 days.
- 4.Package: Standard export package.
- 5.Warranty: solar panels 25 years, complete solar system 5 years.



Fig 7. Descripción de los elementos de sistema fotovoltaico

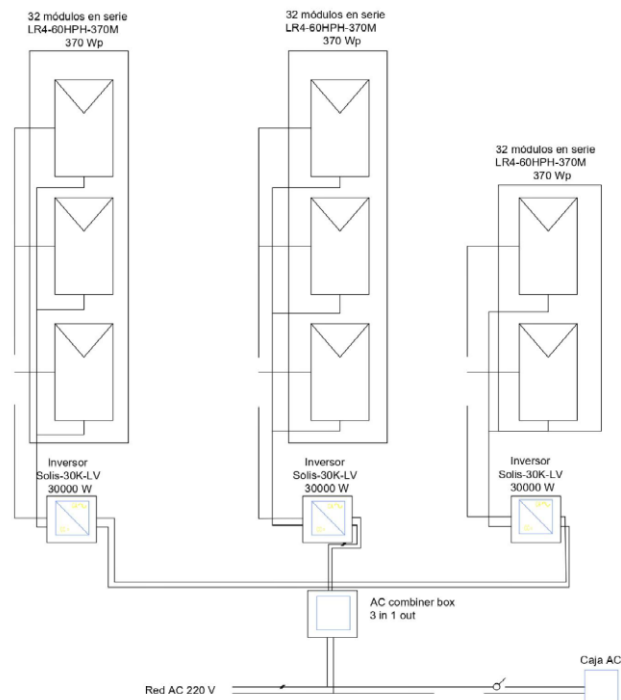


Fig. 8. Diagrama Unifilar del Sistema Fotovoltaico

VII.ANÁLISIS ECONÓMICO

Costo del sistema híbrido

El costo del sistema híbrido será de \$ 44,527.36, lo cual corresponde al precio de equipos y soporte para los paneles fotovoltaicos, al incluir el costo de importación y de mano de obra se obtiene un total de \$57,268.23.

Los ahorros generados por el sistema híbrido se estimaron considerando el mes con menor irradiación (junio) y una tarifa de 0.065 \$/kWh la cual corresponde a la tarifa establecida para instituciones educativas en el pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución del año 2020. [25] Además de considerar una pérdida de rendimiento de los paneles fotovoltaicos de 0.5% a partir del 2 año de uso.

Finalmente, la rentabilidad del proyecto se determinó calculando los indicadores TIR y VPN, obteniendo un VPN positivo y un TIR del 13%, cabe mencionar que el 90% de la inversión será realizada mediante préstamo con una tasa de interés del 7.5%,

VIII.CONCLUSIONES

Con el uso del cálculo de método de carga de diferencia de temperaturas y basándose en los estándares de ASHRAE, se determinó que la carga térmica requerida para el edificio será de 903606 BTU/h (76 Toneladas de refrigeración aproximadamente), seleccionaron 3 sistemas de condensadoras con 29 unidades interiores

El campo de captación posee una capacidad de generación de mínima de 388Kwh. La fracción energética que cubrirá el sistema fotovoltaico será del 43.4% de la demanda energética total del sistema de climatización.

La inversión del sistema híbrido es de \$57.268,23 precio subtotal sin IVA, este costo incluye los equipos que serán importados de china con sus respectivos aranceles y el costo de instalación de este.

El VPN obtenido es mayor a cero, lo que indica que el proyecto es factible, además de obtener un TIR de 13%, cabe mencionar que el bajo VPN y TIR obtenidos, se debe a que la tarifa eléctrica establecidas para instituciones educativas es de 0.065 USD/kWh, lo cual es relativamente bajo si se la compara con la tarifa para el sector industrial o comercial en donde para el horario considerado las tarifas son 0.0815 USD/kWh y 0.09 USD/kWh respectivamente.

La implementación del sistema híbrido producirá un ahorro de \$21.821,27 durante la vida útil del proyecto, por lo contrario, si no se implementa el sistema, la institución tendrá que desembolsar \$159.293,00 debido a tarifas eléctricas.

La instalación del sistema híbrido fotovoltaico-climatización aportada con una reducción de las emisiones de CO₂, en 1,111.16 toneladas de CO₂ durante el tiempo de vida del proyecto

Finalmente, los resultados muestran que la implementación del sistema de volumen de refrigerante variable con energía solar fotovoltaica puede asegurar una tasa interna de retorno importante y ser un proyecto económicamente rentable que además contribuye a la reducción de las emisiones de CO₂ asociadas a estos sistemas de climatización

IX.AGRADECIMIENTOS

A la empresa AIRKKON por su colaboración en el desarrollo del proyecto y al programa CYTED por contribuir en la elaboración del artículo

X. REFERENCIAS

[1] B. Jean-Francois, C. Emily, E. Thomas, H. Simon, v. d. H. Johan, H. Iris, M. Haozhi, M. Sabiha, M. Gabriele and M. Julia, "Understanding climate change from a global analysis of city analogues," *PLOS ONE*, 2019.

[2] REN21, "RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT," REN21 Secretariat, Paris, 2020.

[3] B. Garzón, *Arquitectura sostenible: bases, soportes, y casos demostrativos*, Buenos Aires: Nobuko, 2010.

[4] Q. Mingyang, Y. Da, H. Tianzhen and L. Hu, "Operation and performance of VRF systems: Mining a large-scale dataset," *Energy and Buildings*, 2021.

[5] S. K. Khawar, A. Waseem, M. Anjum and H. Oliver, "Improved solar milk chilling system using variable refrigerant flow technology (VRF)," *Solar Energy*, vol. 197, pp. 317-325, 2020.

[6] O. E. BID, *Eficiencia energética en América Latina y el Caribe: Avances y oportunidades*, 2017.

[7] ONU, "Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible," New York, 2019.

[8] P. Pourrut, O. Rdvere, I. Romo and H. Villacrés, "CLIMA DEL ECUADOR," *EL AGUA ENEL ECUADOR, Clima, precipitaciones, escorrentía*, pp. 13 -26, 1995.

[9] Juan Peralta, Angeles Lopez, Ian Sosa, Alfredo Barriga, Emérita Delgado, "Análisis estadístico de la información meteorológica para la explotación de energías renovables en el Ecuador," in *ISEREE INER*, Quito, 2013.

[10] CONELEC, "Plan Maestro de Electrificación 2013-2022: Estudio y gestión de la demanda energética," Quito, 2013.

[11] B. Garzón, *ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA*, Buenos Aires: Nobuko, 2007.

[12] F. D. K. Ching and I. M. Shapiro, *Arquitectura ecológica Un manual ilustrado*, Nueva Jersey: Gustavo Gili, SL., 2015.

[13] E. Delgado-Plaza, G. Intriago, J. Peralta-Jaramillo, P. Piedrahita and B. Velázquez-Martí, "Autonomous installations for monitoring the "Protector Prosperina" forest," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 4034, 2019.

[14] M. Loor, *Prospeccion Geotecnica de Campo Aplicada a la Construcción de la presa del Proyecto Parque del Conocimiento*, Guayaquil: ESPOL, 2010.

[15] J. Peralta, E. A. G. Delgado, i. Sosa and J. Abad, "Estimation of the wind potential for the Gustavo Galindo campus of the ESPOL in the city of Guayaquil," *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2017.

[16] ASHRAE, *Handbook Fundamentals*, Atlanta., 2010.

[17] ASHRAE, *Heating, Ventilating, and Air-Conditioning SYSTEMS AND EQUIPMENT*, Atlanta, 2020.

[18] A. Goetzberger and V. U.Hoffman, *Photovoltaic Solar Energy Generation*, Springer, 2005.

[19] G. d. N. Pires Leite, F. Weschenfelder, A. M. Araújo, Á. A. Villa Ochoa, N. d. F. Prestrelo Neto and A. Kraj, "An economic analysis of the integration between air-conditioning and solar photovoltaic systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 185, pp. 836-849, 2019.

[20] Z. Zhang Rongpeng, K. Sun, T. Hong, Y. Yura and R. Hinokuma, "A novel Variable Refrigerant Flow (VRF) heat recovery system model: Development and validation," *Energy and Buildings*, vol. 168, pp. 399-412, 2018.

[21] M. Košir and L. Pajek, "BcChart v2.0 – a tool for bioclimatic potential evaluation," *IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*, 2017.

[22] ANSI-ASHRAE, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, Atlanta, 2010.

[23] J. Peralta, E. Delgado, R. Valvedre, G. Panchana, J. Reinoso, W. Álava, A. Arévalo, I. Sosa and M. Flores, "Sustainability assessment of energy systems of Bellavista Island in the Gulf of Guayaqui," *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2019.

[24] L. O. Aghenta and M. T. Iqbal, "Design and Dynamic Modelling of a Hybrid Power System for a House in Nigeria," *International Journal of Photoenergy*, 2019.

[25] ARCONEL, "PLIEGO TARIFARIO PARA LAS EMPRESAS ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN," 23 Diciembre 2019. [Online]. Available: <https://www.cnelep.gob.ec/pliego-tarifario-2/>.