



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“Estudio para mejora de la eficiencia energética del edificio
GOBIERNO ZONAL DE GUAYAQUIL mediante una simulación
energética”.

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN:
PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Previa a la obtención del título de:
INGENIEROS MECÁNICOS

Presentado por:

Jorge Luis Erazo Quezada

Henry Gabriel Sánchez Avilés

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2015

AGRADECIMIENTO

A todos los maestros que me han guiado hasta esta etapa de mi vida estudiantil;

Es un gusto poder agradecer al señor Guillermo Soriano H., PhD., por ser el director de este trabajo;

Se agradece a los señores Jorge Dueñas, Arq. y Sixto García A., PhD., por brindarnos su ayuda;

También quiero agradecer a todas aquellas personas, que de distintas maneras contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

Por último; un agradecimiento muy especial a Dios, por brindarme el placer y la oportunidad de escribir estas líneas.

Henry Gabriel Sánchez Avilés

AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios por ser el pilar fundamental en nuestras vidas ya que nos dio la serenidad y fortaleza para no dejarnos vencer por las pequeñas o grandes dificultades que se nos presentaron durante nuestra etapa universitaria; sino más bien saberlas asimilar y aprender de ellas para madurar.

A nuestras familias por el amor, paciencia y apoyo incondicional que nos brindaron a lo largo de esta trayectoria universitaria, sin ustedes no sería posible la realización de este proyecto.

A nuestro tutor de tesis, el Dr. Guillermo Soriano, por habernos guiado en la realización de este proyecto con su experiencia y conocimientos.

Y por último y no por ello menos importante, a nuestros compañeros, amigos y todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron en nuestra trayectoria universitaria.

Jorge Luis Erazo Quezada

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con mucho cariño a mi querida madre, a mi familia y amigos. Por ultimo a todos aquellos a quienes este trabajo pueda ser de utilidad.

Henry Gabriel Sánchez Avilés

DEDICATORIA

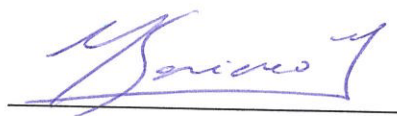
Este proyecto de tesis, sin duda alguna es el inicio de una nueva etapa con grandes metas por cumplir. Este trabajo está dedicado a mi Dios, a mi Padre que desde el cielo me ha guiado siendo mi mejor ejemplo a seguir, a mi madre que ha sabido darme ese amor incondicional, a mis hermanas que han sido mi inspiración a ser mejor cada día, a mi novia que ha sido mi compañía y mi complemento en todo momento.

Jorge Luis Erazo Quezada

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



M.Sc. Jorge Duque R.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE



Dr. Guillermo Soriano I., Ph.D.
DIRECTOR



M.Sc. Jorge Duque R.
VOCAL



DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este trabajo final de graduación nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Jorge Luis Erazo Quezada



Henry Gabriel Sánchez Avilés

RESUMEN

El estudio se centró en analizar la situación energética del EDIFICIO GOBIERNO ZONAL DE GUAYAQUIL y en base a esto se aplicó criterios de eficiencia energética que permitieron estimar una reducción del consumo de energía eléctrica del edificio.

Para la realización del estudio, fue necesario contar con la información histórica de los consumos energéticos en la edificación para obtener su variación en el transcurso de un año. Además, se elaboró un modelo computacional del edificio que fue simulado y analizado con ayuda de un software especializado, lo que permitió comparar el consumo energético real del edificio con el consumo que tendría en caso de tener un mejor rendimiento energético.

El modelo requirió conocer parámetros específicos de la envolvente, iluminación, sistemas de climatización del edificio y demás componentes. Entre los factores considerados para la envolvente se encuentran pisos, paredes, techos, ventanas, tragaluces, y puertas. Las cargas consideradas fueron luces, personas, aparatos, equipos varios, infiltraciones de aire y migración de humedad. Además en lo concerniente a sistema de

climatización se consideró el aire exterior, fugas de ducto, la ganancia de calor, la energía del ventilador y la bomba.

Estos datos fueron obtenidos mediante un levantamiento en campo que consistió en determinar los materiales de construcción, el área de cada oficina y contabilizar la cantidad de equipos, luminarias y ocupantes.

Para realizar la selección del software debe cumplir con la norma ANSI / ASHRAE 140. Este software permitió modificar varios parámetros de modelado, componentes de la envolvente, capacidad de iluminación, tipos de sistemas HVAC, materiales, dimensiones y controles. Se desarrolló un sistema multicriterial para la evaluar y seleccionar de los diferentes softwares considerados. El software utilizado para este estudio fue EnergyPlus.

Se realizó una simulación energética del modelo de línea base del edificio, considerando las cargas internas y los equipos de climatización, para los espacios acondicionados del edificio.

Se evaluaron los resultados obtenidos de la simulación, con el objetivo de identificar los problemas de consumo energético en las instalaciones

actuales, posteriormente se plantearon medidas para la disminución del consumo de energía en el modelo.

Una vez definidas las medidas de ahorro energético; se realizaron simulaciones para cada una de las medidas propuestas en el modelo. Se evaluaron las mejoras en la eficiencia del edificio mediante un análisis comparativo entre los resultados de las simulaciones del modelo de línea base y los modelos con medidas de ahorro energético.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ii
ÍNDICE GENERAL.....	v
ABREVIATURAS	vii
SIMBOLOGÍA	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE PLANOS	xiii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO 1

1. OBJETIVOS Y NOCIONES GENERALES	3
1.1. Problemática.....	3
1.2. Justificación	7
1.4. Objetivos.....	10
1.4.1. Objetivo general	10
1.4.2. Objetivos específicos	11
1.5. Alcance	11

CAPÍTULO 2

2. CONSIDERACIONES DEL ENTORNO	12
2.1. Situación energética del Ecuador	13
2.2. Situación climatológica	15
2.3. Eficiencia energética en edificaciones	19
2.3.1. Nociones sobre eficiencia energética.....	22
2.3.2. Normativa de referencia	24

CAPITULO 3

3.	METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN	27
3.1	Fundamentos de modelado y simulación.....	28
3.2	Resumen de la metodología empleada	36
3.3	Determinación del Software para modelado y simulación	48
3.4	Definición de los parámetros de modelado.....	57

CAPÍTULO 4

4.	MODELADO DE LA LÍNEA BASE	59
4.1	Definición del modelo.....	60
4.2	Calibración del modelo	87

CAPÍTULO 5

5.	SIMULACIÓN ENERGÉTICA	93
5.1	Planteamiento de medidas de ahorro energético.	93
5.2	Simulación implementando medidas de ahorro energético	107
5.3	Análisis comparativo de resultados.	115

CAPÍTULO 6

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	121
6.1	Conclusiones.	121
6.2	Recomendaciones.	123

APÉNDICES**BIBLIOGRAFÍA**

ABREVIATURAS

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
BREEAM	BRE Environmental Assessment Method.
CVSTD	Coefficient of Variation of the Standard Deviation.
CVRMSE	Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error.
DOE	Departamento de Energía (de Estados Unidos).
ECWT	Entering Condenser Water Temperature.
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning.
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
INER	Instituto Nacional de Energías Renovables.
LCHWT	Leaving Chilled Water Temperature.
LEED	Leadership in Energy & Environmental Design.
MEER	Ministerio de Electricidad y Energías Renovables.
NMBE	Normalized Mean Bias Error.
VFD	Variable Frequency Drive.
VSD	Variable Speed Drive.

SIMBOLOGÍA

$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados.
cm	Centímetros.
e	Espesor de material.
k	Conductividad térmica.
n	Número de puntos de datos.
p	Número de parámetros o términos en el modelo base.
R_T	Resistencia térmica equivalente.
R_e	Resistencia térmica exterior.
R_{ii}	Resistencia térmica interior.
U	Cóeficiente de transferencia de calor.
y	Variable dependiente o alguna función de variable(s) dependiente(s).
$\hat{y}$	Valor predicho del modelo de regresión de y
$\bar{y}$	Media aritmética de los n valores de y .

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Demanda de energía eléctrica de la ciudad de guayaquil para los meses diciembre y enero durante el período 2011 a 2014 [1].....	4
Figura 1.2	Edificio del gobierno zonal de guayaquil.....	6
Figura 1.3	Esquema del sistema de climatización	7
Figura 1.4	Medidas adoptadas en el plan de eficiencia energética del año 2010 [6].....	9
Figura 2.1	Consumo de electricidad por sectores económicos [9].....	13
Figura 2.2	Consumo eléctrico en función de la temperatura máxima del día en guayaquil [12].	14
Figura 2.3	Carta psicrometrica del clima (guayaquil).	17
Figura 2.4	Temperatura de bulbo seco para guayaquil.....	18
Figura 2.5	Humedad relativa con datos de guayaquil	19
Figura 2.6	Consumo eléctrico de edificio comercial (basado en datos de una encuesta de consumo en el uso final, departamento de energía, usa, 1999) [22].....	23
Figura 3.1	Etapas de un proceso de simulación.	31
Figura 3.2	Diagrama general para el proceso de modelado energético a desarrollar.....	37
Figura 3.3	Diagrama de flujo para modelado energético en software de simulación (adaptada de ASHRAE fundamentals Capitulo 19).	39
Figura 3.4	Desarrollo del período de línea base del modelo.....	41
Figura 3.5	Diagrama del proceso de simulación.	46
Figura 3.6	Manejo de software con la interfaz	50
Figura 3.7	Interacción de módulos de Energy Plus.....	55
Figura 3.8	Diagrama del flujo de trabajo en OpenStudio [29]	57
Figura 4.1	Ubicación de edificio.	60
Figura 4.2	Temperaturas en guayaquil (INAMHI-2011)	61
Figura 4.3	Definicion geométrica del modelo	65
Figura 4.4	Capa exterior, Detalle A: Pared de hormigon y Detalle B: Pared vidriada	68
Figura 4.5	Detalles de pared de gypsum	70
Figura 4.6	Detalles de losa+tumbado	71

Figura 4.7	Definición de tipos de espacios en el modelo (Piso 15).....	73
Figura 4.8	Definición de las zonas térmicas en el modelo (Piso 15).....	75
Figura 4.9	Temperatura de agua helada.....	84
Figura 4.10	Temperatura de climatización.....	85
Figura 4.11	Perfil de ocupancia (Áreas de Oficina)	85
Figura 4.12	Perfil de ocupancia (Áreas Misceláneas).....	86
Figura 4.13	Perfil de iluminación.....	86
Figura 4.14	Perfil de uso de equipos	87
Figura 4.15	Consumo mensual promedio.	88
Figura 4.16	Comparación entre los consumos mensuales facturados y del Modelo de Línea Base.....	89
Figura 4.17	Consumos y usos finales mensuales de energía para el Modelo Calibrado de Línea Base.....	91
Figura 4.18.	Porcentajes de usos finales anuales para el Modelo Calibrado de Línea Base.....	92
Figura 5.1	Ciclo de refrigeración para un enfriador que opera en condiciones estandar.....	97
Figura 5.2	Efecto de la disminución de ECWT	99
Figura 5.3	Efecto del aumento de LCHWT	100
Figura 5.4	Efecto de la aplicación de VDF en una bomba que opera a carga parcial.	102
Figura 5.5	Variación del COP con la carga para enfriadores de absorción, electricos de tornillo y eléctricos centrífugos [34].....	104
Figura 5.6	Comparación del rendimiento de enfriadores centrífugos de velocidad constante y variable [35].....	105
Figura 5.7	Desempeño de un enfriador centrífugo antes y después de la mejora con VSD [36].....	106
Figura 5.8	Variación de la temperatura (ECWT) en modelo M1A1 y LÍNEA BASE.	108
Figura 5.9	Flujo masico del condensador en modelo M1A1 y LINEA BASE	109
Figura 5.10	Consumos y usos finales mensuales de energía para el modelo M1A1.	110
Figura 5.11	Variación de la temperatura (LCHWT) en modelo M1A2 y LINEA BASE.	111
Figura 5.12	Consumos y usos finales mensuales de la energía para el modelo M1A2.....	111

Figura 5.13	Variación del flujo másico de agua en el evaporador en modelo M2A1 y LINEA BASE.....	112
Figura 5.14	Consumos y usos finales mensuales de la energía para el modelo M2A1.....	113
Figura 5.15	Variación del cop en modelo M2A2 y LINEA BASE.....	114
Figura 5.16	Consumos y usos finales mensuales de la energía para el modelo M2A2.....	114
Figura 5.17	Consumo anual simulado de los modelos para cada alternativa de ahorro.	115
Figura 5.18	Uso final anual de alternativas.....	117
Figura 5.19	Consumo anual combinando cada alternativa	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Datos climáticos de guayaquil durante el año 2013 (elaborado con datos de: weather history for guayaquil ecuador, weather underground)	16
Tabla 2	Tolerancias para índices de calibración	45
Tabla 3	Matriz de selección de software	54
Tabla 4	Proporción de materiales de la envolvente	63
Tabla 5	Distribución de áreas del edificio	64
Tabla 6	Propiedades de los materiales de la envolvente del edificio	66
Tabla 7	Capa exterior: pared de hormigón. Coeficiente de transferencia de calor	68
Tabla 8	Capa exterior: pared vidriada. Coeficiente de transferencia de calor	69
Tabla 9	Capa interior: pared de gypsum. Coeficiente de transferencia de calor	70
Tabla 10	Conductividad térmica de capa: losa+tumbado	71
Tabla 11	Tipos de espacios designados.....	72
Tabla 12	Zonas térmicas del edificio	74
Tabla 13	Ocupancia del edificio.....	76
Tabla 14	Densidad de ocupancia	77
Tabla 15	Densidad de iluminación.....	78
Tabla 16	Densidad de equipos	79
Tabla 17	Ventilación e infiltración	80
Tabla 18	Equipos de expansion directa considerados.....	83
Tabla 19	Consumo energético mensual de modelo.....	89
Tabla 20	Valores de índices de calibración	90
Tabla 21	Estrategias generales para mejorar la eficiencia energética en construcciones [31].....	94
Tabla 22	Valores de punto de ajuste para las temperaturas del evaporador.....	100
Tabla 23	Modelos con medidas de ahorro energético	107
Tabla 24	Resumen de mejora de eficiencia según alternativas.....	116
Tabla 25	Combinación de medidas de ahorro energético	119

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Cortes y detalles de las paredes del edificio

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo está constituido por seis capítulos, cada uno de los cuales se subdivide en secciones, a continuación se presenta una breve descripción del contenido de cada capítulo:

En el capítulo 1 se mencionan algunas generalidades acerca del consumo de energía en edificios, para luego centrarse en el caso del edificio a analizar. También se mencionan datos estadísticos acerca de la demanda energética en la ciudad de Guayaquil y por último se establecen la justificación, los objetivos y el alcance del estudio.

En el capítulo 2 se describe la situación energética nacional, los planes de expansión y su relación con la eficiencia energética. También se mencionan las características del clima en el Ecuador y las condiciones climáticas en la ciudad de Guayaquil; además, se hace referencia a las características de los materiales de construcción y se cita la normativa de referencia para este estudio.

El capítulo 3 empieza con la descripción de algunos fundamentos de modelado, posteriormente se resume la metodología a emplear para el modelado de la línea base y la simulación de las medidas de eficiencia

energética, también se hace la selección del software a emplear y se definen algunos parámetros de modelado.

En el capítulo 4 se realiza el modelado de la línea base; para esto, se define un modelo inicial, considerando aspectos tales como la localización, condiciones ambientales, envolvente, tipos de espacio, zonas térmicas, cargas térmicas, equipos de climatización instalados y otros equipos que consuman energía. Luego de definir el modelo, se simula el consumo de energía para comparar los resultados con los consumos reales y calibrar el modelo de acuerdo a los lineamientos del ASHRAE 14-2002. Los consumos obtenidos del modelo calibrado constituyen la línea base del edificio que servirá de referencia para proponer alternativas de mejora.

En el capítulo 5 se plantean las medidas de ahorro energético, para esto se hará una descripción de cada medida con sus alternativas de implementación. Posteriormente se presentan los resultados de la implementación de las medidas planteadas en el modelo del edificio. Por último se realiza un análisis comparativo de los resultados y los ahorros aportados por las medidas.

Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y las recomendaciones elaboradas en este estudio.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Durante el desarrollo de este capítulo se va a tratar la problemática del consumo de energía eléctrica en edificios, centrándose en el caso del edificio del Gobierno Zonal de Guayaquil; para esto se presentan algunos datos estadísticos referentes a la demanda de energía en la ciudad y el consumo en edificios, además se expone la justificación del presente estudio para luego establecer sus objetivos generales, específicos y el alcance del mismo.

1.1. Problemática

Durante el período que comprende los meses de diciembre hasta mayo se presenta una estación lluviosa en el litoral ecuatoriano. En ciudades como Guayaquil, los valores de temperatura y humedad alcanzan niveles que están muy por encima de sus valores medios

anuales [1]. Dicho incremento en la temperatura y humedad provocan un mayor uso de los sistemas de refrigeración y acondicionamiento de aire por parte de la población, lo que se traduce en un aumento de la demanda de energía eléctrica.

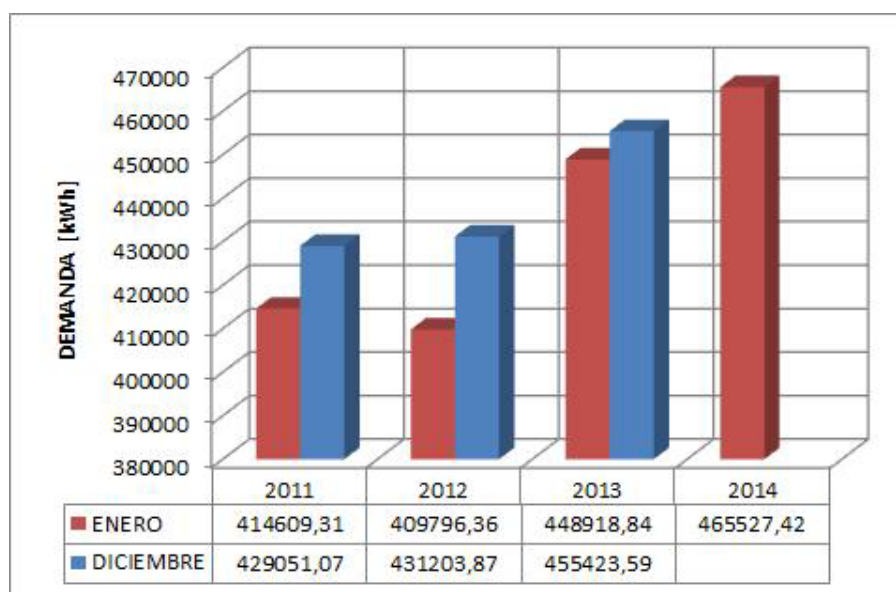


FIGURA 1.1 DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL PARA LOS MESES DICIEMBRE Y ENERO DURANTE EL PERÍODO 2011 A 2014 [1].

En la ciudad de Guayaquil durante los años 2011 al 2013 se ha venido incrementando la demanda de energía eléctrica correspondiente a los meses de la estación lluviosa (Figura 1.1), aunque los picos más altos se registran durante los meses de abril y mayo [2].

La cantidad de energía empleada para las distintas necesidades dentro de una edificación varía de acuerdo a varios aspectos como ubicación geográfica, uso y ocupación del edificio, entre otros. El departamento de energía de Estados Unidos estima que alrededor de un 37% del uso final de energía en edificios se utiliza para actividades de climatización y confort térmico, y un 14% en iluminación [3].

Estos datos denotan la relevancia de los sistemas de climatización dentro del consumo de una edificación, tomando este asunto mayor importancia en ciudades como Guayaquil. En edificaciones ubicadas en climas cálidos, la climatización es esencial para brindar confort térmico a sus ocupantes, además influye en la productividad de los mismos [4].

Se propone realizar un estudio para la mejora en la eficiencia energética del edificio del Gobierno Zonal de Guayaquil, mediante la reducción del consumo de energía eléctrica, enfocándose en la climatización.

El edificio del Gobierno Zonal de Guayaquil (ver apéndice A) fue diseñado en los años noventa para que ahí funcione el Banco del

Progreso; posteriormente pasó a manos del estado ecuatoriano como consecuencia de la crisis financiera nacional del año 1999. El inmueble se mantuvo cerrado alrededor de ocho años, hasta que fue rehabilitado para que funcione como un edificio público reinaugurándose en el año 2007 (Figura 1.2).



FIGURA 1.2 EDIFICIO DEL GOBIERNO ZONAL DE GUAYAQUIL.

Para la climatización, el inmueble cuenta con una planta de agua helada, además posee algunos equipos de expansión directa ubicados en puntos específicos del inmueble.

La climatización y ventilación en el diseño original del edificio se manejaban mediante un sistema de control inteligente, sin embargo en la actualidad dicho sistema se encuentra deshabilitado y los controles se realizan manualmente presentándose quejas por parte del personal que labora en las distintas dependencias.

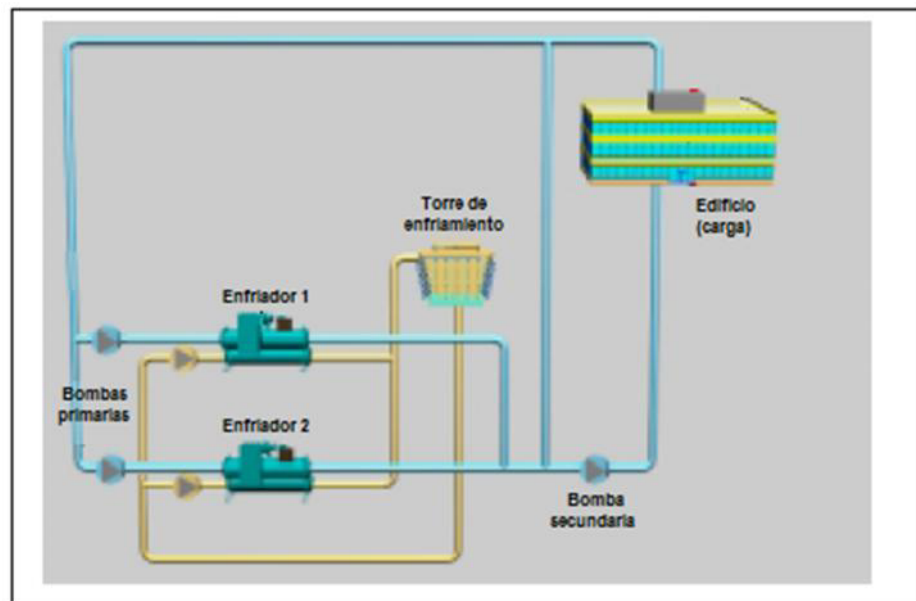


FIGURA 1.3 ESQUEMA DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN

1.2. Justificación

En Ecuador la mayor generación de energía limpia se la obtiene mediante hidroeléctricas pero existe variabilidad de las condiciones hidrográficas a largo del año, esto provoca una disminución importante en el monto de la hidroelectricidad generada; además,

existe la necesidad de cubrir una demanda cada vez mayor, por estos motivos se encuentran en operación centrales térmicas con un costo de producción elevado y además emiten contaminantes que contribuyen al cambio climático.

A fines del año 2009 e inicios del 2010, el país sufrió una severa crisis en el sector eléctrico con el desabastecimiento de la demanda causada por la sequía extrema, por lo que se debió implementar el parque generador térmico y la importación de energía eléctrica por medio de la interconexión con países vecinos [5].

Como consecuencia del cambio climático, alrededor del mundo existen múltiples iniciativas que se enfocan en lograr un uso eficiente del agua, materiales y recursos energéticos con el objetivo de conseguir un desarrollo sostenible [5].

La eficiencia energética (EE) es importante debido a que es uno de los principales criterios relacionados con la sostenibilidad y el desarrollo económico, además se ha demostrado que las medidas de EE son las menos costosas para reducir las emisiones de GEI, incluso su implementación conlleva a una reducción de costos por consumos de energía [6].

Como parte de las estrategias que ha emprendido el Ecuador para ayudar a mitigar el cambio climático, en la actualidad se están desarrollando varios proyectos de generación de energía más limpia. Adicionalmente el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER) está implementando varias medidas de ahorro de energía eléctrica, las cuales se dividen en mediadas de corto y mediano plazo [7].

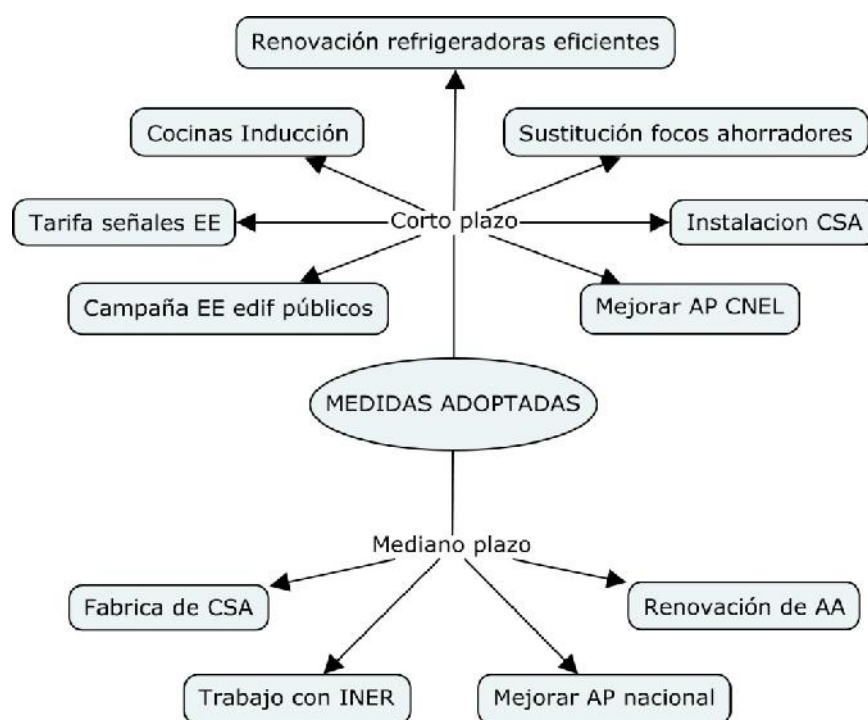


FIGURA 1.4 MEDIDAS ADOPTADAS EN EL PLAN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL AÑO 2010 [6].

Como se puede constatar en la figura 1.4; dentro de las medidas de ahorro eléctrico a corto plazo adoptadas por el MEER, se encuentra una campaña de eficiencia energética en edificios públicos. El presente estudio constituye una iniciativa académica que busca contribuir a la campaña de eficiencia energética en edificios públicos y para la concientización sobre el uso eficiente de la energía en la población.

Se espera que este trabajo pueda servir como referencia en el ámbito local para la búsqueda de un uso racional de la energía, empleando herramientas computacionales y normativas actuales aplicadas en países desarrollados, dónde existe un mayor control del uso de la energía.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer medidas de mejora en la eficiencia energética del edificio, basadas en criterios técnicos, mediante el uso de herramientas computacionales que permitan simular consumos de energía.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos considerados en este estudio son los siguientes:

- Definir una línea base energética para el edificio del Gobierno Zonal de Guayaquil.
- Proponer medidas técnicas con potencial para mejorar el consumo energético del edificio.
- Evaluar el impacto de las medidas planteadas en edificaciones del sector público.

1.4. Alcance

A fin de cumplir con los objetivos antes descritos, se elaborará un modelo computacional del edificio, empleando datos recolectados in situ e información técnica estándar recomendada para edificios comerciales.

Las medidas de ahorro energético a proponer, deben enfocarse en reducir el consumo de energía eléctrica del sistema de climatización del edificio, por este motivo no se considera realizar cambios arquitectónicos ni modificar la iluminación.

CAPÍTULO 2

2. CONSIDERACIONES DEL ENTORNO

Dentro del contexto de este proyecto es necesario tratar varios aspectos sobre la situación energética, climatológica y varios temas relacionados a la eficiencia energética en edificaciones.

La situación energética del Ecuador, se describe para denotar la importancia que tienen los proyectos de ahorro y eficiencia energética, como lo es este estudio, dentro de los planes de expansión de la matriz energética.

La situación climatológica se describe inicialmente mediante un enfoque general del país y finaliza centrándose en las condiciones particulares de la ciudad de Guayaquil con el objetivo de conocer las variaciones de los parámetros de diseño de los sistemas de climatización. En lo concerniente a la eficiencia energética en edificaciones se presentan algunas nociones y la normativa de referencia.

2.1. Situación energética del Ecuador

Ecuador es un país en vías de desarrollo que entre los años 1970 y 2008 aumentó su demanda de energía primaria a razón de 4.1% anual [5]. Durante el periodo de 1990 a 2011 la capacidad de generación del sistema eléctrico nacional creció el 159% mientras que la demanda creció el 202% [5][8]. En Ecuador para el período 2010 - 2012, los crecimientos medios anuales de la electricidad total demandada fueron: 5,09% en potencia y 5,43% en energía [9]. En la figura 2.3 se muestra la distribución de los 19.377 GWh de electricidad consumida por los sectores económicos en 2012 [10].

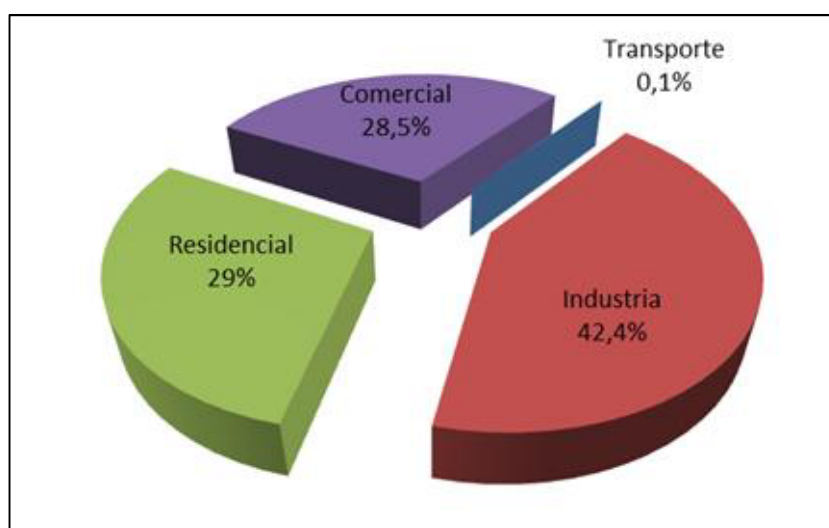


FIGURA 2.1 CONSUMO DE ELECTRICIDAD POR SECTORES ECONÓMICOS [9]

La insuficiencia en la generación del sistema eléctrico para cubrir la demanda de energía del país ha debido suplirse con importaciones de electricidad. Estos hechos han planteado la necesidad de un cambio de la matriz energética eléctrica del país [11], por lo que se ha puesto en marcha una serie de proyectos de generación de hidroelectricidad. No obstante, como consecuencia del cambio climático, en países andinos como Ecuador podría producirse una alteración hidrográfica que afectaría la capacidad de generación eléctrica en el país [12]. Por tanto, la aplicación de medidas de ahorro energético podría aportar múltiples beneficios al país.

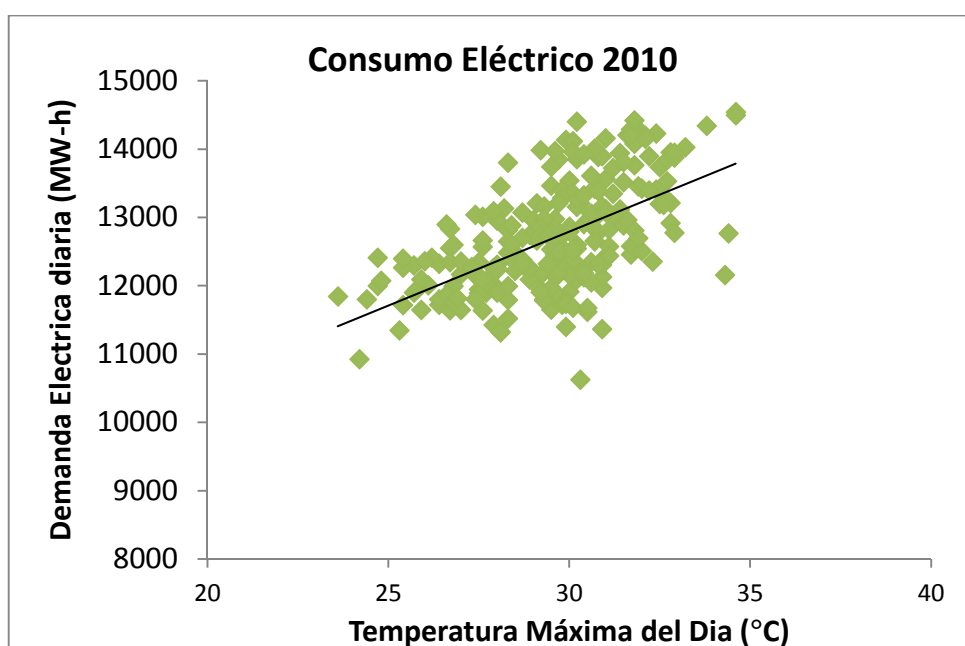


FIGURA 2.2 CONSUMO ELÉCTRICO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA MÁXIMA DEL DÍA EN GUAYAQUIL [13].

En la figura 2.2 se presenta una estimación del consumo eléctrico en días regulares en relación con la temperatura máxima del día, se puede observar que existe una tendencia creciente de consumo conforme aumenta la temperatura.

2.2. Situación climatológica

Ecuador se encuentra localizado en la región intertropical (zona Tórrida), posee nueve tipos de climas diferentes que se distribuyen a lo largo su territorio (ver apéndice B). En la costa Ecuatoriana, el clima está influenciado por las corrientes marinas fría de Humboldt y cálida de El Niño, produciéndose un clima tropical [14].

La ciudad de Guayaquil, ubicada geográficamente con latitud de 2°16' S y longitud 79°54' O [15], posee un clima tipo tropical seco y tropical de monzón [16]. Durante el año 2011 la diferencia entre los promedios mensuales de las temperaturas máximas y mínimas alcanzaron los 9 °C siendo la temperatura anual promedio de 26.4 °C [1]. La tabla 1 muestra datos climatológicos para la ciudad de Guayaquil.

TABLA 1

DATOS CLIMÁTICOS DE GUAYAQUIL DURANTE EL AÑO 2013 (

ELABORADO CON DATOS DE: WEATHER HISTORY FOR

GUAYAQUIL ECUADOR, WEATHER UNDERGROUND)

Estación: José Joaquín de Olmedo Altitud: 9 m Ubicación: 2.16 °S, 79.88 °W							
MES	TEMPERATURA PROM. [°C]			HUMEDAD RELATIVA [%]			VELOCIDAD MEDIA [km/h]
	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	
Enero	34	20	27	100	29	70	6
Febrero	32	21	27	94	40	71	6
Marzo	33	23	28	95	41	73	6
Abril	33	21	27	94	36	66	8
Mayo	33	21	26	99	11	69	10
Junio	33	19	25	94	25	79	12
Julio	30	19	24	100	44	73	13
Agosto	39	14	24	88	29	70	14
Septiembre	33	19	26	99	29	67	14
Octubre	33	20	26	83	18	66	13
Noviembre	33	21	26	83	37	65	13
Diciembre	34	21	28	83	28	59	12
ANUAL			26			69	11

Para una mejor comprensión del comportamiento del clima en la ciudad de Guayaquil, se va a presentar la información climatológica empleando los datos de un archivo de clima, éstos serán ubicados en una carta psicométrica (Figura 2.4).

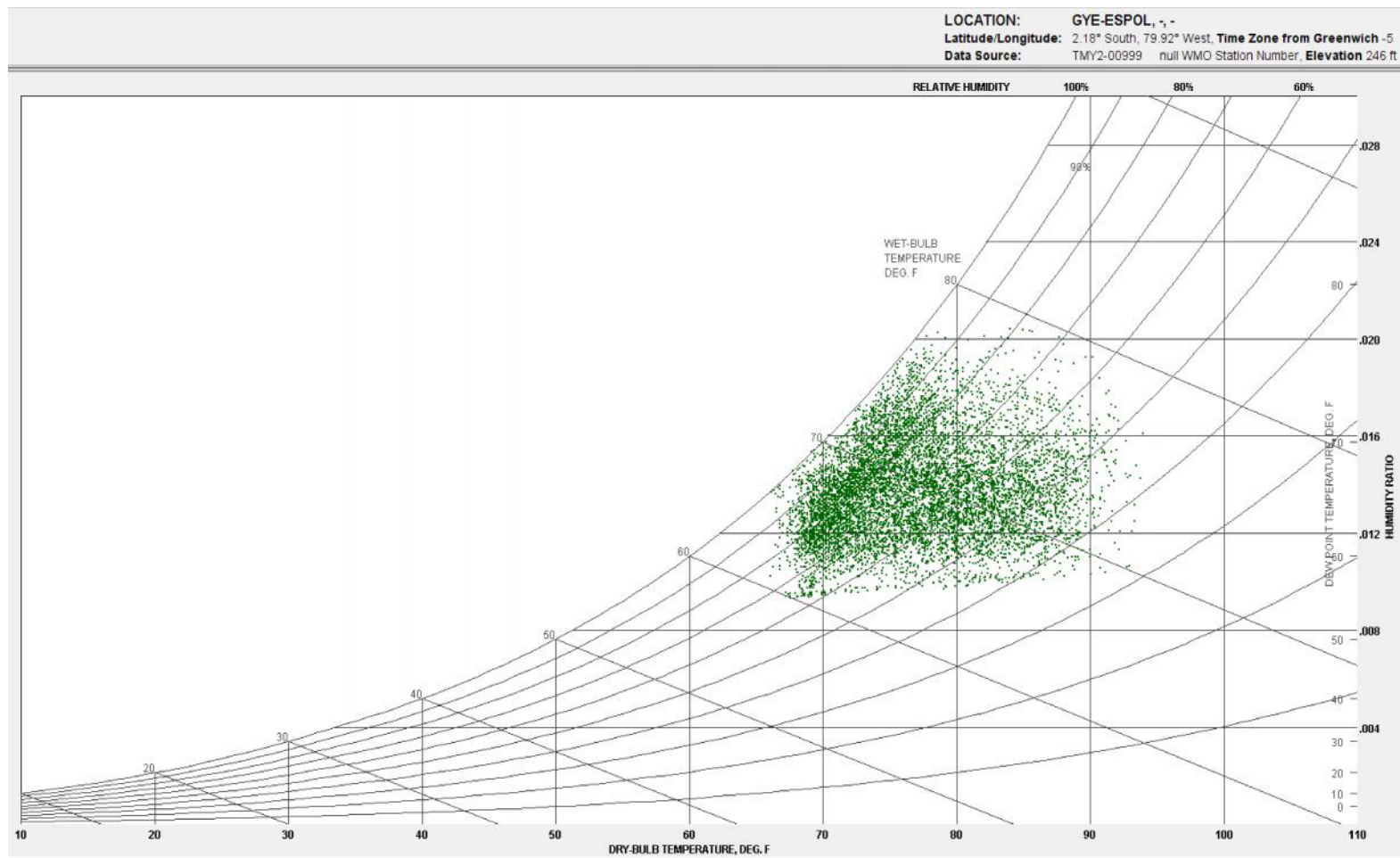


FIGURA 2.3 CARTA PSICROMETRICA DEL CLIMA (GUAYAQUIL).

También se presentan los comportamientos de ciertos parámetros de interés, como son la temperatura de bulbo seco (Figura 2.5) y la humedad relativa del aire (Figura 2.6).

Para visualizar como varían los parámetros mencionados anteriormente, se emplea Climate Consultant que es un software abierto desarrollado por el Departamento de Arquitectura y Diseño Urbano de la Universidad de California.

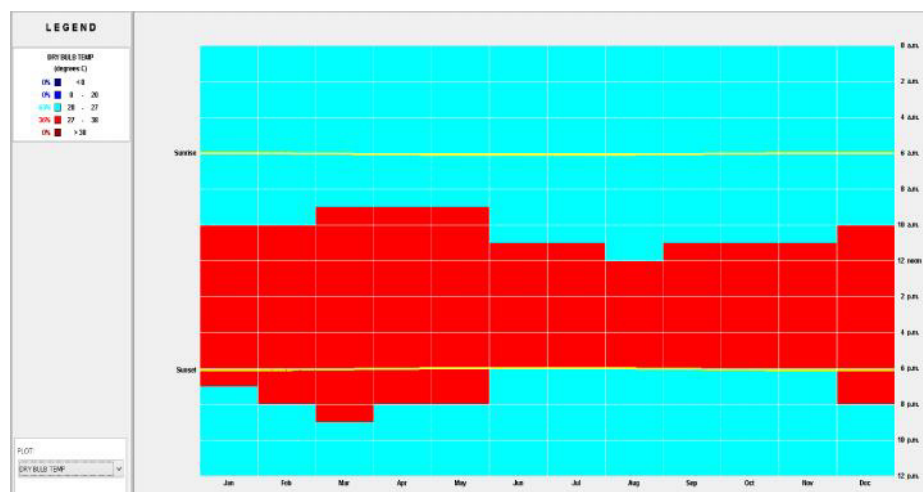


FIGURA 2.4 TEMPERATURA DE BULBO SECO PARA GUAYAQUIL.

Para los datos climáticos se visualiza que las temperaturas más elevadas se presentan entre los meses de febrero hasta mayo, siendo marzo el mes que alcanza las mayores temperaturas. Con respecto a la humedad relativa, el mes de Febrero el de mayor concentración.

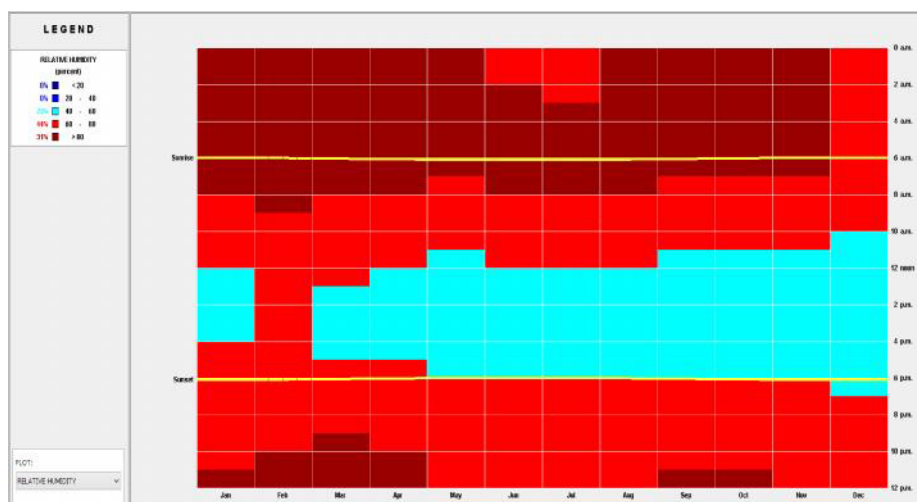


FIGURA 2.5 HUMEDAD RELATIVA CON DATOS DE GUAYAQUIL

2.3. Eficiencia energética en edificaciones

El desarrollo del sector de la edificación tiene un impacto importante sobre el medio ambiente debido a que este sector genera un consumo elevado de recursos energéticos y materiales. A nivel mundial, el sector de la construcción es responsable del 40% del consumo de energía primaria y la producción de carbono [17]; en el Ecuador, esta cifra corresponde al 32% de la matriz energética [18].

El uso eficiente de la energía es concebido en los países desarrollados, desde hace ya tres décadas, como un recurso energético más. En términos generales, el denominador común y

motivación central que llevó a los estados a ocuparse y abordar la materia estuvo en la necesidad de asegurar la sustentabilidad de la matriz energética a mediano y largo plazo [19].

La eficiencia energética (EE) es el conjunto de acciones que permiten optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y los productos y servicios finales obtenidos [20]. A nivel mundial existen varios tipos de certificaciones en el ámbito de la sostenibilidad en edificios, para esto se aplican diversos criterios entre ellos los de eficiencia energética; se tienen por ejemplo certificaciones tales como BREEAM, LEED, Passivhaus, Minergie, entre otras y en cada una existen distintos niveles de certificación.

Las técnicas de modelado energético en edificios son de tres tipos fundamentales: de estado estable, cuasi estable y dinámico. Los modelos de estado estable asumen que no hay energía neta almacenada durante el período, estos modelos son válidos solo cuando todas sus propiedades y variables pueden ser asumidas constantes para cada cálculo. En modelos de estado cuasi estable se intenta tratar la dinámica o comportamiento del edificio, asumiendo que durante el período de cálculo considerado (usualmente 1 hora), el edificio y su sistema permanece con la

temperatura promedio. El método completamente dinámico es baso en tiempos sub-horarios y representan la variación del edificio y sus sistemas, modelos en este nivel de detalle son raramente usados para cálculos de usos de energía y demanda pico pero pueden ser usados para análisis de sus sistema de control dinámico. [21]

Materiales de construcción en Guayaquil

En las técnicas de construcción tradicional se empleaban materiales que permitían obtener niveles de confort que hoy en día son más difíciles de alcanzar con el uso de materiales industrializados.

Actualmente en la ciudad de Guayaquil se realizan construcciones empleando principalmente vidrio y hormigón, debido a que son materiales industrializados con mucha comercialización; sin embargo, no se ha considerado que sean altamente almacenadores de calor y su diseño reduce la ventilación natural perjudicando a la climatización del edificio.

Por lo tanto materiales como vidrio, hormigón y acero, son adecuados en climas fríos, o pueden ser usados en menor medida en climas cálidos. [22]

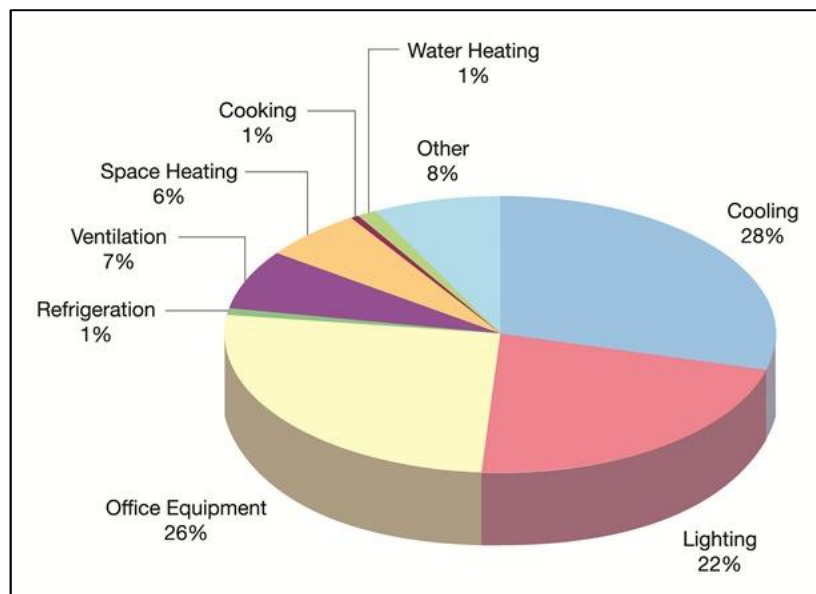
2.3.1. Nociones sobre eficiencia energética

Dentro de una edificación, una de las principales preocupaciones es el acondicionamiento de los espacios interiores con el objetivo de brindar un determinado grado de confort para los ocupantes, de acuerdo al tipo de actividad que éstos realicen.

Los niveles de consumo de energía en una edificación dependen del servicio que esta preste. Las edificaciones pueden ser clasificadas de acuerdo a la normativa ASHRAE en residenciales y no residenciales; un tipo de edificio no residencial puede ser el denominado como comercial.

Según sea el caso, una edificación puede emplear distintas cantidades de energía para propósitos tales como climatización, iluminación, ventilación, equipamiento, entre otras aplicaciones; por tal motivo es importante cuantificar cada uno de los usos finales de la energía según el tipo de edificación.

La eficiencia energética en una edificación se establece a partir del nivel de consumo que esta presenta durante un período de tiempo anual y en los usos finales según el tipo de edificación.



**FIGURA 2.6 CONSUMO ELÉCTRICO DE EDIFICIO COMERCIAL
(BASADO EN DATOS DE ENCUESTA DE CONSUMO EN EL
USO FINAL, DEPARTAMENTO DE ENERGÍA, USA, 1999) [23].**

Según se puede observar en la Figura 2.6; los sistemas de climatización, iluminación y equipos de oficina son los usos en los que se emplea la mayor cantidad de la energía que consume una edificación no residencial de tipo comercial.

Para realizar un análisis de consumo de energía primero es necesario identificar los usos para los cuales puede existir un

desperdicio de energía. Por ejemplo si se tiene una edificación no residencial cuyo uso está destinado para oficinas; probablemente la primera acción será comprobar que no exista una deficiente conexión eléctrica de los equipos, iluminación, ventilación, calefacción y sistema acondicionador de aire puesto que de acuerdo a la figura 2.6 estos son los usos principales.

2.3.2. Normativa de referencia

A nivel mundial existen diversas normativas en lo que respecta a lineamientos de ahorro energético; debido al poco desarrollo en el país en asuntos de esta índole, es una práctica común tomar como referencia los criterios recomendados por estos estándares. Las normativas ASHRAE constituyen un referente internacional en lo que respecta a lineamientos de ahorro energético; por tal motivo se ha convertido en la más usada en lo que concierne a proyectos que involucren criterios de racionalización energética.

Standard ASHRAE 90.1 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.

Consiste en un documento dividido en doce secciones y siete apéndices que contiene requerimientos mínimos para el consumo eficiente de energía dentro de una edificación con la excepción de

que sean edificios para vivienda de baja altura. Entre las partes de mayor utilidad para este estudio se encuentran los apéndices B y E de la norma.

En Ecuador el instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) ha desarrollado documentos normativos en el ámbito de la eficiencia energética, publicando 6 normas relacionadas a este tema, entre las que se encuentra una que hace referencia a la eficiencia energética en edificaciones:

NTE INEN 2506 Eficiencia energética en edificaciones.

Requisitos.

En el documento se indica que esta norma establece los requisitos que debe cumplir un edificio para reducir a límites sostenibles su consumo de energía y conseguir asimismo que una parte de este consumo proceda de fuentes de energía renovable. Además en el alcance se menciona que esta norma se aplica a edificios de nueva construcción, y a edificios cuyas modificaciones, reformas o rehabilitaciones sean superiores al 25% del envolvente del edificio, con ciertas excepciones [24]. Por tanto esta normativa no es aplicable para la edificación analizada en este estudio.

En Ecuador; se está desarrollando recientemente una normativa que resulta importante de mencionar aunque no constituya la referencia principal para este proyecto.

Norma ecuatoriana de la construcción NEC – 11, Capítulo 13, Eficiencia Energética en la Construcción en Ecuador.

Las normas ecuatorianas de construcción NEC-11 son un grupo de normativas cuyo objetivo es establecer un conjunto de requisitos mínimos para el diseño y la construcción de edificaciones en el Ecuador, actualmente se encuentran en proceso de revisión. En el capítulo 13 de la NEC-11 se aborda el tema de la eficiencia energética en la construcción, dicho capítulo consta de 6 secciones y seis anexos.

CAPITULO 3

3. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Para el desarrollo de este estudio es necesario definir la metodología de modelado energético para el edificio estudiado, además se deben seleccionar las herramientas computacionales a emplear. A manera de introducción, en la primera sección de este capítulo se describen ciertos fundamentos de modelado y simulación que simplifican la explicación de la metodología expuesta en la siguiente sección.

La segunda sección se compone de dos partes en la primera se describe la metodología para el modelado de la línea base, mientras que en la segunda se trata el desarrollo de medidas para mejorar la eficiencia del modelo establecido como línea base. En la tercera sección se realiza la selección del software a emplear y finalmente en la cuarta se realiza la definición de algunos parámetros de modelado.

3.1 Fundamentos de modelado y simulación

En breves rasgos, se puede decir que una simulación consiste en predecir el comportamiento de un sistema durante un período de tiempo determinado, empleando para ello un computador. Una simulación energética trata de determinar el comportamiento en términos de las cargas y del intercambio de energía de algún sistema.

Para el análisis de los sistemas se emplean representaciones simplificadas de los mismos que reciben el nombre de modelos. Un modelo puede ser una réplica del sistema a estudiar o una abstracción de las propiedades dominantes del mismo, también se puede referir a un proceso de simulación que implica un motor de cálculo específico y conjunto de datos de entrada, denominándose en este caso modelo de simulación.

Un modelo de línea base representa el uso de la energía existente y las condiciones de operación para el edificio. Este modelo es usado como referencia para estimar los ahorros de energía incurridos desde medidas de conservación de energía seleccionadas. [25].

Se denomina período de línea base al período de tiempo seleccionado para representar las operaciones de la instalación antes de la reconversión [26].

3.1.1 Enfoques para modelado energético

Un modelado energético consiste en elaborar un modelo matemático que sirva para simular el comportamiento energético de una edificación, y su impacto en el rendimiento del edificio al proponer una medida de conservación de energía sin necesidad de incurrir a realizarla físicamente y predecir el consumo.

Esto permite adoptar estrategias de ahorro simulando diversas medidas y obtener las que conlleven a una mayor disminución, por ejemplo; la selección de los equipos y accesorios más adecuados para mejorar el rendimiento energético del edificio.

En lo que concierne a la estimación del consumo de energía se pueden discutir dos enfoques de modelado diferentes; uno directo y otro basado en datos [27], ambos casos se describen a continuación:

El enfoque directo consiste en describir un modelo, en el que se analizan sus condiciones de operación mediante una simulación, en la cual dependiendo del comportamiento de los parámetros de entrada; se predice el comportamiento de los parámetros de salida. El modelado con enfoque directo se puede utilizar en la fase de diseño a fin de optimizar el desempeño energético de una edificación.

En el enfoque basado en los datos, se busca llegar a la descripción matemática de los parámetros operativos del sistema a fin de tener el rendimiento energético deseado, este enfoque es utilizado en los casos donde la edificación ya se encuentra construida y se conocen las condiciones de operación, sus parámetros de entrada y salida.

En la actualidad existen poderosos softwares que realizan el modelado matemático conjuntamente con la introducción de datos conocidos.

3.1.2 Etapas del proceso de simulación

Para una simulación energética pueden elegirse métodos de cálculo distintos; según el tipo de software puede realizarse simulaciones

en tiempo discreto o por eventos discretos, sin embargo; generalmente en una simulación hay tres etapas que siguen una secuencia clara (Figura 3.1) [28].

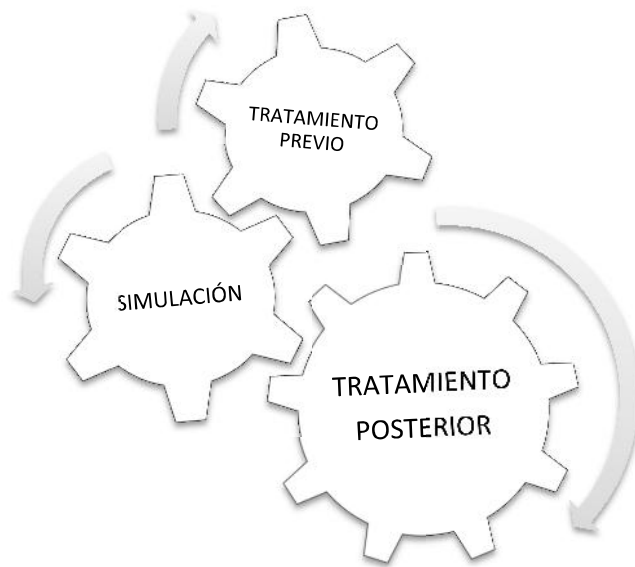


FIGURA 3.1 ETAPAS DE UN PROCESO DE SIMULACIÓN.

- **Tratamiento previo:** Esta etapa constituye la primera parte del período de línea base. Una vez realizado un levantamiento de información para el caso de estudio, con ayuda de algún software determinado se define un modelo matemático, el cual contiene los datos de entrada para el proceso de simulación.
- **Simulación:** A partir de los datos contenidos en el modelo previamente definido, se genera mediante cálculos realizados en

un computador la información específica requerida por el usuario; esto constituye un modelo de simulación.

- **Tratamiento posterior:** Consiste en la presentación de la información contenida en el modelo de simulación de acuerdo a los requerimientos del usuario.

3.1.3 Formación de modelos

Modelo de definición (Modelo-D)

Durante la primera etapa del proceso de simulación se elaboran modelos matemáticos que permiten hacer abstracción de la problemática real. Los softwares emplean una formulación matemática discreta para establecer las ecuaciones que definen el comportamiento del modelo de definición que contienen los datos geométricos y físicos relacionados al problema.

Debido a la relación que existe entre la geometría y las propiedades físicas, durante la definición de un modelo el ser humano emplea dos tipos de abstracciones para la elaboración de un modelo [28]:

- **Objetos geométricos:** son todas las representaciones geométricas en una, dos o tres dimensiones que definen la

forma, tamaño y orientación de algún cuerpo o sistema más complejo que se pretenda modelar.

- Objetos físicos: conjunto de propiedades intensivas que poseen los objetos geométricos en un lugar determinado.

Definición geométrica del modelo

Dentro del proceso de una simulación energética, uno de los puntos más influyentes es el cálculo de la energía térmica. De manera general los softwares para simulación energética tratan de estimar las aportaciones de masa y energía a un determinado volumen de control, asociándole ciertas características físicas (temperatura, humedad, etc.) que se emplean para determinar su comportamiento energético.

Un edificio puede ser conformado por un grupo de espacios (oficinas, salas de juntas, auditorios, etc.), los cuales están constituidos por objetos geométricos que forman una representación de la envolvente y de objetos físicos que añaden al modelo las condiciones del entorno.

Un volumen de control es un elemento cuyas fronteras se limitan a partir de los objetos geométricos que definen la forma y

dimensiones de espacios que conforman el modelo; puede definirse de forma que abarque más de un espacio de trabajo.

En sistemas complejos como en el caso de un edificio con múltiples espacios de trabajo, existe una interacción entre los distintos volúmenes de control.

Un modelo geométrico se construye para codificar las relaciones de pertenencia y de vecindad que existen entre cada objeto geométrico con los elementos de volumen o espacios a los que son asignados.

En la definición de un modelo de definición computacional el ingreso de las características geométricas se realiza mediante un software CAD que facilita la creación y edición de los objetos geométricos del modelo.

Definición física del modelo

En un modelo físico lineal, la relación que existe entre una excitación (originada por el cambio de las características físicas asignadas a un modelo) y la respuesta (cambio de algún parámetro de interés en el modelo), se define matemáticamente por la denominada función de transferencia.

La función de transferencia es la curva de respuesta a una determinada excitación que varía con el tiempo, por lo que esta función caracteriza por completo al modelo físico.

En el modelo de definición de un edificio existen múltiples fenómenos de transferencia de masa y energía que pueden estudiarse mediante modelos físicos lineales, por ejemplo; la conducción unidimensional de calor a través de una superficie perpendicular a la dirección del flujo. Sin embargo; existen otros fenómenos como intercambio de calor por radiación y convección que son de carácter no lineal, en estos casos suele realizarse una aproximación mediante modelos físicos lineales equivalentes que reducen significativamente el número y el tiempo de cálculo.

Modelo de simulación (modelo-S) Un modelo de simulación (modelo-S) se constituye de la información obtenida a partir de los cálculos realizados sobre el modelo de definición. En un software de simulación el modelo de simulación se genera internamente durante el proceso de cálculo sin que exista un desarrollo gráfico del mismo. [29]

3.2 Resumen de la metodología empleada

Debido a que el edificio a modelar se encuentra ya construido, se va a emplear un enfoque de modelado basado en los datos; la normativa propone para este caso un proceso de simulación calibrada, para esto se deberá contar con un modelo de simulación de línea base que deberá ser validado mediante la aplicación del lineamiento 14-2002 del ASHRAE.

Para determinar la línea base energética, se debe elaborar durante el período de línea base un modelo de definición empleando los datos de las condiciones actuales de la edificación. Una vez determinada la línea base se plantearán medidas de ahorro de energía que permitan generar modelos-S que reporten menores consumos del edificio.

Como se describió en la sección 3.1.2 un proceso de simulación consta de tres etapas, sin embargo; debido a los objetivos de este estudio se ha dispuesto su desarrollo en dos etapas que se desarrollarán en los capítulos 4 y 5, respectivamente.

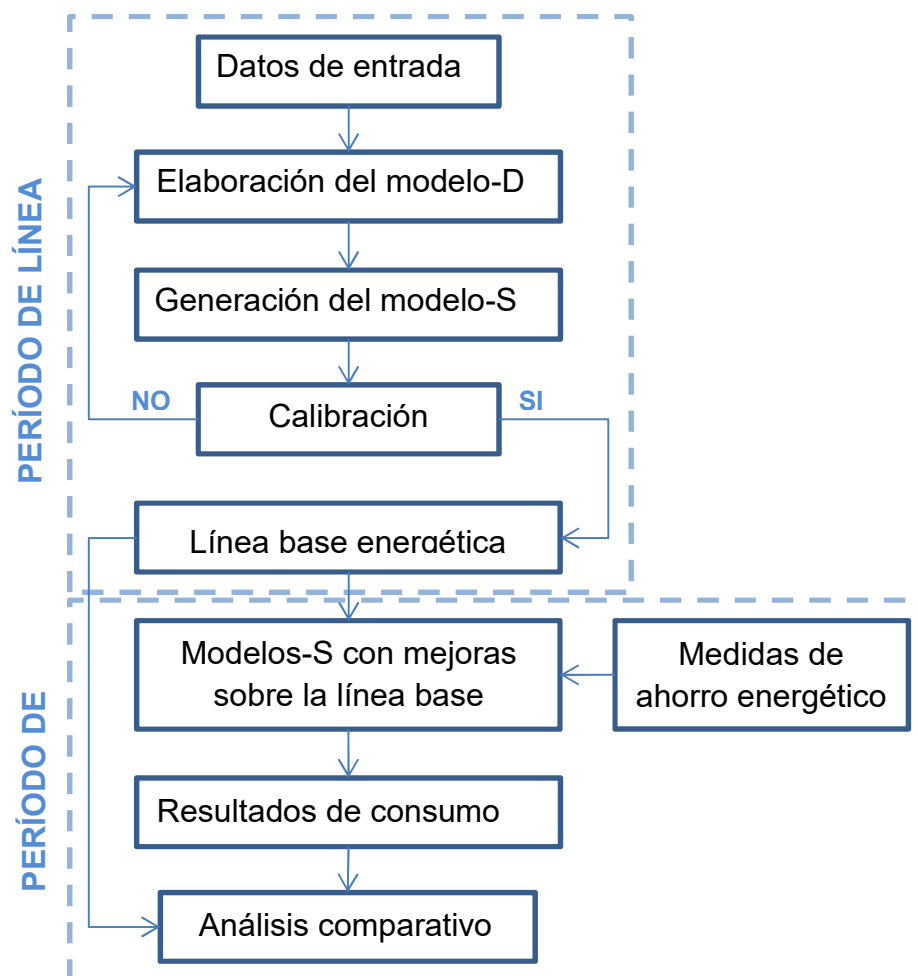


FIGURA 3.2 DIAGRAMA GENERAL PARA EL PROCESO DE MODELADO ENERGÉTICO A DESARROLLAR.

En la figura 3.2 se muestra mediante un diagrama general las relaciones de dependencia que existen entre las distintas etapas del proceso de modelado a desarrollar, dichas etapas se describen a continuación:

- **Modelado de la línea base:** Esta parte corresponde a la primera etapa del proceso de simulación y consiste en realizar un levantamiento de información para elaborar un modelo de definición computacional del edificio, con el cual se generará un modelo de simulación que será validado mediante un proceso de calibración y permita establecer una línea base energética.
- **Simulación energética del modelo mejorado:** En esta parte se empieza planteando medidas de ahorro energético que serán implementadas en el modelo de simulación de línea base para su simulación posterior. Una vez simuladas las medidas de ahorro se evaluarán las mejoras aportadas mediante un análisis comparativo de los resultados.

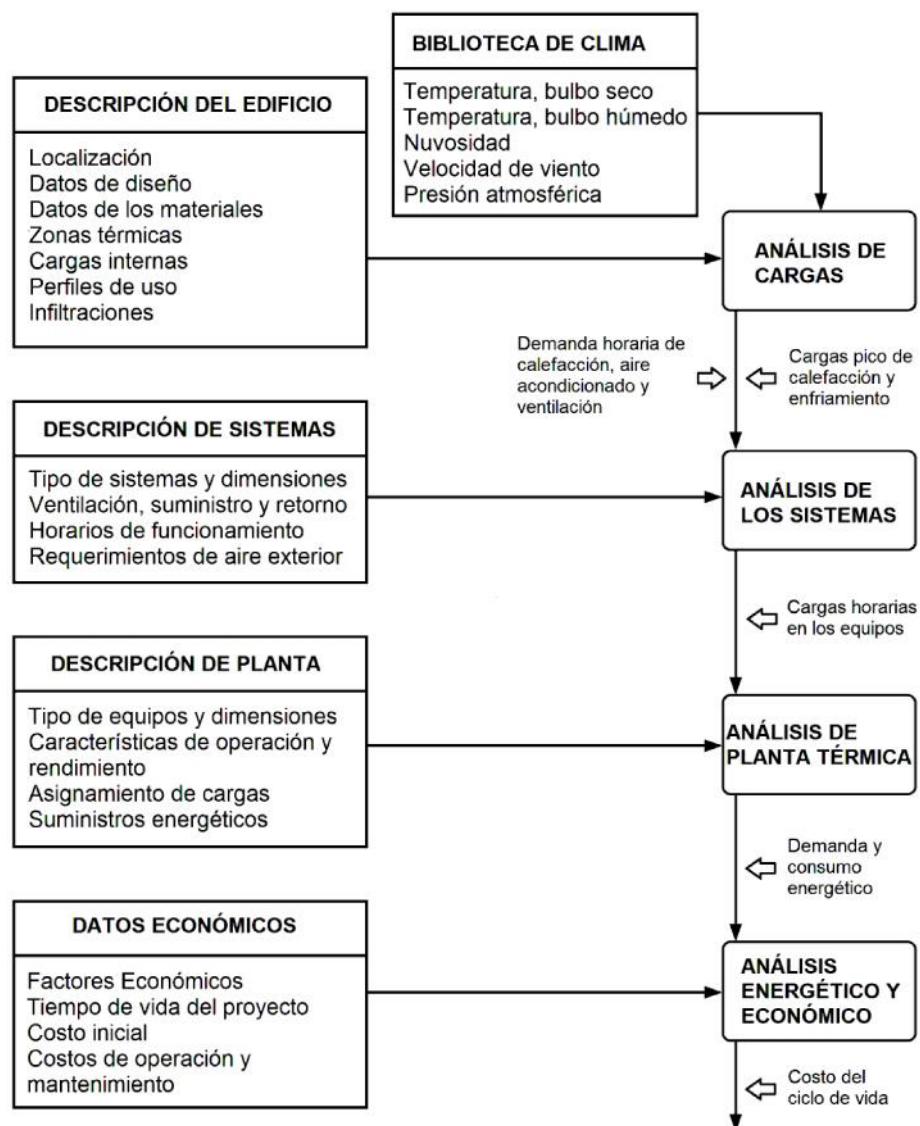


FIGURA 3.3 DIAGRAMA DE FLUJO PARA MODELADO ENERGÉTICO EN SOFTWARE DE SIMULACIÓN (ADAPTADA DE ASHRAE FUNDAMENTALS CAPITULO 19).

Los datos de entrada recopilados serán organizados para su ingreso al software de simulación de acuerdo a los requerimientos

que se establecen cuando se emplea el método de enfoque directo según se muestra en la figura 3.3.

3.2.1 Modelado de la línea base

El modelado de línea base de un edificio consiste en la definición de las condiciones operativas (clima, materiales, ocupación, etc.) y de los sistemas que consumen energía, a fin de crear un modelo con un comportamiento energético similar al real. En la figura 3.4 se presenta un esquema con las tres etapas presentes dentro del período de línea base.

a. Levantamiento de información

Los planos arquitectónicos muestran cómo se encuentra dividido los espacios dentro del edificio. Datos del clima pueden obtenerse descargando archivos de clima desde internet, o elaborar un archivo de clima propio con datos de fuentes oficiales. Las planillas del consumo energético del edificio es información clave para el proceso de calibración que se explica más adelante.

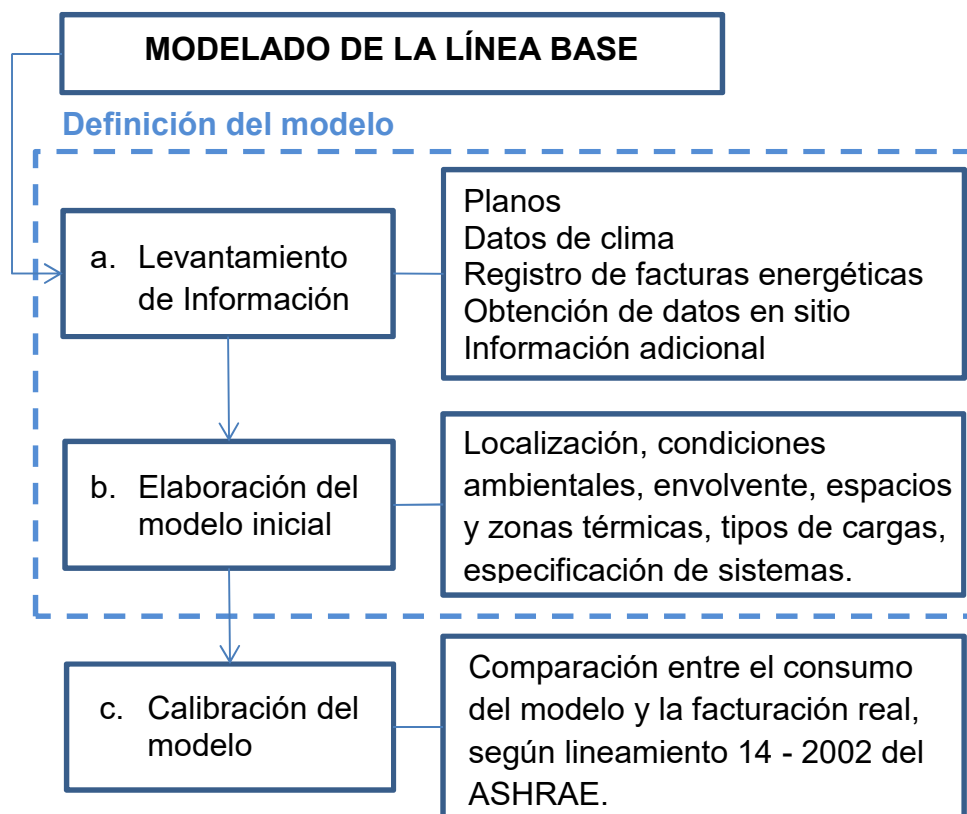


FIGURA 3.4 DESARROLLO DEL PERÍODO DE LÍNEA BASE DEL MODELO.

La información obtenida en sitio consiste en un levantamiento de las condiciones operativas del edificio para iluminación, ocupancia, climatización, equipos internos entre otras que se consideren como cargas energéticas. Además se toma en consideración elementos de la envolvente para un detalle más profundo en la caracterización de los materiales.

b. Elaboración del modelo inicial

Como modelado del edificio se introducen los datos que encierran los aspectos geométricos y físicos de la envolvente, las características de los sistemas instalados en el edificio y las condiciones de funcionamiento recopiladas en la sección anterior. Además se incluye datos de localización, espacios y zonas térmicas en las que se ha dividido el modelo.

c. Calibración del modelo

Para desarrollar la simulación calibrada es necesario realizar afinamientos posteriores a la elaboración del modelo de definición inicial, comparando los consumos calculados con los registros de consumo energético del edificio real, hasta alcanzar un cierto nivel de aproximación.

Durante las simulaciones calibradas se emplean técnicas de regresión lineal y se determina la bondad de ajuste de los valores calculados del modelo de definición que se utiliza para describir todas las condiciones operativas de la línea base del edificio.

Para la validación del modelo de definición se pueden emplear varios métodos de calibración según el número de puntos de datos

con que se trabaje el modelo de regresión lineal (intervalos de medición del consumo energético durante un período de tiempo determinado), entonces; se pueden usar métodos de calibración de tipo mensual, horario, etc. y la elección del método dependerá del nivel de detalle con que se cuente en los registros de consumo energético real.

Independientemente del método de calibración empleado hay ciertos índices que son comúnmente usados para determinar qué tan buena es la descripción que hace un modelo matemático de la variabilidad en los datos medidos. Según el lineamiento 14 - 2002 del ASHRAE se usan los siguientes tres índices [9]:

- El coeficiente de variación de la desviación estándar (CVSTD), que se define como sigue:

$$C = \frac{1}{\bar{y}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{(n-1)}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

- El coeficiente de variación del error cuadrado medio (CVRMSE), definido de la siguiente forma:

$$C \quad E = \frac{1}{\bar{y}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p)}} \quad \text{Ec. 3.2}$$

- El error de sesgo medio normalizado (NMBE), definido como sigue:

$$N \quad = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{\bar{y} \times (n-p)} \times 100 \quad \text{Ec. 3.3}$$

En donde:

y : Variable dependiente o alguna función de variable(s) dependiente(s) (consumo energético medido).

$\hat{y}$: Valor predicho del modelo de regresión de y (consumo energético simulado).

$\bar{y}$: Media aritmética de los n valores de y (media de los datos de consumos medidos).

n : Número de puntos de datos (meses, horas, etc).

p : Número de parámetros o términos en el modelo base, desarrollados por un análisis matemático de los datos de referencia ($p = k + 1$).

Para los índices CVRMSE y NMBE se han establecido tolerancias de referencia para determinar si un modelo se encuentra calibrado;

dichas tolerancias obtenidas de manera empírica varían de acuerdo al método de calibración empleado según se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 2
TOLERANCIAS PARA INDICES DE CALIBRACIÓN

Tipo de calibración	Índice	Tolerancia [%]
Mensual	CVRMSE	± 5
	NMBE	± 15
Horaria	CVRMSE	± 10
	NMBE	± 30

3.2.2 Simulación de las medidas de eficiencia energética.

Obtenido el modelo de línea base como lo detalla la sección anterior, se procederá a analizar el comportamiento de los parámetros para poder obtener las oportunidades de ahorros, y basado en criterios técnicos establecer la medidas a considerar para simulación. Finalmente, analizando los resultados se evaluarán las medidas más representativas. La Figura 3.5 muestra un esquema del proceso de simulación y sus etapas son desarrolladas más adelante.

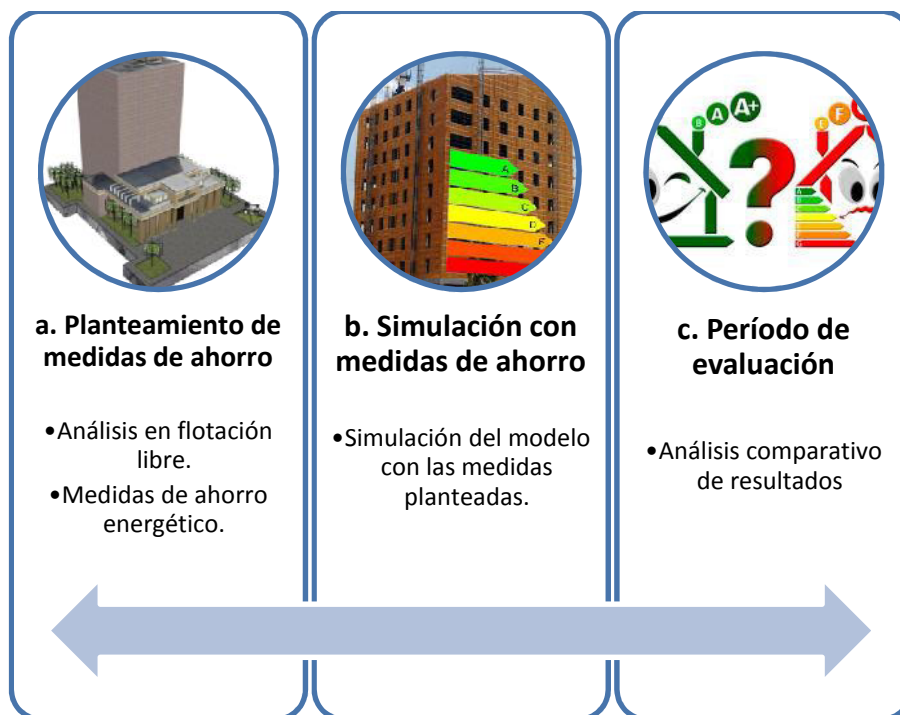


FIGURA 3.5 DIAGRAMA DEL PROCESO DE SIMULACIÓN.

a. Planteamiento de medidas de ahorro energético

- **Análisis en flotación libre:** Consiste en realizar un análisis del comportamiento de los parámetros de confort al interior del edificio en ausencia de climatización artificial, los parámetros a analizar son temperatura, humedad e iluminación.
- **Medidas de ahorro energético:** Una vez determinados los parámetros más influyentes en el consumo energético, se

proponen una serie de medidas de ahorro energético que de forma práctica permitan reducir el consumo hasta un 15%.

b. Simulación con medidas de ahorro energético

Simulación del modelo con las medidas planteadas: Consiste en generar una serie de modelos de simulación mediante los cuales se busca determinar el porcentaje de ahorro energético asociado a cada una de las medidas planteadas, también implementarán todas las medidas para generar un único modelo de simulación que permita determinar el porcentaje de ahorro total en la edificación.

c. Período de evaluación

Análisis comparativo: Consiste en contrastar los resultados obtenidos en las distintas simulaciones con los valores establecidos como línea base con el objetivo de evaluar las mejoras aportadas por las medidas de ahorro energético implementadas.

3.3 Determinación del Software para modelado y simulación

El cálculo del comportamiento de consumo de energía en un edificio, es una tarea compleja, más aun si se desea realizar estudios con variabilidad del tiempo, selección de materiales, perfiles de ocupación, iluminación y demás parámetros que implican un análisis dinámico.

El software de cálculo a utilizar debe ser capaz de realizar simulaciones anuales con intervalos de tiempo de al menos una hora, es decir; 8760 horas. Con el avance de la computación, se han desarrollado múltiples software que permiten realizar los cálculos del consumo energético de una construcción, para lo que cada programa posee diferentes características de funcionamiento. En la presente sección se describirán los softwares más utilizados que fueron considerados para realizar la simulación del proyecto.

3.3.1 Alternativas de softwares para simulación energética

Los programas de simulación energética buscan estimar mediante el desarrollo de un modelo el comportamiento lo más cercano al

real. El alcance de un software debe considerarse como mínimo [28] que pueda realizar un análisis de lo siguiente:

- Cargas Térmicas
- Envolvente del edificio, luz natural e insolación
- Infiltración, ventilación, aire de la zona y flujo interzonal
- Sistemas de energía renovable
- Sistemas eléctricos y equipos
- Sistemas HVAC
- Equipos HVAC
- Emisiones medioambientales
- Disponibilidad de datos climáticos
- Estudios económicos
- Informes de resultados

Los siguientes programas han sido considerados de mayor aplicación para este tipo de proyecto.

Energy Plus

Este programa fue desarrollado utilizando las características y capacidades de los programas BLAST y DOE-2, los cuales fueron software impulsados por EEUU hasta 1996, lo que fue las bases del Energy Plus.

Energy Plus es un software muy usado por los profesionales para el modelado energético de los edificios. Optimiza el diseño de una construcción para el uso de menos energía. Tiene la capacidad de realizar cálculos para tramos cortos de tiempo, hasta menores a una hora según el detalle del análisis a realizar.

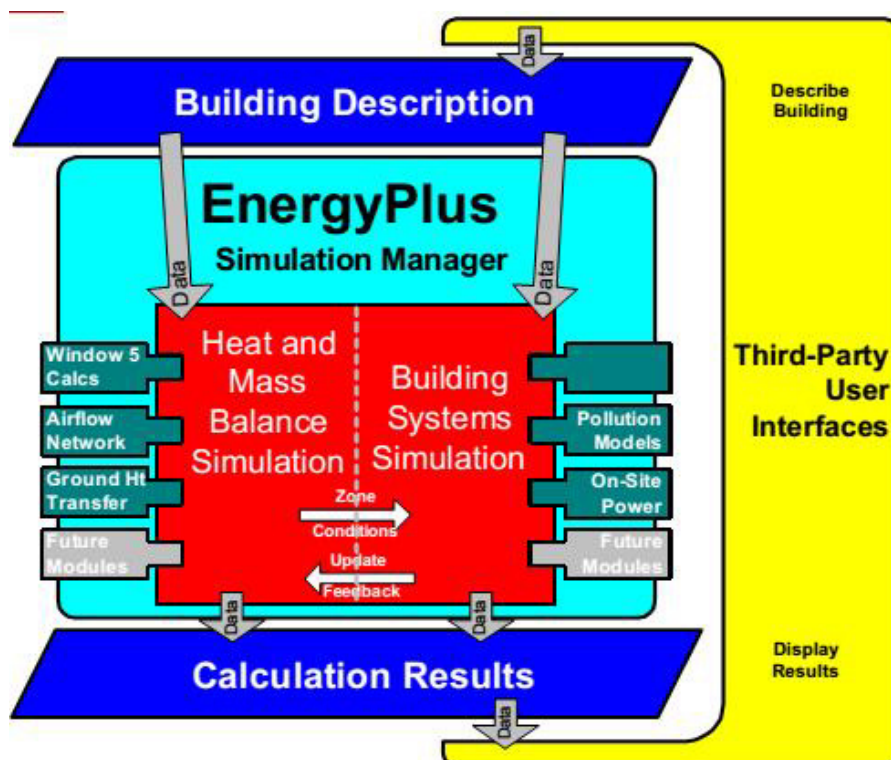


FIGURA 3.6 MANEJO DE SOFTWARE CON LA INTERFAZ

Para las entradas y salidas de datos, el programa posee un código estructurado modular, el cual es usado para tanto las entradas o salidas y migrar hacia un software externo. Este software sirve

como interfaz de ingreso de datos, y a su vez para visualizar los resultados. Una representación de la interacción la muestra la figura 3.6.

El programa calcula la capacidad de calefacción y refrigeración del edificio y su respuesta para el sistema eléctrico. También predice la temperatura del espacio climatizado dependiendo del tamaño del sistema ingresado para proporcionar el mayor confort bajo condiciones saludables a los ocupantes.

Equest

Equest es un software basado en DOE-2, el cual utiliza una interfaz más interactiva, usando asistentes que facilitan la creación de la geometría, otro asistente que permite medir la eficiencia energética de un edificio basado en la modificación de la línea base.

Estos asistentes guían al usuario a ingresar las características para la creación de un modelo más efectivo.

Equest realiza una simulación horaria del modelo durante un año, este a su vez, calcula los requerimientos energéticos para calentar y enfriar el edificio a cada hora, considerando los factores que

influyen en la carga, tales como: paredes, ventanas, equipos, ocupancia, etc. Este software genera reportes de los resultados, el que muestra los fines de uso de la energía dependiendo de las condiciones de operación.

Domus 2013

Domus es un software en desarrollo creado por el gobierno de Brasil y ELECTROBRAS, el cual está diseñado para utilizar las características zonales propias de Brasil.

Domus ha sido el primer programa higrotérmico y simulación energética de los edificios para el uso racional de la energía y obtener mejor equilibrar el trípode economía-energía-medio ambiente. Este programa proporciona la temperatura y la humedad en las paredes de los perfiles de intervalo de tiempo, y valores actuales de temperatura y humedad relativa para cada zona de uno o más edificios, teniendo en cuenta no sólo el transporte de calor, sino también de vapor y líquido a través de la envoltura el edificio.

Este software posee una interfaz gráfica la cual permite crear una geometría compleja, según lo requerido, además se puede importar información en formatos IDF y DFX. Para la demanda de energía

propia del edificio, el programa permite el ingreso de datos de entrada tales como: Equipamiento, generación de vapor, iluminación, personas y mobiliario.

Además el programa se encuentra en desarrollo de herramientas que permitan el ingreso de equipos HVAC considerando: acondicionadores de aire, calefacción eléctrica, ventilación mecánica y enfriamiento evaporativo.

3.3.2 Selección del Software para simulación

Los softwares descritos anteriormente, han sido considerados para desarrollar el proceso de modelado debido a la disponibilidad e información que se posee de éstos, sin embargo es necesario elegir un software que se ajuste a las necesidades de este estudio.

Para realizar la selección del software es necesario realizar una comparación de algunas características de interés, por este motivo se ha elaborado una matriz que permita determinar el software más apropiado para este proyecto, dicha matriz se presenta a continuación (Tabla 3).

TABLA 3
MATRIZ DE SELECCIÓN DE SOFTWARE

	Relevancia [%]	ENERGY PLUS		EQUEST		DOMUS	
Interfaz propia	20	0	0	1	0	1	10
Motor de simulación	10	1	10	1	10	1	10
Asistentes	10	1	10	1	10	0	0
Cálc. transiente de HVAC	20	1	20	1	20	0	0
Sist. Energías Renovables	10	1	10	1	10	0	0
Elementos de Sombra	5	1	5	0	0	1	0
Edición de equipos HVAC	15	1	15	0	0	0	0
Plantillas	5	1	5	1	5	0	0
Generador de Reportes	5	1	5	1	5	1	5
<i>TOTAL [%]</i>	<i>100</i>		<i>80</i>		<i>60</i>		<i>25</i>

Como se puede observar el software que alcanzó la mayor puntuación es Energy Plus por tanto será elegido como motor de cálculo para la simulación.

3.3.3 Descripción del software seleccionado

Energy Plus.

Energy Plus se caracteriza por su forma de ingreso de los datos, el cual es de tipo modular según el tipo de información que requiera. La siguiente figura muestra un esquema de la interacción entre los módulos en el software.

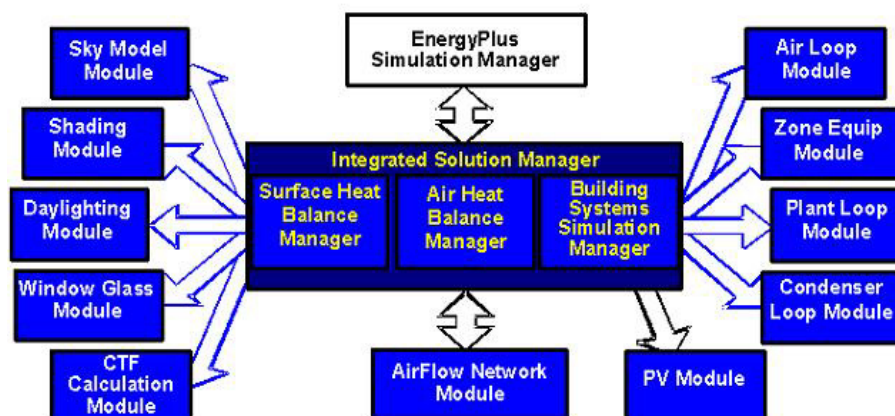


FIGURA 3.7 INTERACCIÓN DE MÓDULOS DE ENERGY PLUS.

Surface Heat Balance Manager: La función de este manager es de realizar los cálculos respectivos de transferencia de calor entre superficie realizando balances de energía ya sea de conducción, convección y radiación, dentro o en la superficie externa del edificio.

Air Heat Balance Manager: Este manager realiza el balance de energía considerando las infiltraciones, recambios de aire y fugas dadas en el sistema. Esto sirve como el enlace entre la energía en las superficies del edificio, y los sistemas HVAC instalados.

Building Systems Simulation Manager: Realiza el control de la simulación de los equipos HVAC y de los sistemas eléctricos. Esto

va desde los lazos por donde se transporta el aire, tales como ventiladores de entrega y retorno para equipos donde se realiza el intercambio de energía. Posterior a esto analiza según el caso equipos que generen la energía, ya sean chillers, calderas o plantas. Además, en este manager interactúa también con la generación de dispositivos fotovoltaicos.

Open Studio.

El ingreso de datos así como la lectura de los resultados en Energy Plus pueden ser engorrosos debido a la estructura del software; no obstante, existen otros programas que simplifican el proceso de modelado mediante una interfaz gráfica más amigable con el usuario.

En este proyecto se usará el software Open Studio, el cual ha sido desarrollado por el *“Laboratorio Nacional de Energías Renovables”* del gobierno de Estados Unidos y consta de un conjunto de herramientas para el modelado en Energy Plus.

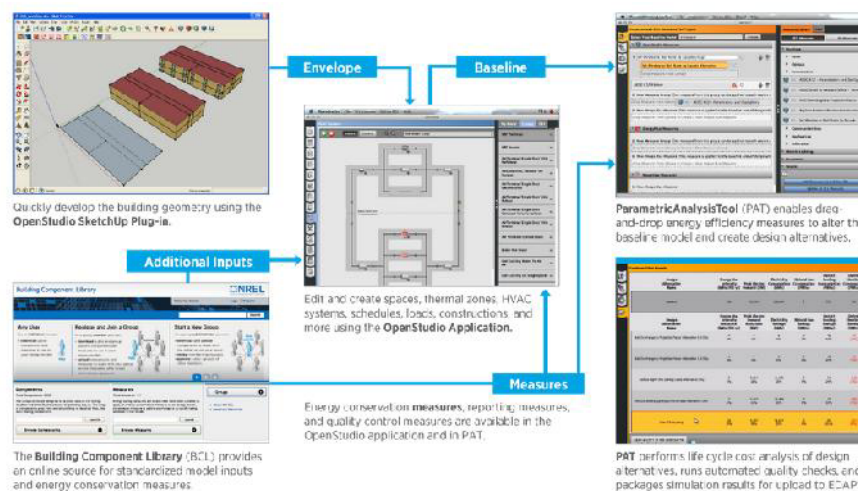


FIGURA 3.8 DIAGRAMA DEL FLUJO DE TRABAJO EN OPENSTUDIO [30]

Open Studio permite trabajar de manera conjunta con Google SketchUp usando un complemento que agrega herramientas al entorno de trabajo de este software. De esta manera es posible combinar las prestaciones de ambos programas para crear la geometría y asignar atributos a los diferentes elementos de un modelo.

3.4 Definición de los parámetros de modelado

Para facilitar el proceso de modelado y su análisis posterior es conveniente definir los parámetros que serán empleados en las

distintas etapas tanto para las condiciones ambientales, operativas así como para los materiales.

- Temperatura de bulbo seco
- Temperatura de bulbo húmedo
- Humedad relativa
- Calor específico
- Conductividad
- Ocupación
- Densidad de iluminación
- Densidad de Equipos Internos
- Flujo de aire

CAPÍTULO 4

4. MODELADO DE LA LÍNEA BASE

Para analizar el comportamiento energético del edificio, es necesario elaborar un modelo calibrado bajo las condiciones de funcionamiento reales. Los aspectos que determinan esas condiciones son la localización, condiciones ambientales, envolvente, tipos de espacios, zonas térmicas, cargas de enfriamiento, especificación de los sistemas de climatización instalados y otros equipos que consumen energía.

Debido a la gran cantidad de espacios y zonas térmicas que conforman el edificio y que se deben especificar en el modelo computacional; el proceso de definición puede resultar extenso y repetitivo por este motivo en el apéndice C se presenta un desarrollo ordenado de la descripción geométrica y física, mientras que en este capítulo se presentan los datos tabulados para su ingreso con el respectivo software: sketch up para ingresar geometría y OpenStudio para descripción física.

4.1 Definición del modelo

4.1.1 Localización

El Edificio del Gobierno Zonal está ubicado en la zona norte de la ciudad de Guayaquil al pie de la Avenida Francisco de Orellana y Justino Cornejo, con la siguiente ubicación geográfica: latitud: 2° 09' S y longitud: 79° 53' W.



FIGURA 4.1 UBICACIÓN DE EDIFICIO.

En la figura 4.1 se observa que el edificio está ubicado de forma tal que la fachada principal está orientada en dirección sur oeste.

4.1.2 Condiciones ambientales

Por estar ubicada en la zona ecuatorial, la ciudad de Guayaquil posee un clima tropical con temperaturas cálidas durante todo el año, existiendo dos períodos climáticos diferenciados. Durante la estación lluviosa que va desde enero hasta mayo el clima es tipo tropical de monzón mientras que en los meses de junio hasta diciembre el clima es tropical seco (Figura 4.2).

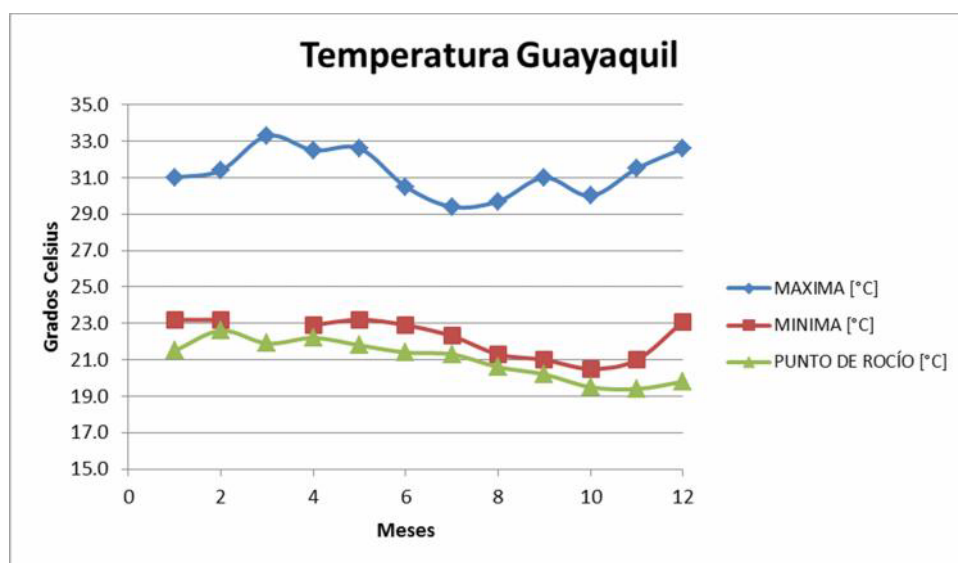


FIGURA 4.2 TEMPERATURAS EN GUAYAQUIL (INAMHI-2011)

En el apéndice B de la normativa AHRAE 90.1 – 2007 se presenta una clasificación de las zonas climáticas para varias ubicaciones internacionales (ver apéndice D). De acuerdo a dicha clasificación

el clima que corresponde a la ciudad de Guayaquil está dado por la zona 1A con las siguientes características:

- Muy caliente
- Húmedo
- Criterio térmico: $5000 < \text{CDD}_{10^{\circ}\text{C}}$

Los datos climáticos para la ciudad de Guayaquil que se introducen en el modelo se describen con mayor detalle en la sección 2.2; éstos datos componen el archivo de clima se muestran en el apéndice E.

Para el dimensionamiento del sistema de climatización es necesario introducir los datos del día de diseño, para esto se emplea un archivo (ECU_Guayaquil.ddy) que puede editarse mediante el editor de IDF de EnergyPlus (ver apéndice E) y se ingresa al modelo desde la aplicación OpenStudio en forma similar a la descrita anteriormente.

4.1.3 Envolvente

Diseño Arquitectónico

El edificio posee una arquitectura que fusiona los estilos colonial y contemporáneo, la fachada de las primeras tres plantas es tanto vidriada como de hormigón, mientras que el resto del edificio posee una fachada completamente vidriada. En la tabla 4 se muestra la proporción de materiales en la envolvente.

TABLA 4
PROPORCIÓN DE MATERIALES DE LA ENVOLVENTE

Material de fachada	Presencia [%]
Hormigón	25
Vidrio	75

El edificio tiene una capacidad para 1300 funcionarios, 250 líneas telefónicas, siete ascensores y un helipuerto que puede soportar hasta 2 500 kilos de peso. La geometría del inmueble está definida por los planos arquitectónicos que muestran los detalles de cada nivel del edificio (ver apéndice F), estos planos fueron facilitados por la administración durante la etapa de levantamiento de información.

La edificación posee un sótano en donde se ubican los parqueaderos, una planta baja con una amplia zona para el vestíbulo y 15 pisos con aproximadamente 20.635 m² de área neta, la tabla 5 muestra la distribución de las áreas.

TABLA 5
DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS DEL EDIFICIO

Piso	Áreas [m²]	Área Neta [m²]
15	1317,80	1317,80
14	1317,80	1317,80
13	1317,80	1317,80
12	1317,80	1317,80
11	1317,80	1317,80
10	1317,80	1317,80
9	1317,80	1317,80
8	1317,80	1317,80
7	1317,80	1317,80
6	1317,80	1317,80
5	1317,80	1317,80
4	1317,80	1317,80
3	2685,79	1864,00
2	2513,36	1448,00
1	2513,36	1510,26
PB	2481,23	
Sótano	4328,61	

La introducción de los datos geométricos se realiza empleando el software Sketch Up 2015 a fin de elaborar un modelo tridimensional del edificio que se empleará para asignar los tipos de espacios y

zonas térmicas presentes en cada piso como se muestra en la figura 4.3.

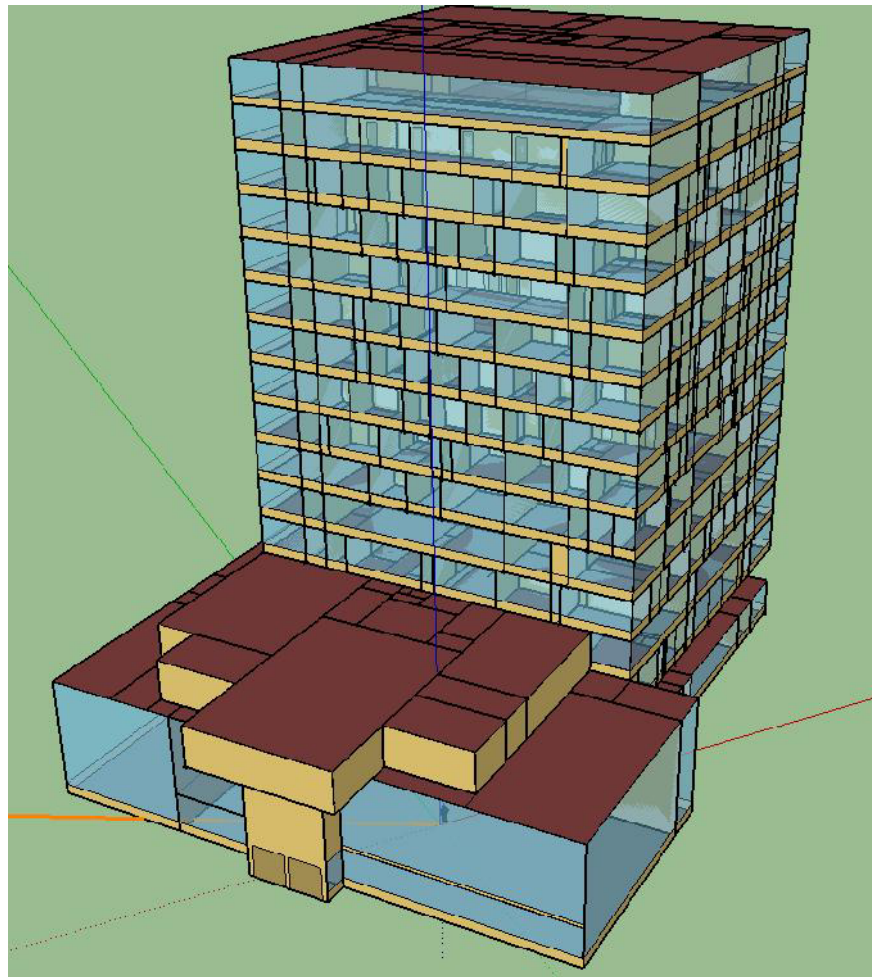


FIGURA 4.3 DEFINICION GEOMÉTRICA DEL MODELO

Materiales de la envolvente y sus propiedades

La envolvente posee distintos materiales relacionados con los objetos geométricos (paredes, ventanas, etc.) que definen la

arquitectura del edificio; aquellos que tienen contacto con el ambiente exterior forman la capa externa y los que están en contacto con el interior constituyen la capa interna. Los materiales que se comercializan en el medio, no tienen una base de datos oficial, por lo que en la tabla 6 se presentan las propiedades de los materiales de la envolvente del Departamento de Energía de Estados Unidos.

TABLA 6
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LA ENVOLVENTE
DEL EDIFICIO [29].

Capa		Material	Espesor [cm]	Conductividad [W/m-K]	Calor específico [J/kg-K]
Exterior	Pared de Hormigón	Bloque	10	1,31	837
		Enlucido	2,5	0,69	837
	Pared Vidriada	Vidrio	0,6	0,9	-
		Argón	10	0,01772	520
Interior	Pared de Gypsum	Panel Gypsum	1,27	0,16	1090
		Espacio de Aire	8	-	-
	Ventanas	Vidrio	0,6	0,9	-
	Losa + Tumbado	Losa	20	1,73	837
		Espacio de Aire	30	-	-
		Panel Gypsum	1,27	0,16	1090

Las capas definidas anteriormente constituyen las secciones de la envolvente del edificio (ver apéndice G), por tanto intervienen en todos los procesos de transferencia de calor, razón por la cual es conveniente calcular el coeficiente global de transferencia de calor por tipo de capa. En las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se detalla la constitución de las capas del edificio.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$R_T = R_{i1} + \sum \frac{e}{k} + R_e = R_{i1} + \frac{e_1}{k_1} + \dots + \frac{e_n}{k_n} + R_e \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde;

R_T : Resistencia térmica equivalente.

U : Coeficiente de transferencia de calor.

R_{i1} : Resistencia térmica interior.

R_e : Resistencia térmica exterior.

e : Espesor de material.

k : Conductividad térmica.

Aplicando la ecuación 4.2 para cada capa de la envolvente, se calcula la resistencia térmica equivalente y posteriormente el

coeficiente global de transferencia de calor empleando la ecuación

4.1. Los valores calculados se presentan en las tablas 7, 8, 9 y 10.

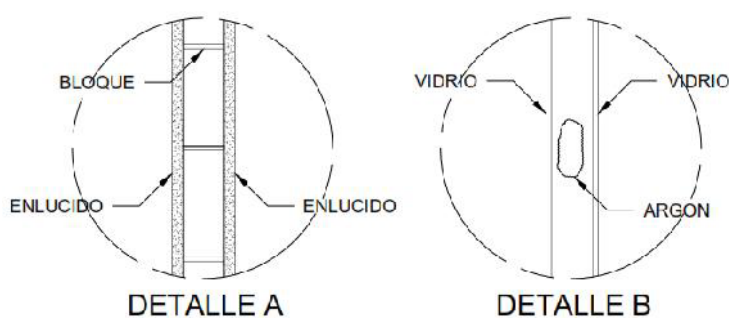


FIGURA 4.4 CAPA EXTERIOR, DETALLE A: PARED DE HORMIGON Y DETALLE B: PARED VIDRIADA

TABLA 7

CAPA EXTERIOR: PARED DE HORMIGÓN.

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Resistencia total equivalente (R_T) [K-m ² /W]		
R_{ii} :	Superficie Interior	0,120
$\sum \frac{e}{k}$:	Enlucido	0,035
	Bloque	0,194
	Enlucido	0,035
R_e :	Superficie Exterior	0,120
		$R_T = \mathbf{0,504}$
Coeficiente global de transferencia de calor (U) [W/K-m ²]		
		$U = \frac{1}{R_T} = \mathbf{1,984}$

Los acristalamientos exteriores son elementos importantes para el modelado de la envolvente, a continuación se calcula el coeficiente global de transferencia de calor.

TABLA 8
CAPA EXTERIOR: PARED VIDRIADA
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Resistencia total equivalente (R_T) [K-m²/W]		
R_{ii} :	Superficie Interior	0,120
$\sum \frac{e}{k}$:	Vidrio	0,007
	Argón	0,260
	Vidrio	0,007
R_e :	Superficie Exterior	0,120
		$R_T = \mathbf{0,393}$
Coeficiente global de transferencia de calor (U) [W/K-m²]		
		$U = \frac{1}{R_T} = \mathbf{2,543}$

Se realizan los cálculos de resistencia térmica y coeficiente de transferencia de calor para la pared de hormigón de la capa interna. La figura 4.5 muestra la configuración de las paredes de gypsum que pertenecen a la capa interna.

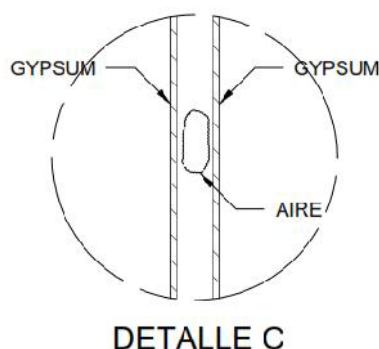


FIGURA 4.5 DETALLES DE PARED DE GYPSUM

TABLA 9

CAPA INTERIOR: PARED DE GYPSUM.

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Resistencia total equivalente (R_T) [K-m²/W]		
R_{ii} :	Superficie Interior	0,120
$\sum \frac{e}{k}$:	Panel de gypsum	0,079
	Espacio de aire (pared)	0,150
	Panel de gypsum	0,079
R_e :	Superficie Exterior	0,120
		$R_T = \mathbf{0,548}$
Coeficiente global de transferencia de calor (U) [W/K-m²]		
		$U = \frac{1}{R_T} = \mathbf{1,825}$

Por último en la tabla 10 se presentan los cálculos para la capa Losa+tumbado considerando los materiales que se muestran en la figura 4.6.

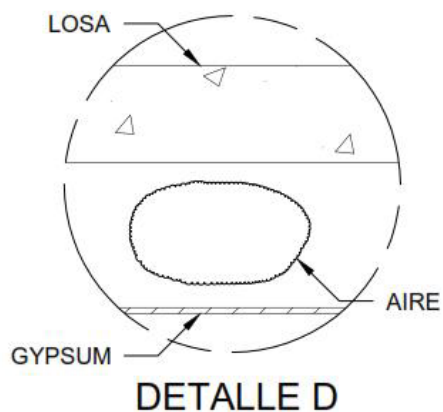


FIGURA 4.6 DETALLES DE LOSA+TUMBADO

TABLA 10

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE CAPA:

LOSA+TUMBADO

Resistencia total equivalente (R_T) [K-m2/W]		
R_{ii} :	Superficie Interior	0,120
$\sum \frac{e}{k}$:	Losa de concreto	0,155
	Espacio de aire (tumbado)	0,180
	Panel de gypsum	0,079
R_e :	Superficie Exterior	0,120
		$R_T = \mathbf{0,654}$
Coeficiente global de transferencia de calor (U) [W/K-m2]		
		$U = \frac{1}{R_T} = \mathbf{1,529}$

4.1.4 Tipos de espacios y zonas térmicas

Tipos de espacios

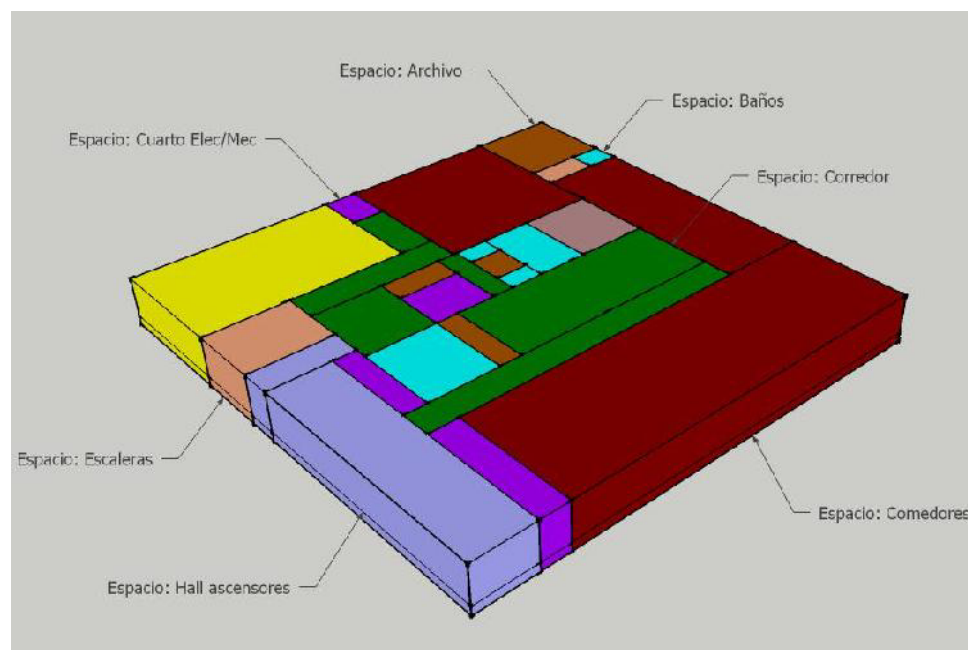
El edificio está designado para el funcionamiento de distintas dependencias del estado, por este motivo se han clasificado los espacios interiores de acuerdo a su uso. La tabla 11 que se presenta a continuación muestra los tipos de espacios definidos:

TABLA 11

TIPOS DE ESPACIOS DESIGNADOS

Tipo de espacio	Descripción	Presencia [%]
Oficinas	Oficinas de todo el edificio.	68
Baños	Baños comunes y personales	10
Corredor	Salas y pasillos interiores.	10
Sala de juntas	Auditorios y salones de conferencias.	4
Archivo	Archivos y bodegas.	3
Comedor	Comedor	2
Espacios no acondicionados	Cuarto de limpieza, escaleras, cuarto eléctrico, cuarto de manejadoras de aire.	2
Cocina	Cocina.	1

Los espacios se asignan mediante la herramienta para renderizado de objetos por tipo de espacio (Render By Space Type) en la barra que inicia como complemento en la interfaz gráfica de Sketch Up (Ver figura 4.7).



**FIGURA 4.7 DEFINICIÓN DE TIPOS DE ESPACIOS EN EL
MODELO (PISO 15).**

Zonas térmicas

Una zona térmica representa una estancia que posee determinadas condiciones y ganancias internas de la cual se quiere conocer su comportamiento térmico; por tanto, se definirá como zona térmica a un espacio o grupo de espacios en los que opere un determinado sistema de climatización.

Para una mejor descripción de las zonas presentes en el edificio, éstas se han tabulado de acuerdo a los pisos en los que se encuentran. La tabla 12 muestra un resumen de la cantidad de

zonas térmicas, conjuntamente con la designación establecida para las zonas incluidas en cada piso.

TABLA 12
ZONAS TÉRMICAS DEL EDIFICIO

Piso	No. Zonas	Designación de zonas térmicas
Sótano	1	No acondicionado
PB	6	Lobby principal, Cabinas de Atención, Comunicaciones, Planta baja, No acondicionado.
1	3	Lobby principal, Piso Uno, No acondicionado.
2	3	Lobby principal, Piso Dos, No acondicionado.
3	6	Auditorio, Atrio Auditorio, Biblioteca, Coctail Lounge, Piso Tres, No acondicionado.
4	4	Atrio Auditorio, Coctail Lounge, Piso Cuatro, No acondicionado.
5	3	Coctail Lounge, Piso Cinco, No acondicionado.
6	2	Piso Seis, No acondicionado.
7	2	Piso Siete, No acondicionado.
8	3	Cuarto TI, Piso Ocho, No acondicionado.
9	2	Piso Nueve, No acondicionado.
10	2	Piso Diez, No acondicionado.
11	2	Piso Once, No acondicionado.
12	2	Piso Doce, No acondicionado.
13	2	Piso Trece, No acondicionado.
14	2	Piso Catorce, No acondicionado.
15	3	Comedores, Piso Quince, No acondicionado.

La figura 4.8 muestra con diferentes colores las zonas térmicas asignadas en el piso 15.

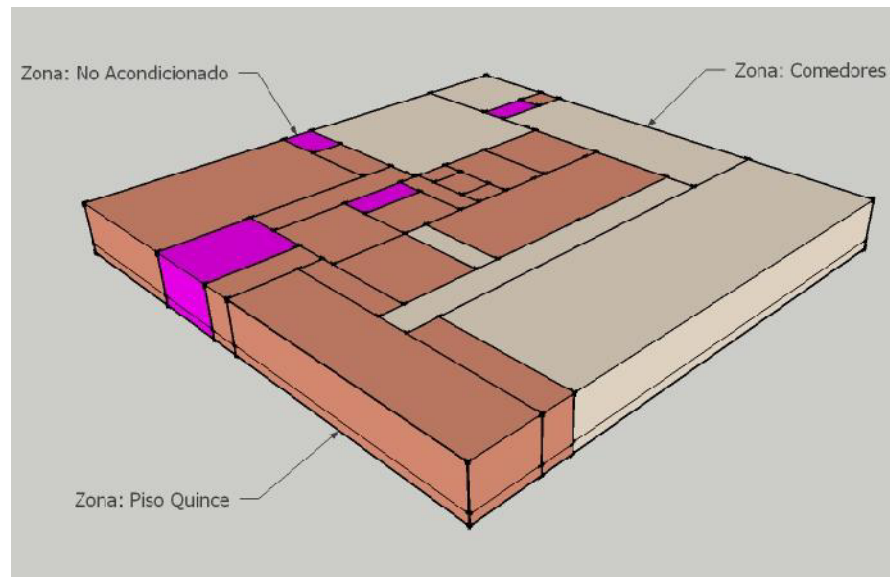


FIGURA 4.8 DEFINICIÓN DE LAS ZONAS TÉRMICAS EN EL MODELO (PISO 15).

4.1.5 Cargas internas

Empleando la aplicación de OpenStudio se introducen los parámetros que caracterizan los distintos espacios y sirven para calcular las cargas internas para los sistemas de climatización.

Cargas por persona

Se ha definido una densidad de ocupancia en cada piso, empleando los registros facilitados por la administración del edificio, para lo que se consideró el promedio de visitas diarias durante una

semana típica y el número de empleados por piso, los valores tabulados se muestran en la tabla 13.

TABLA 13
OCUPANCIA DEL EDIFICIO

Piso	Prom. visitas	Personal	Visitas [m²/persona]	Personal [m²/persona]
1	217	80	11.58	31.42
2	227	40	11.07	62.83
3	148	12	18.20	223.82
4	120	108	10.98	12.20
5	333	60	3.95	21.96
6	41	64	32.46	20.59
7	134	85	9.81	15.50
8	110	132	12.00	9.98
9	26	82	51.08	16.07
10	33	74	39.46	17.81
11	480	49	2.74	26.89
12	67	94	19.67	14.02
13	18	64	74.03	20.59
14	25	42	52.29	31.38
15	14	26	96.90	50.68
PB	338	21	3.89	62.16
Lobby	1099	32	1.06	36.59

La densidad de ocupancia por tipo de espacio fue estimada a partir del ASHRAE 62-2001, en donde se sugieren valores por defecto que se muestran en la tabla 14.

TABLA 14
DENSIDAD DE OCUPANCIA

Tipos de espacio	Densidad de ocupancia [personas/m²]
Auditorio	0,789
Baños	0,1076
Cabinas de atención	0,5382
Cocina	0,0538
Comedor	0,3
Corredor	0,0107
Cuarto TI	0,0538
Lobby	0,1076
Oficinas	0,1
Salón de conferencia	0,5382

Cargas por iluminación.

Para conocer la iluminación del edificio se realizó un levantamiento en campo de las luminarias y su ubicación; luego de procesar los datos, se obtuvieron valores promedio para las densidades de iluminación, las cuales se las ha categorizado según el tipo de espacio. La tabla 15 muestra las densidades de iluminación obtenidas:

TABLA 15
DENSIDAD DE ILUMINACIÓN

Tipos de espacio	Densidad de iluminación [watts/m²]
Oficinas	11,84
Baños	9,69
Corredor	5,38
Salas de Juntas	14,00
Archivo	8,61
Comedor	15,50
Cocina	16,68
Espacios no acond.	6,46
Cuarto de máquinas	16,15

Cargas debidas a los equipos

De manera similar al procedimiento empleado para determinar las densidades de iluminación, se realizó un levantamiento en campo de los equipos existentes en distintos espacios del edificio, para poder determinar las cargas debidas a los equipos.

En la tabla 16 se muestran las densidades de carga por tipo de espacio, para lo que se consideraron equipos tales como: Monitor, CPU, impresora, fax, televisor, proyector, cafetera, microondas, nevera, dispensador de agua, ventilador y otros equipos que se encontraron al interior del edificio.

TABLA 16
DENSIDAD DE EQUIPOS

Tipos de espacio	Densidad de equipos [watts/m²]
Baños	0,75
Corredor	1,72
Cuarto de máquinas	2,91
Cuarto TI	550,00
Lobby	0,75
Oficinas	7,64
Salas de Juntas	3,98

4.1.6 Ventilación e infiltraciones

Para el modelo propuesto las únicas infiltraciones a considerar están determinadas por ciertos objetos de la envolvente como puertas y ventanas que se definen al desarrollar el modelo geométrico.

El aire exterior que se introduce en una edificación constituye una parte de la carga de acondicionamiento del espacio, la cual es una razón para limitar la cuota de intercambio de aire en las edificaciones a un mínimo requerido.

La normativa ASHRAE 62, recomienda valores de ventilación mínimos según el tipo de espacio para la zona, el cual se determina según el número de ocupantes, una tasa de caudal de aire por área y las infiltraciones según las características de construcción.

En la tabla 17 se presentan los valores considerados para ser introducidos en el modelo de línea base desde la interfaz de Open Studio.

TABLA 17
VENTILACIÓN E INFILTRACIÓN

Tipos de espacio	Aire externo/persona [CFM/persona]	Aire externo/área [CFM/m²]	Flujo/área sup externa [CFM/m²]
Oficinas	20,00	0,00	0,48
Baños	0,00	0,65	0,48
Corredor	0,00	0,65	0,48
Salas de Juntas	5,00	0,65	0,48
Archivo	0,00	1,29	0,48
Escaleras	0,00	0,65	0,65
Espacios no acondicionados	0,00	0,65	0,65
Cuarto de máquinas	0,00	1,29	0,48

4.1.7 Sistemas HVAC.

Especificación de equipos

El edificio cuenta con un sistema de climatización de agua helada y con equipos de expansión directa en distintos puntos. La mayor parte de la climatización se realiza mediante el sistema de agua helada que cuenta con chillers, torres de enfriamiento, manejadoras de aire y sistema de distribución de aire de volumen variable.

La temperatura de operación se encuentra entre 21 [°C] y 23 [°C], y con una humedad relativa promedio del 50%. El sistema de agua helada cuenta con tres enfriadores (chillers), dos de los cuales operan son operados, descritos a continuación:

- 1 Chiller centrífugo marca Carrier de una capacidad de 450 [TON].
- 1 Chiller de compresor de tornillo marca Carrier de una capacidad de 400 [TON].
- 1 Chiller centrífugo marca Carrier de una capacidad de 500 [TON].

Para el ciclo de rechazo de calor de los chillers se cuenta con dos torres de enfriamiento marca Marley y cuatro bombas (30 HP) para la circulación del agua hacia las torres de enfriamiento.

En el sistema de distribución de aire frío del edificio se cuenta con cuatro bombas (50 HP) para la recirculación del agua helada, en cada piso hay dos manejadoras de aire de 180.000 BTU cada una, excepto en el piso 15, el cual posee 3 equipos de menores capacidad, siendo dos manejadoras de 36.000 BTU y una de 72.000 BTU, adicionalmente a esto existe una unidad de 350.000 BTU para uso exclusivo del comedor.

Para la climatización del área del lobby principal, el sistema posee 2 manejadoras de aire de 380.000 BTU, para los espectadores del auditorio del edificio, se tiene dos equipos de 140.000 BTU.

El sistema centralizado de climatización por distribución de aire se complementa mediante equipos de expansión directa ubicados en ciertos espacios con requerimientos especiales, en la tabla 18 se muestra un resumen de la cantidad y capacidad de equipos de expansión directa ubicados en cada piso y que serán considerados en el modelo:

TABLA 18
EQUIPOS DE EXPANSION DIRECTA CONSIDERADOS

Piso	Cantidad	Capacidad [BTU/hora]	Uso
10	2	30,000	
8	2	120,000	Centro de Datos
4	1	60,000	Auditorio
	1	60,000	Hall de Auditorio
3	2	60,000	Sala de Lectura y Biblioteca
	1	140,000	Coctel Lounge
PB	2	30,000	Cuarto de Comunicaciones
	2	60,000	Cabinas de Atención

El sistema de ventilación del edificio cuenta con los siguientes equipos:

- Cuatro ventiladores centrífugos para la inyección de aire marca Greenheck.
- Cinco extractores centrífugos de aire marca Greenheck.

La introducción de los sistemas en el modelo se realiza con la interfaz gráfica de Open Studio, definiéndolos desde la etiqueta de sistemas HVAC que permite agregar equipos y editar sus parámetros de operación.

Perfiles de Carga.

Para este edificio se han establecido diferentes perfiles, dependiendo el tipo de comportamiento de las cargas. Las actividades en el edificio empiezan a las 8:00 am hasta las 18:00 principalmente y se consideran los feriados nacionales. A continuación se muestran los principales comportamientos que serán utilizados para el modelado energético [31].

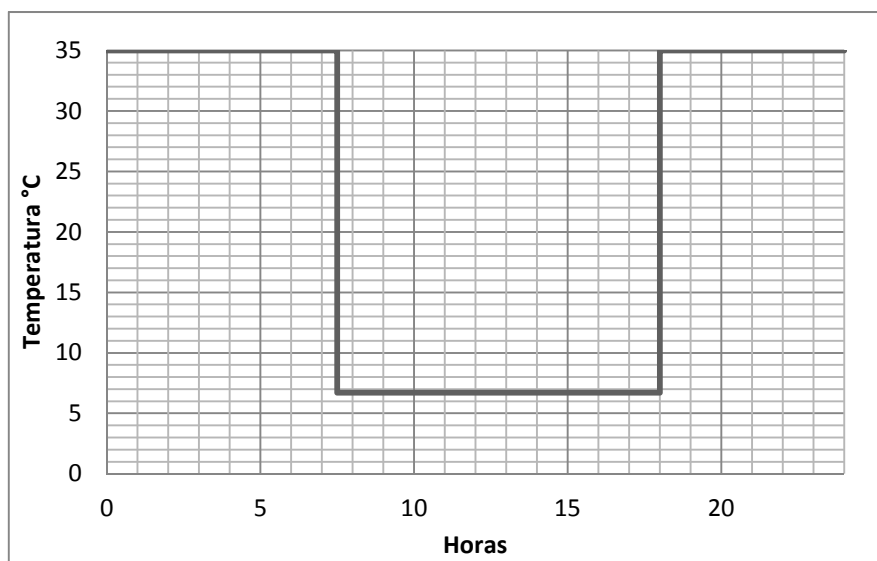
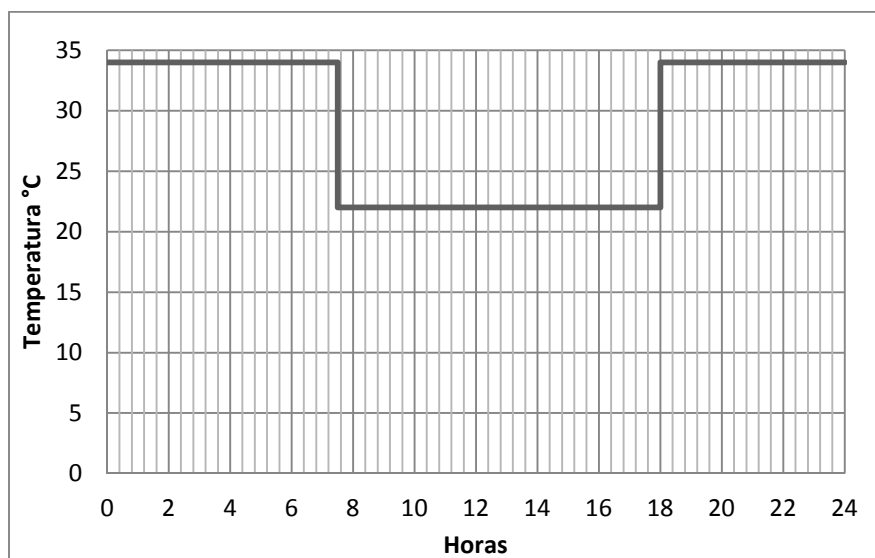
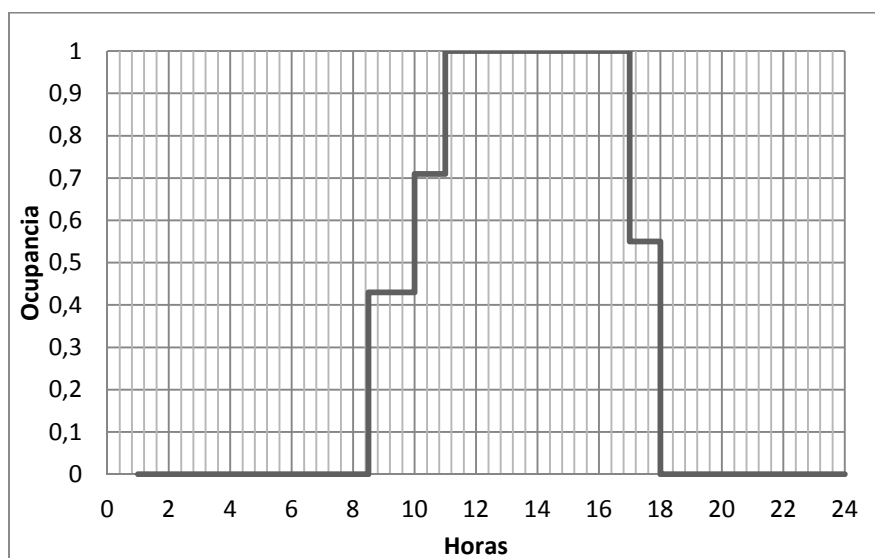
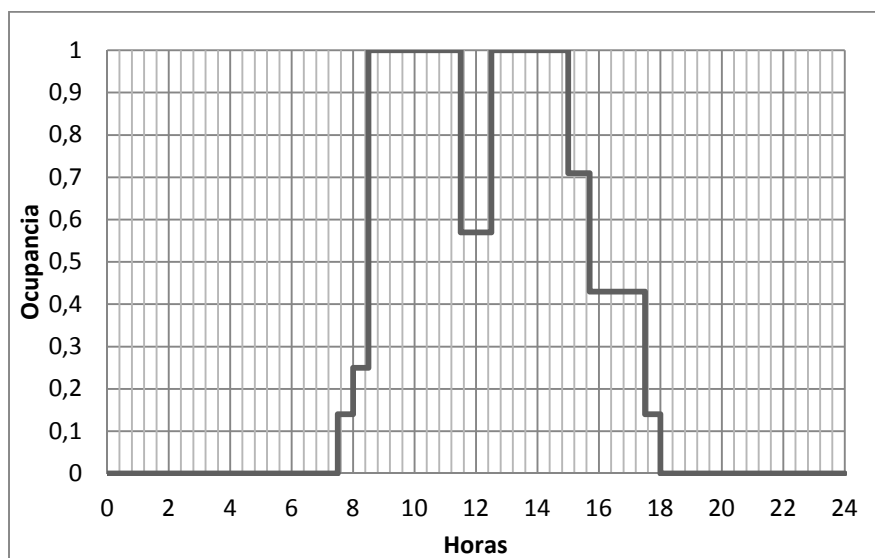


FIGURA 4.9 TEMPERATURA DE AGUA HELADA.

**FIGURA 4.10 TEMPERATURA DE CLIMATIZACIÓN****FIGURA 4.11 PERFIL DE OCUPANCIA****(ÁREAS MISCELÁNEAS)**



**FIGURA 4.12 PERFIL DE OCUPANCIA
(ÁREAS OFICINAS)**

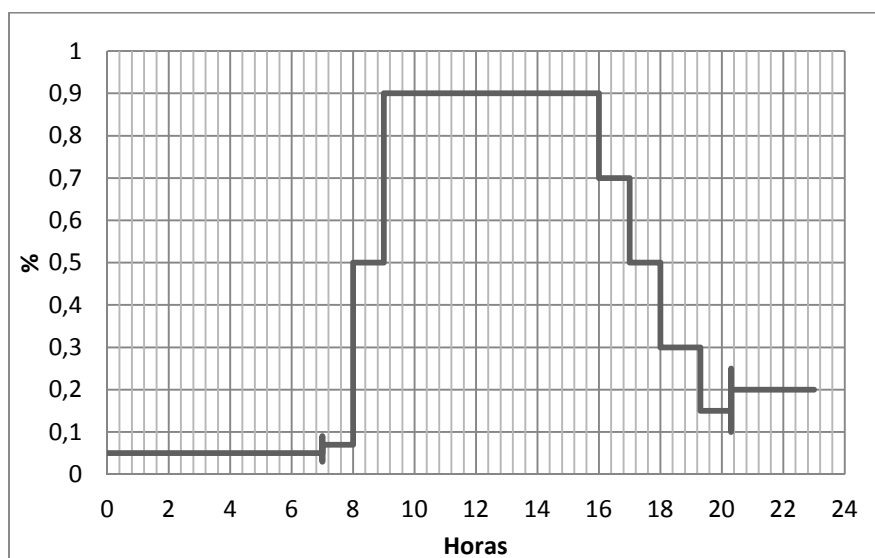


FIGURA 4.13 PERFIL DE ILUMINACIÓN

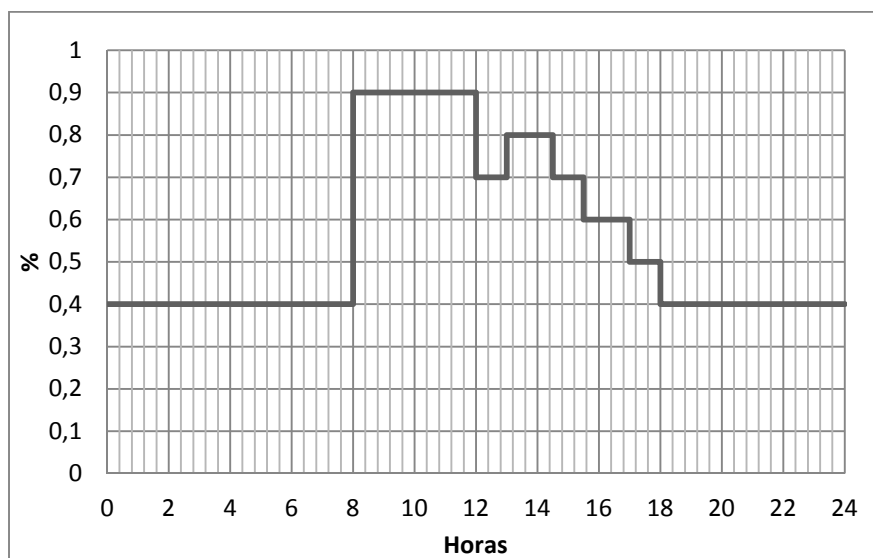


FIGURA 4.14 PERFIL DE USO DE EQUIPOS

4.2 Calibración del modelo

Para calibrar el modelo se emplea la utilidad de calibración mensual disponible en Open Studio, para lo cual es necesario ingresar el archivo de clima, el día de diseño y seleccionar un año para el análisis de acuerdo a los registros de consumo energético con los que se cuente.

Para el ingreso de los consumos mensuales se consideran valores promedio del consumo eléctrico planillado en los últimos años, en la figura 4.15 se muestra como varían los consumos promedios mensuales de energía del edificio.

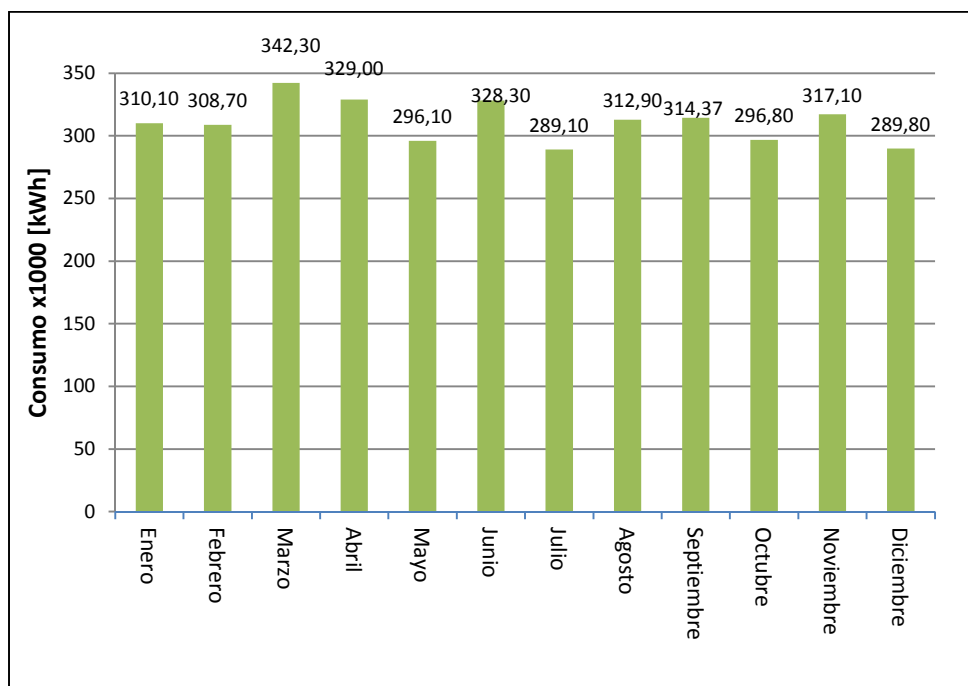


FIGURA 4.15 CONSUMO MENSUAL PROMEDIO.

Una vez definido el modelo computacional con todos los parámetros de la línea base, se procede a realizar múltiples simulaciones a fin de calibrar el modelo elaborado. Luego de cada simulación, se emplean los resultados de consumo energético para calcular y comparar los índices de calibración con las tolerancias establecidas.

En la tabla 19 que se presenta a continuación, se indican los consumos mensuales para un período de simulación anual del modelo desarrollado; además, se muestran los consumos promedio facturados y el porcentaje de diferencia entre dichos valores.

TABLA 19
CONSUMO ENERGÉTICO MENSUAL DE MODELO

Meses	Consumo simulado	Consumo promedio
Enero	309.769,90	310.100,00
Febrero	298.415,40	308.700,00
Marzo	337.101,90	342.300,00
Abril	311.206,20	329.000,00
Mayo	311.656,70	296.100,00
Junio	323.503,60	328.300,00
Julio	297.092,60	289.100,00
Agosto	336.073,90	312.900,00
Septiembre	321.160,90	314.370,00
Octubre	308.040,10	296.800,00
Noviembre	323.539,30	317.100,00
Diciembre	310.913,80	289.900,00

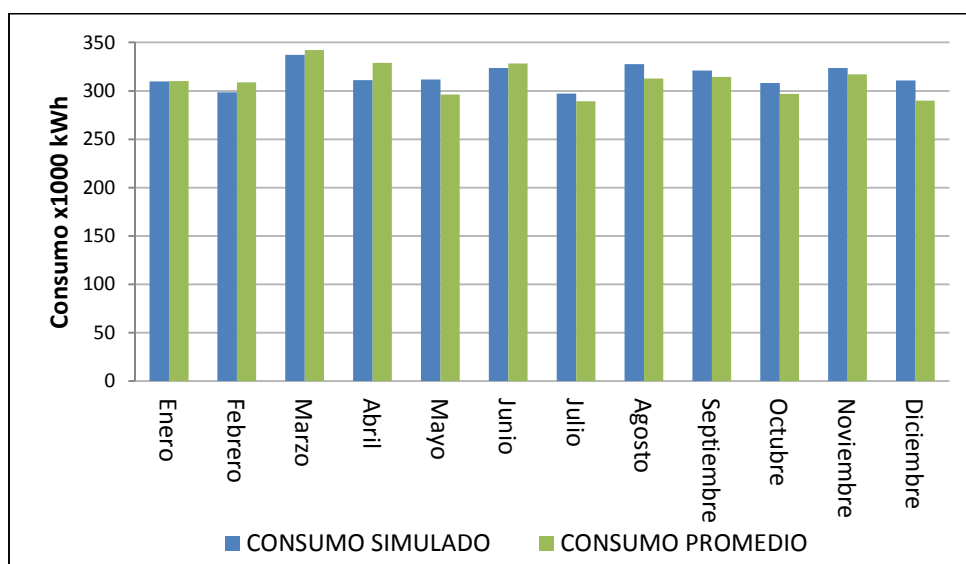


FIGURA 4.16 COMPARACIÓN ENTRE LOS CONSUMOS
MENSUALES FACTURADOS Y DEL MODELO DE LÍNEA BASE.

En la sección 3.2.1 se describieron los índices establecidos para validar el modelo elaborado a partir de los consumos calculados por la simulación, puesto que se tienen valores mensuales de consumos reales y calculados; se va a emplear un método de calibración mensual, la siguiente tabla muestra los índices obtenidos para el modelo simulado.

TABLA 20
VALORES DE INDICES DE CALIBRACIÓN

Índice	Tolerancia [%]	Valor simulado [%]
$\text{CVRMSE}_{(\text{mensual})}$	± 5	3,77
$\text{NMBE}_{(\text{mensual})}$	± 15	-1,46

Como se puede observar en la tabla 20, los valores de los índices CVRMSE y NMBE calculados a partir de los resultados de la simulación (ver apéndice H) presentan en ambos casos valores dentro del rango admisible, por lo que se puede asegurar que el modelo se encuentra calibrado.

En la figura 4.17 se presentan los distintos usos finales de energía en el edificio; los resultados que se muestran indican los consumos

mensuales para cada uso a lo largo de un período anual de simulación del modelo calibrado de línea base.

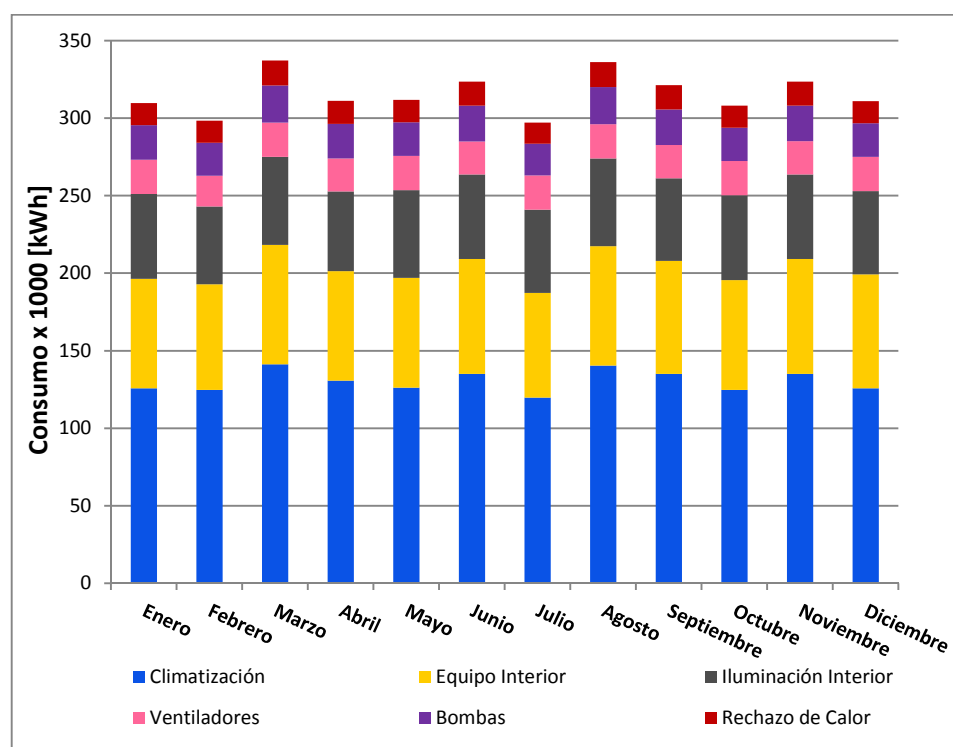
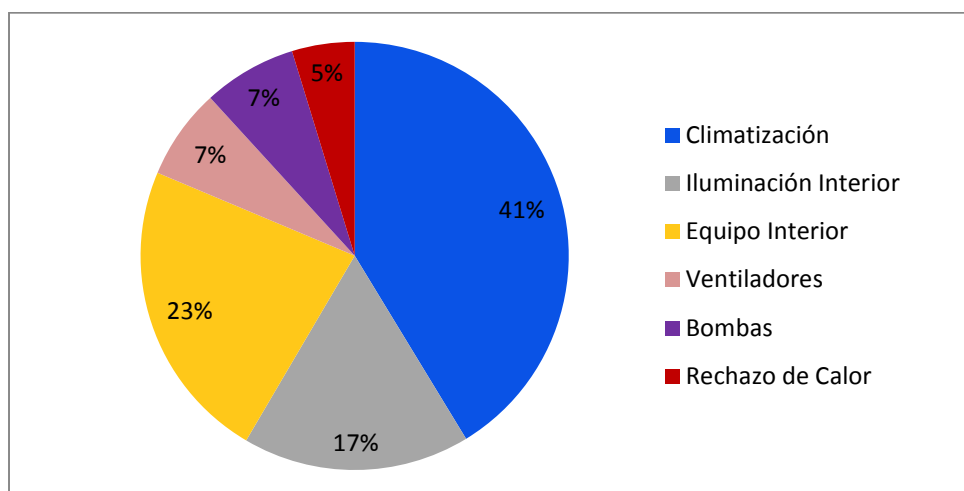


FIGURA 4.17 CONSUMOS Y USOS FINALES MENSUALES DE ENERGÍA PARA EL MODELO CALIBRADO DE LINEA BASE.

Por último en la figura 4.18 se presentan los porcentajes de usos finales de energía durante un período de simulación anual para el modelo calibrado de línea base. La Climatización, junto con los equipos internos y la iluminación representan el 81% del consumo anual de energía eléctrica, siendo los usos que constituyen la mayor demanda de energía para el edificio; por ende, los equipos

que conforman estos sistemas deben ser optimizados para lograr una mayor eficiencia del edificio.



**FIGURA 4.18. PORCENTAJES DE USOS FINALES ANUALES
PARA EL MODELO CALIBRADO DE LÍNEA BASE.**

CAPÍTULO 5

5. SIMULACIÓN ENERGÉTICA

En el desarrollo de este capítulo se presenta el planteamiento de las medidas de ahorro energético que serán implementadas en el modelo computacional de línea base del edificio. Para cada medida planteada se elabora una breve descripción teórica y se proponen alternativas que permitan cumplir con dicha medida.

5.1 Planteamiento de medidas de ahorro energético.

Las estrategias para mejorar la eficiencia energética pueden implementarse desde la etapa de diseño; en edificios existentes las estrategias se introducen como medidas de ahorro energético, en la tabla 21 se enlistan algunas estrategias generales.

TABLA 21

ESTRATEGIAS GENERALES PARA MEJORAR LA EFICIENCIA

ENERGÉTICA EN CONSTRUCCIONES [32].

Consideraciones	Estrategias de mejora
Ubicación	Seleccionar lugar del emplazamiento con el clima más adecuado según el tipo de construcción.
	Elegir una orientación que permita optimizar el rendimiento del edificio.
Operación	Mantenimiento de equipos e intercambiadores de calor.
	Analizar la percepción de confort de los usuarios.
	Establecer horarios de funcionamiento para los equipos.
Envolvente	Seleccionar materiales que permitan reducir las pérdidas de energía.
	Reducir o mejorar los acristalamientos del edificio.
	Reducir de infiltraciones al edificio.
	Instalación de protecciones solares: Voladizos, Arboles.
Climatización	Regulación de puntos de ajuste en los equipos según condiciones exteriores.
	Sustitución de equipos instalados por otros que posean mejores índices de eficiencia energética.
	Implementar variadores de frecuencia en equipos: Bombas de agua helada, ventiladores
	Uso de termostatos horarios
	Mejorar el sistema de control.
Equipos	Mejorar hábitos de uso de los equipos de oficina.
	Ajustar modo de ahorro de energía en equipos.
Iluminación	Sustitución de luminarias por otras más eficientes
	Utilización de Iluminación Natural.
	Zonificación de la Iluminación.
	Implementar sistema de control de iluminación: Detectores de presencia, Sensores de luz, Reguladores de potencia de iluminación.
Uso de Energías Renovables	Instalación de sistemas fotovoltaicos
	Instalación de generación eólica

De las estrategias presentadas anteriormente, no todas pueden ser empleadas en edificios existentes, siendo ese el caso de las consideraciones de ubicación, debido a que el lugar del emplazamiento y la orientación del edificio ya están definidos. Según los resultados de usos finales de energía en la línea base, se observa que el mayor consumo lo representa la climatización.

En climas cálidos y húmedos de tipo 1A, se pueden considerar algunas de las estrategias mencionadas anteriormente para reducir el consumo de climatización; sin embargo, la de mayor relevancia consiste en minimizar el acristalamiento exterior. También se recomienda aprovechar la iluminación natural y ajustar la ventilación con la variación de la densidad de ocupación [32].

Las modificaciones en la envolvente y el uso de energías renovables no forman parte del análisis propuesto en el alcance de este estudio; por tanto, las medidas a proponer están orientadas a reducir el consumo de los equipos que conforman el sistema de climatización, principalmente los enfriadores.

5.1.1 Medida 1: Reducción del cabezal de presión en equipos de climatización para optimizar su funcionamiento.

Los enfriadores centrífugos de agua fría para aplicaciones de climatización son diseñados usualmente empleando un conjunto de condiciones estándar, sin embargo; en la práctica estas condiciones se presentan con escasa regularidad, provocando que el equipo opere fuera de las condiciones de diseño durante períodos de tiempo prolongados.

El uso de energía en un enfriador es principalmente una función de la carga del evaporador, la temperatura del agua de entrada al condensador (ECWT) y la temperatura de salida del agua enfriada (LCHWT), adicionalmente un enfriador posee ciertas características que dependen de dichas variables las cuales normalmente se establecen bajo condiciones estándar. Una característica importante es el cabezal de presión, el cual al ser modificado podría permitir que el equipo opere de manera más eficiente cuando los valores de ECWT y LCHWT se alejan de las condiciones de diseño.

En un enfriador el cabezal de presión es la diferencia que existe entre la presión del refrigerante en el condensador y la presión del

refrigerante en el evaporador, no obstante mediante el empleo de relaciones de presión y temperatura para los distintos estados del fluido se puede determinar en forma práctica el cabezal de presión a partir de las temperaturas ECWT y LCHWT.

$$C_p \propto (T_{e_c} - T_{s_e})_a$$

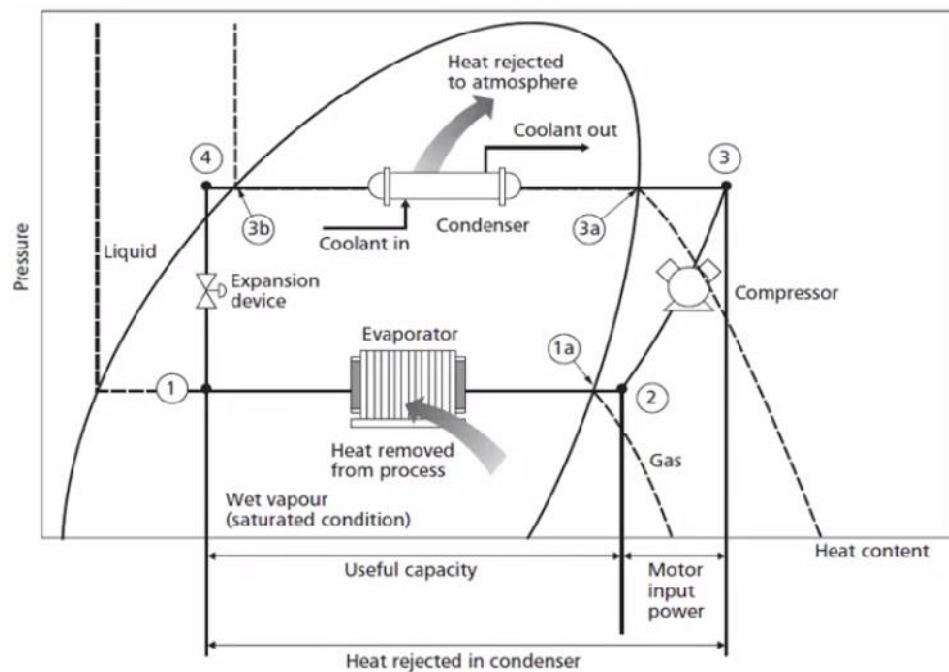


FIGURA 5.1 CICLO DE REFRIGERACIÓN PARA UN ENFRIADOR QUE OPERA EN CONDICIONES ESTANDAR.

En la figura 5.1 se presenta una representación del ciclo de trabajo del fluido refrigerante en un diagrama de Mollier; se puede observar

la relación que existe entre el cabezal de presión, la energía suministrada durante la etapa de compresión y la capacidad de enfriamiento del sistema.

Un breve análisis del ciclo de refrigeración indica que si se reduce el cabezal de presión, la potencia suministrada al compresor disminuye y la capacidad de enfriamiento aumenta, sin embargo; esto implica que el quipo opere con temperaturas fuera de las condiciones de diseño, entonces; es conveniente analizar los cambios de las temperaturas ECWT y LCHWT como alternativas que permitan optimizar el ciclo de operación del enfriador.

Alternativa 1: Disminución de la temperatura del agua de entrada al condensador.

Si se mantiene fija la temperatura de salida del agua enfriada; la disminución de la temperatura del agua de entrada al condensador implica la disminución del cabezal de presión que a su vez produce una reducción del trabajo en el compresor, teniendo como consecuencia final la reducción de la energía consumida por el equipo durante la etapa de compresión; este efecto que se describe en la figura 5.2 se muestra a continuación:

$$\downarrow E_c \gg \downarrow C \gg \downarrow W_{cc} \gg \downarrow C \quad e \quad ía$$

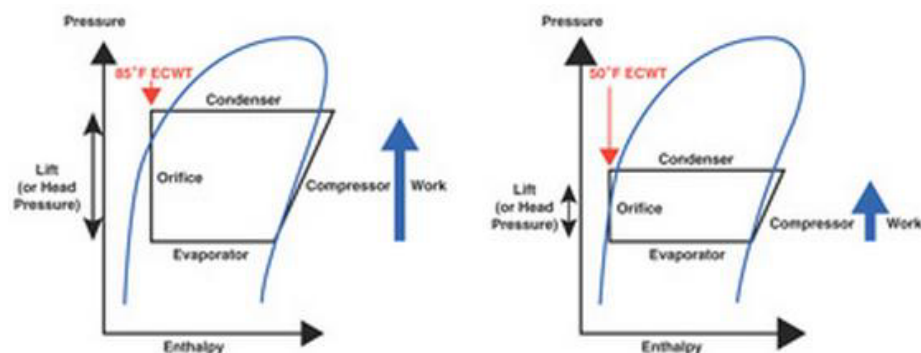


FIGURA 5.2 EFECTO DE LA DISMINUCIÓN DE ECWT

Alternativa 2: Aumento de la temperatura de salida del agua enfriada.

Si se aumenta la temperatura de salida del agua enfriada y se mantiene fija la temperatura del agua de entrada al condensador se producirá una reducción de la energía consumida por el compresor, este efecto muestra en la figura 5.3 y se describe mediante la siguiente relación:

$$\downarrow E_c \gg \downarrow C \gg \downarrow W_{cc} \gg \downarrow C \quad e \quad ía$$

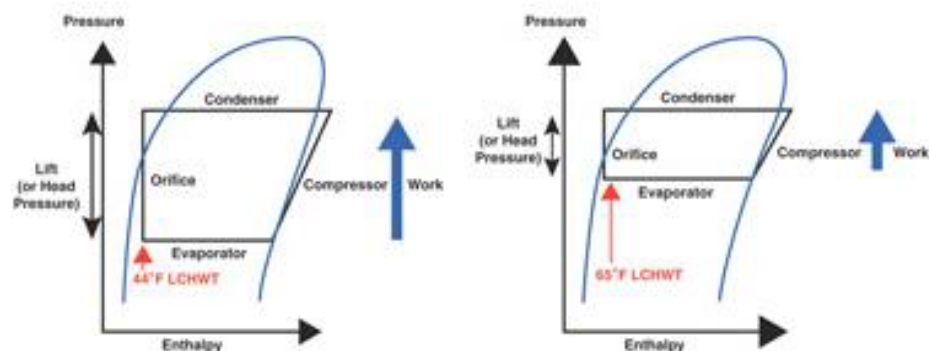


FIGURA 5.3 EFECTO DEL AUMENTO DE LCHWT

En la tabla 22 se presentan los valores a introducir en el controlador para ajustar la temperatura del agua que sale del evaporador en función de las temperaturas máximas y mínimas del aire exterior.

TABLA 22
VALORES DE PUNTO DE AJUSTE PARA LAS
TEMPERATURAS DEL EVAPORADOR

Variable de control: Temperatura		
1° Punto de ajuste		
	Temperatura del aire exterior [°C]	Temperatura del agua enfriada [°C]
Valor mínimo	23	34
Valor máximo	25	12
2° Punto de ajuste		
Valor mínimo	26	30
Valor máximo	30	7

5.1.2 Medida 2: Implementación de variadores de frecuencia.

Los variadores de frecuencia (VDF), son dispositivos electrónicos, que permiten controlar la velocidad de rotación de motores eléctricos de inducción; los hay de corriente continua (variación de la tensión), y de corriente alterna (variación de la frecuencia); los más utilizados son los de motor trifásico de inducción y rotor sin bobinar (jaula de ardilla). Otras denominaciones comunes son inversores (inverter) y variadores de velocidad [33].

En sistemas de bombeo para climatización, las aplicaciones típicas de los VDF se presentan en las bombas de agua enfriada, bombas de agua del condensador y en bombas de refuerzo.

Alternativa 1: Implementar variador de frecuencia en la bomba del agua de ingreso al evaporador.

Al igual que los equipos HVAC, hay otros equipos del sistema de climatización que son dimensionados de acuerdo a condiciones de carga máxima, en el caso de las bombas se considera el flujo máximo del sistema [34].

Existen diversas formas de controlar el caudal entregado por una bomba cuando no se opera en condiciones de carga máxima; los

VDF son ampliamente utilizados debido a que permiten entregar el flujo requerido haciendo variar la velocidad de la bomba.

Un VDF permite variar la velocidad de giro del motor de una bomba, de forma tal que se pueda reducir el caudal que ésta entrega cuando se opera bajo condiciones de carga parcial, por lo que sería suficiente si la bomba entrega una fracción del caudal de diseño (ver figura 5.4).

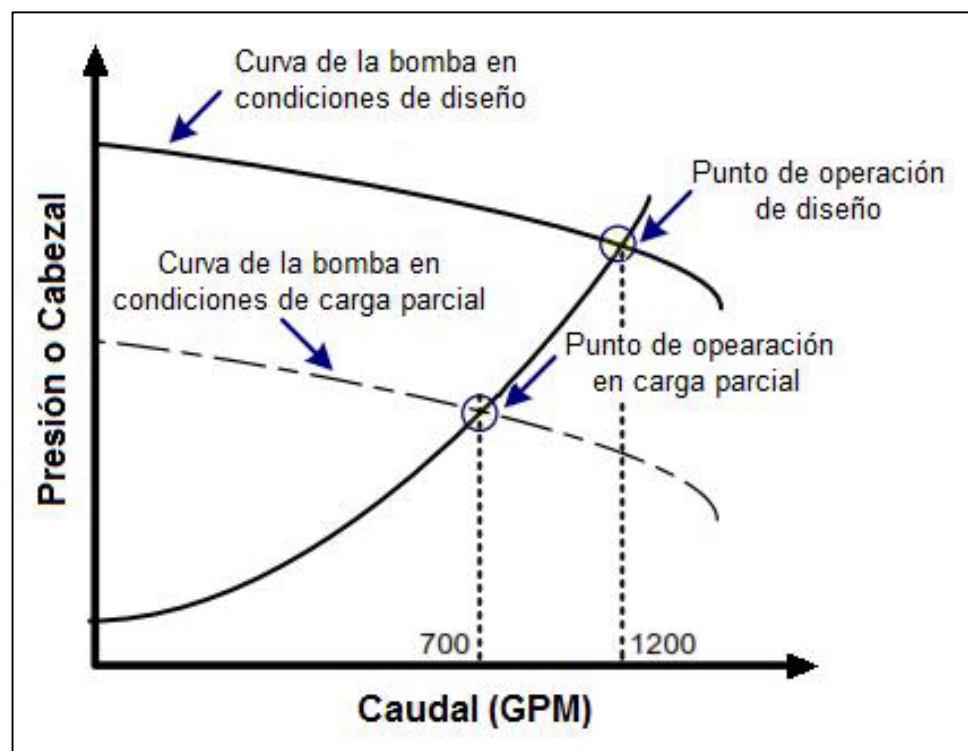


FIGURA 5.4 EFECTO DE LA APLICACIÓN DE VDF EN UNA BOMBA QUE OPERA A CARGA PARCIAL.

Alternativa 2: Sustitución de enfriador por otro que posea un variador de frecuencia en el compresor.

El coeficiente de desempeño (COP) en climatización está dado por la energía absorbida por el equipo sobre la energía que consume; dicho coeficiente varía según la carga requerida por el sistema. Cuando la carga de enfriamiento es una fracción de la capacidad de carga de un enfriador, éste opera en condiciones fuera de diseño; por tanto el COP disminuye y el equipo trabaja con menor eficiencia.

En un enfriador centrífugo que opera con cargas parciales es posible mejorar su rendimiento controlando las velocidades de rotación de los motores del compresor y los equipos auxiliares. La figura 5.5 presenta una comparación de COP para varios equipos considerando la variación de la carga parcial.

Los enfriadores convencionales poseen compresores de velocidad constante, lo que impide controlar o modificar la operación del equipo a cargas parciales. Para mejorar esta limitante, en el mercado existen equipos variadores de frecuencia que son instalados en los enfriadores desde su manufactura, permitiendo la

versatilidad de manejar bajas cargas modificando el régimen de operación del equipo [35].

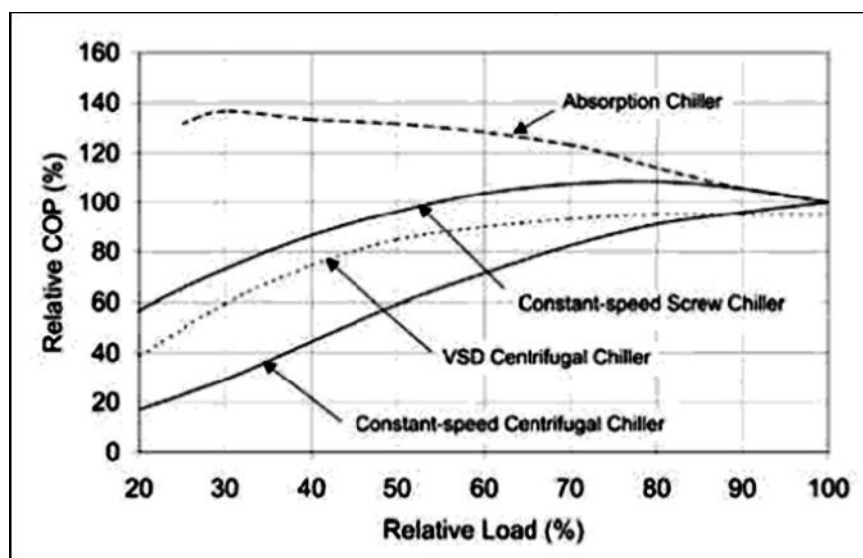


FIGURA 5.5 VARIACIÓN DEL COP CON LA CARGA PARA ENFRIADORES DE ABSORCIÓN, ELECTRICOS DE TORNILLO Y ELÉCTRICOS CENTRÍFUGOS [35].

La aplicación de un VFD en un enfriador centrífugo puede brindar importantes ahorros de energía cuando se presentan las condiciones adecuadas para su implementación. En el gráfico de la figura 5.6, se puede observar la comparación entre las curvas de rendimiento de dos enfriadores con los mismos componentes mecánicos cuando varía la carga y la temperatura ECWT; un enfriador posee VFD y el otro es de velocidad constante [36].

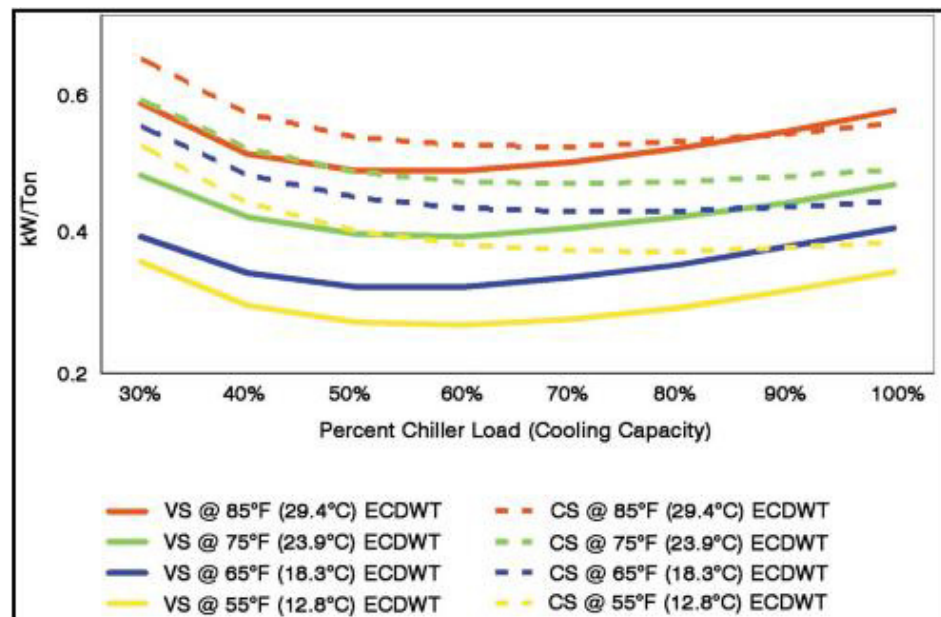
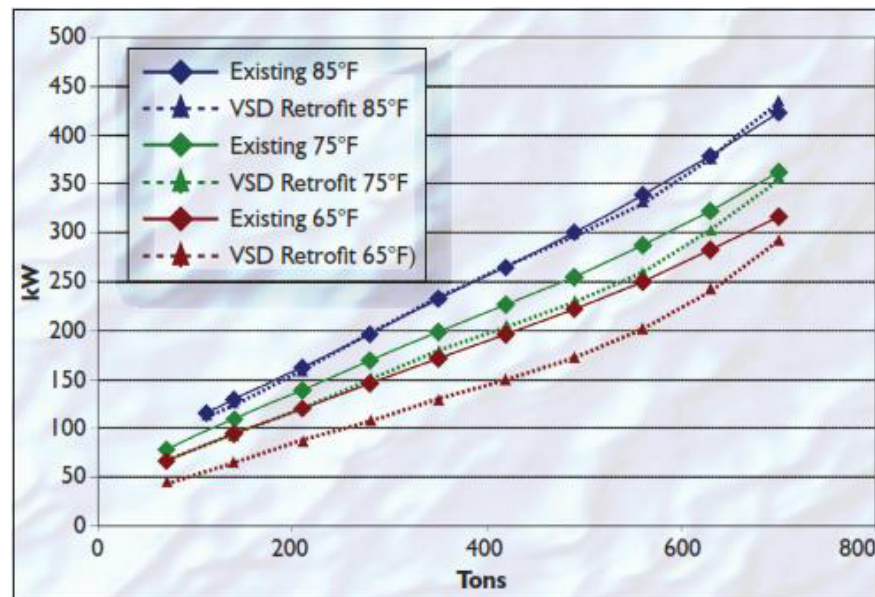


FIGURA 5.6 COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ENFRIADORES CENTRÍFUGOS DE VELOCIDAD CONSTANTE Y VARIABLE [36].

Se observa que para menores valores de carga parcial, el equipo de velocidad variable consume menos energía respecto al de velocidad constante, además los puntos de mayor rendimiento (menores valores en kW/Ton) se presentan cuando el porcentaje de carga esta alrededor del 60%. Otro aspecto a considerar para mejorar el rendimiento y conseguir un mayor ahorro energético es el reajuste de la temperatura ECWT.



**FIGURA 5.7 DESEMPEÑO DE UN ENFRIADOR CENTRÍFUGO
ANTES Y DESPUÉS DE LA MEJORA CON VSD [37]**

En la figura 5.7 se muestra la comparación entre un enfriador centrífugo de velocidad constante y otro con VFD; se puede apreciar que mientras menor sea ECWT los consumos del enfriador con VFD disminuyen más respecto al enfriador convencional y esto implica mayores ahorros de energía. Sin embargo también es posible construir gráficas que relacionen la temperatura LCHWT con la eficiencia de un enfriador VFD, es más en forma general; las medidas de reajuste para las temperaturas ECWT y LCHWT que contribuyen a reducir el cabezal de presión provocan una mejora sustancial en el rendimiento del enfriador [37].

5.2 Simulación implementando medidas de ahorro energético

Para conocer los efectos de cada una de las medidas descritas anteriormente, se han elaborado varios modelos a partir de la línea base establecida en el capítulo anterior. Cada modelo contiene una mejora de tal manera que puedan simularse los cambios en forma independiente, para esto se emplea la designación de la tabla 22.

TABLA 23

MODELOS CON MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO

MODELOS	ALTERNATIVAS CONTEMPLADAS EN MODELOS
Medida 1: Reducción del cabezal de presión en equipos de climatización para optimizar su funcionamiento.	
M1A1	Disminución de la temperatura del agua de entrada al condensador.
M1A2	Aumento de la temperatura de salida del evaporador.
Medida 2: Implementación de variadores de frecuencia.	
M2A1	Implementar variador de frecuencia en las bombas del agua de ingreso al evaporador.
M2A2	Sustitución de enfriador por otro que posea variador de frecuencia.

Los resultados que se presentan en esta sección corresponden a los consumos y usos finales de la energía, además se muestran los comportamientos durante el día de diseño de ciertas variables para conocer los cambios introducidos en las alternativas. Para una presentación más extensa de los resultados (ver apéndice H).

5.2.1 Resultados de la implementación de la medida 1.

Alternativa 1: Disminución de la temperatura del agua de entrada al condensador.

Para notar las variaciones entre el modelo de línea base y el modelo M1A1, se muestran los distintos comportamientos de la temperatura de entrada al condensador y el flujo másico que comprende el sistema de enfriamiento.

La figura 5.8 muestra cómo disminuye la temperatura del agua que ingresa al condensador; debido a que la temperatura que entra a los condensadores proviene del mismo sistema de enfriamiento, la temperatura es la misma para cada caso.

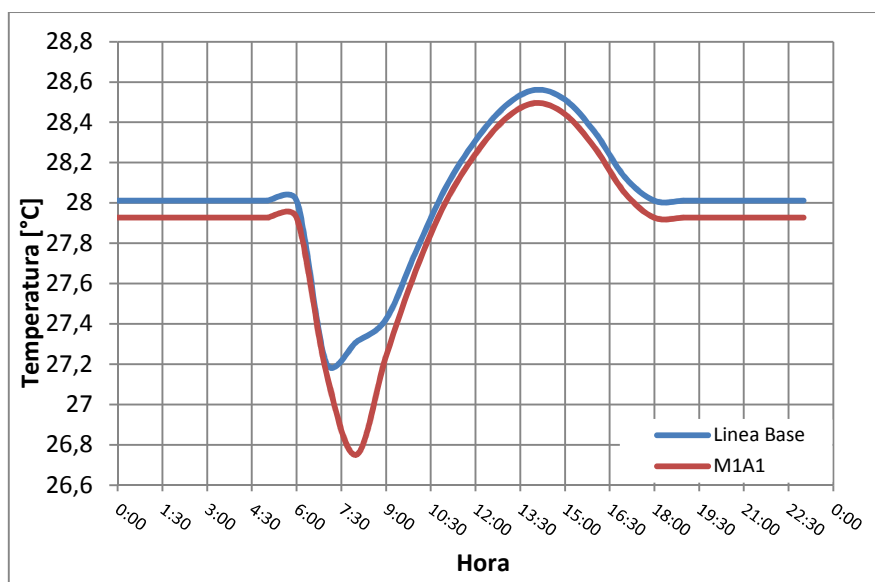


FIGURA 5.8 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA (ECWT) EN MODELO M1A1 Y LÍNEA BASE.

El flujo másico del agua bombeada hacia los enfriadores de 450 Ton y 500 Ton tiende a ser similar, por lo que se puede notar una sola tendencia. Para el equipo de 450 Ton, el modelo establece una curva de funcionamiento continua; mientras que, el equipo de 500 Ton, solo se utiliza cuando la carga requerida es mayor, este comportamiento se describe en la FIGURA 5.9.

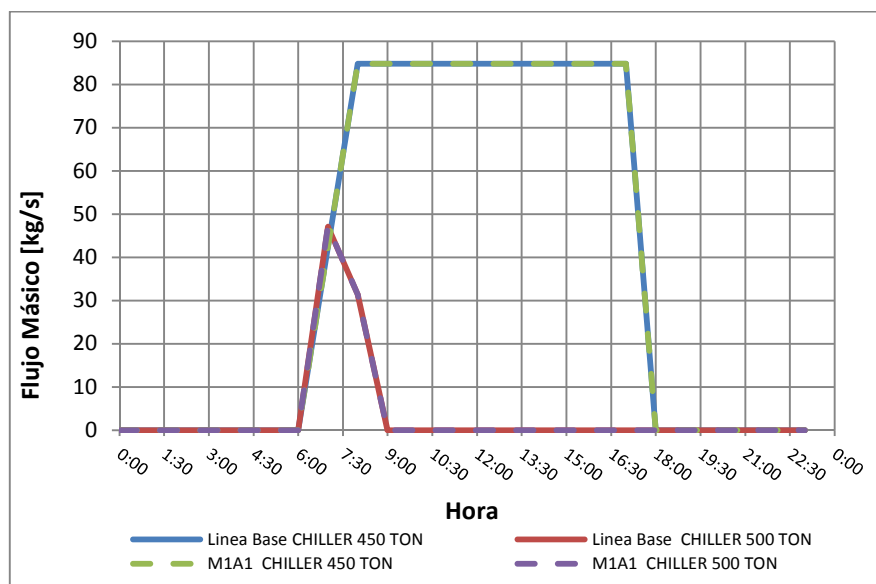


FIGURA 5.9 FLUJO MASICO DEL CONDENSADOR EN MODELO M1A1 Y LINEA BASE

También, para poder medir el aumento en la eficiencia del sistema de climatización, se muestra a continuación el consumo de energía

mensual en sus usos finales (FIGURA 5.10), durante un período anual para la alternativa planteada.

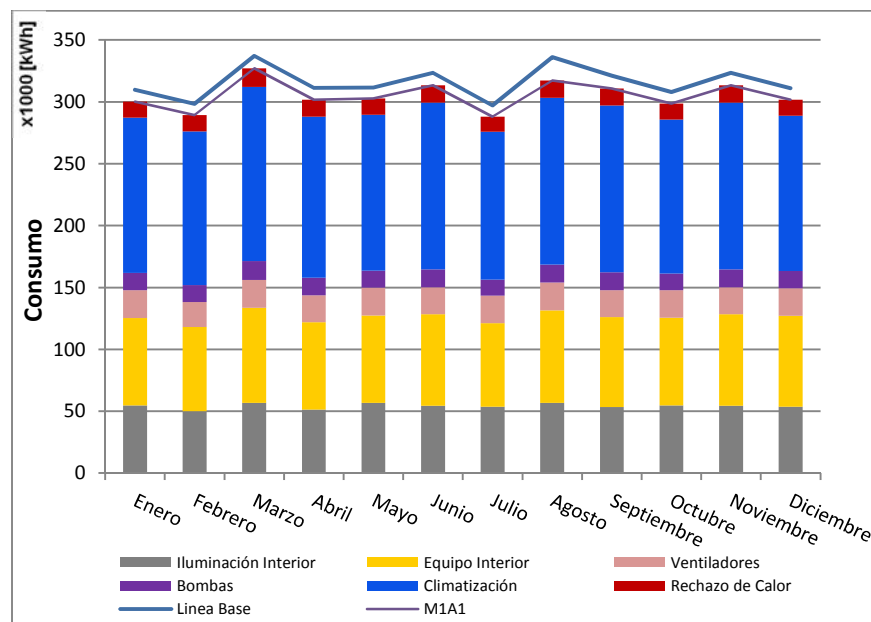


FIGURA 5.10 CONSUMOS Y USOS FINALES MENSUALES DE ENERGÍA PARA EL MODELO M1A1.

Alternativa 2: Aumento de la temperatura de salida del agua enfriada.

Para esta alternativa; se muestra en FIGURA 5.11 el comportamiento de la temperatura según la configuración de los puntos de ajuste para cada enfriador en la línea base y el modelo M1A2.

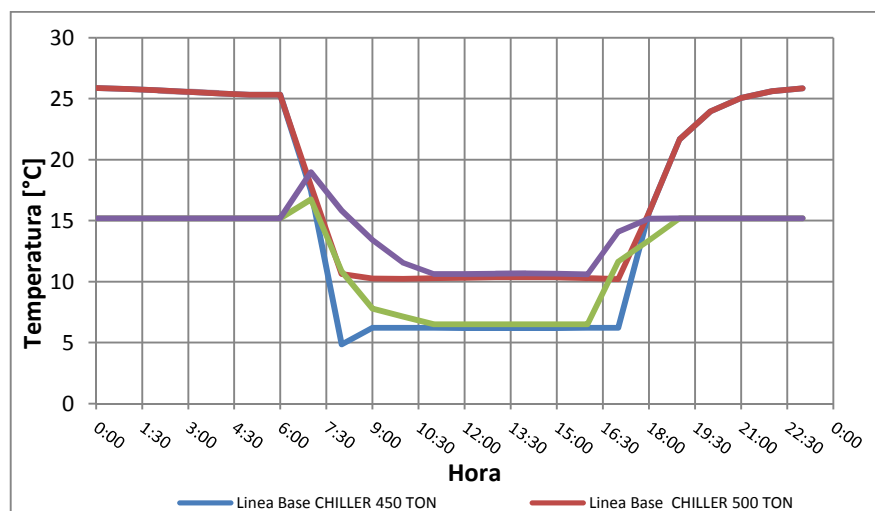


FIGURA 5.11 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA (LCHWT) EN MODELO M1A2 Y LINEA BASE.

También, de manera similar a la alternativa anterior, se muestra el gráfico de los consumos mensuales clasificados en sus usos finales según las categorías establecidas en la FIGURA 5.12.

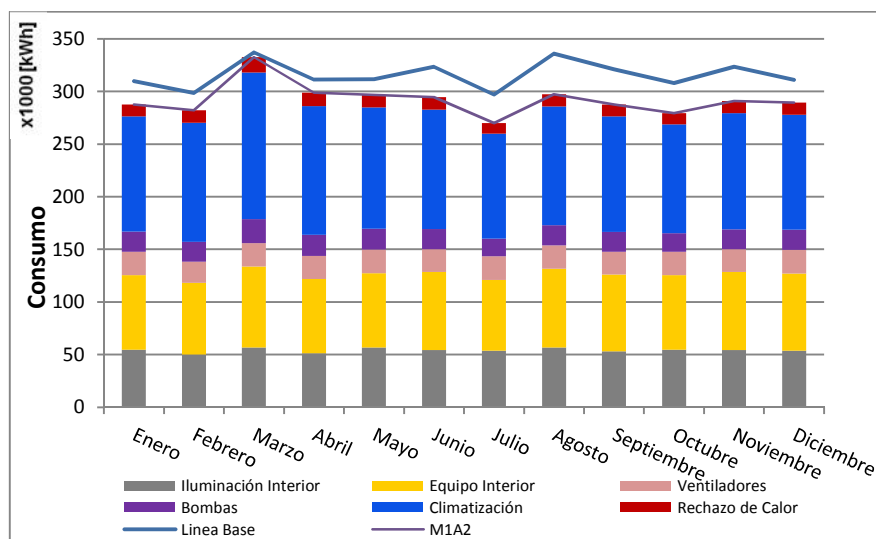


FIGURA 5.12 CONSUMOS Y USOS FINALES MENSUALES DE LA ENERGÍA PARA EL MODELO M1A2.

5.2.2 Resultados de la implementación de la medida 2.

Alternativa 1: Implementar variador de frecuencia en las bombas del agua de ingreso al evaporador.

Los resultados de esta simulación muestran (FIGURA 5.13) el comportamiento del flujo másico que es utilizado por el evaporador según la capacidad requerida tanto para la línea base, como para la alternativa propuesta.

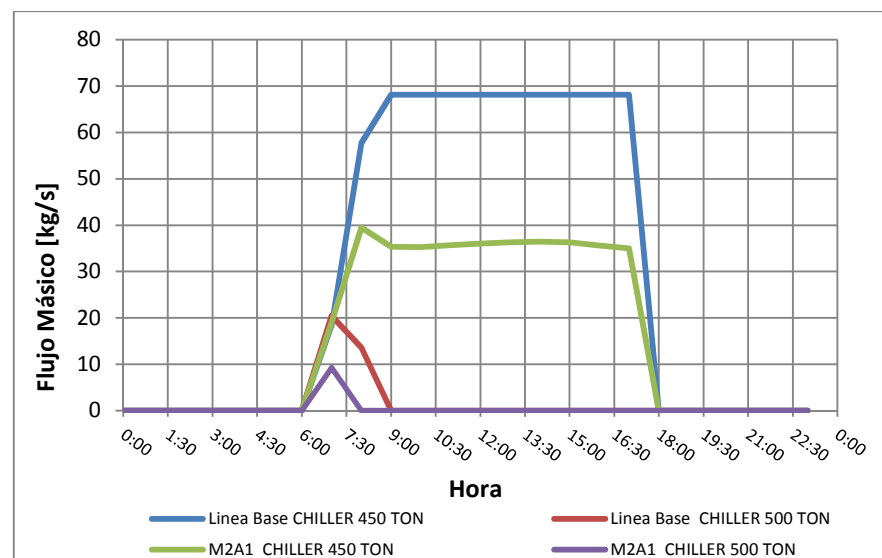


FIGURA 5.13 VARIACIÓN DEL FLUJO MÁSSICO DE AGUA EN EL EVAPORADOR EN MODELO M2A1 Y LINEA BASE.

La FIGURA 5.14 muestra los consumos mensuales y usos finales de la energía para un año.

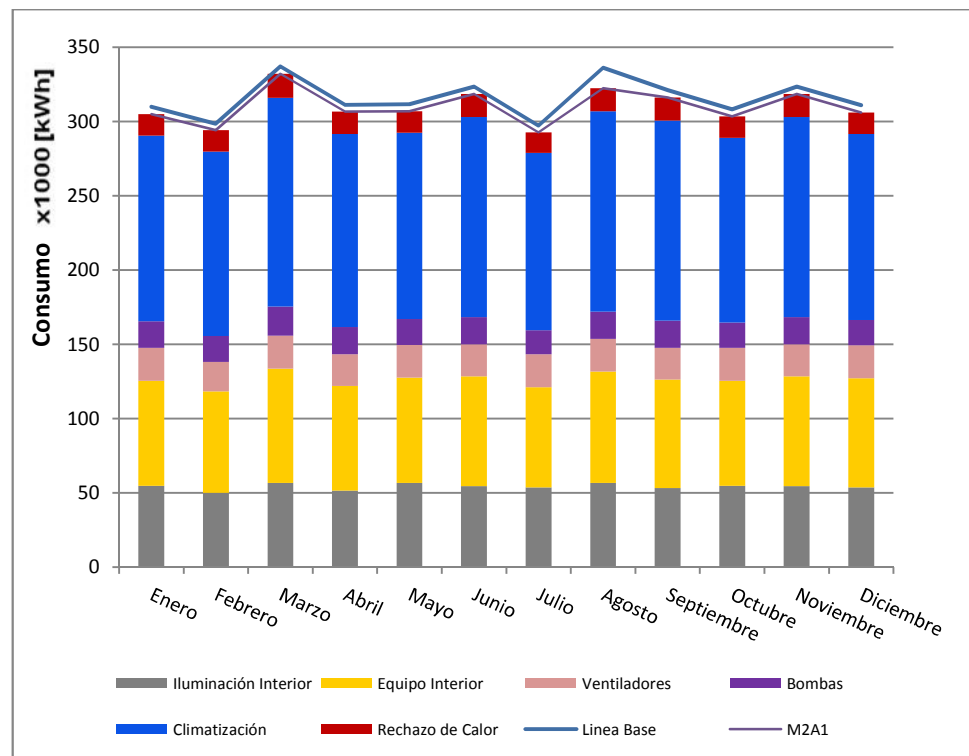


FIGURA 5.14 CONSUMOS Y USOS FINALES MENSUALES DE LA ENERGÍA PARA EL MODELO M2A1.

Alternativa 2: Sustitución de enfriador por otro que posea un variador de frecuencia en el compresor.

Los resultados de esta simulación muestran en la FIGURA 5.15 el comportamiento del rendimiento de los enfriadores según la variación de la carga en el día de diseño.

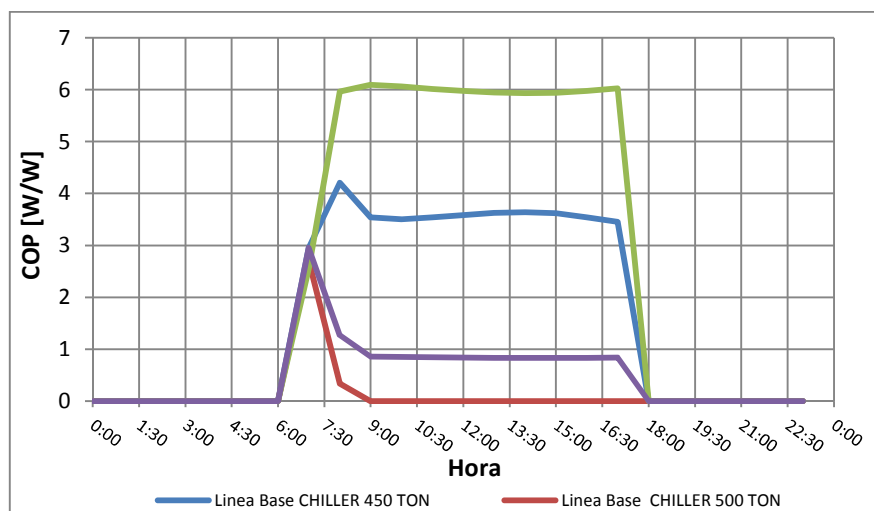


FIGURA 5.15 VARIACIÓN DEL COP EN MODELO M2A2 Y LINEA BASE.

Se muestran también en FIGURA 5.16 los usos finales de la energía conjuntamente con el consumo general para el periodo de un año.

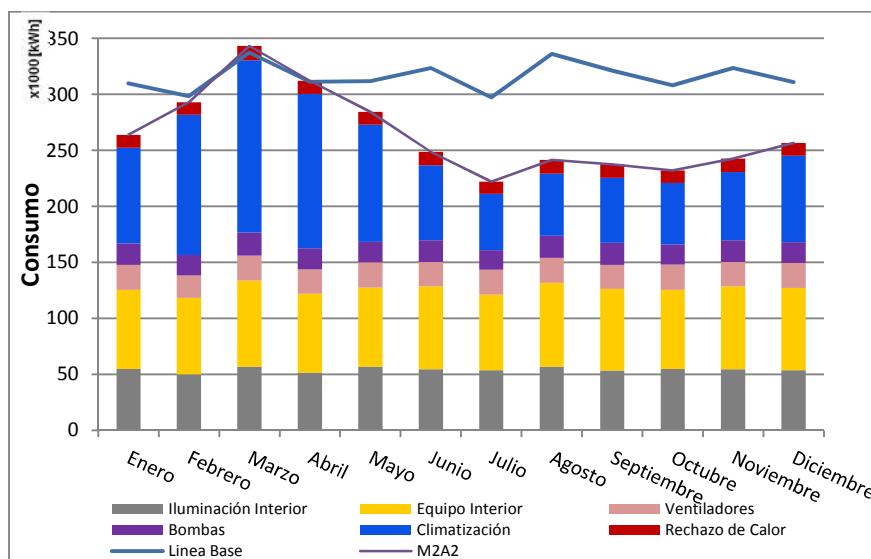


FIGURA 5.16 CONSUMOS Y USOS FINALES MENSUALES DE LA ENERGÍA PARA EL MODELO M2A2.

5.3 Análisis comparativo de resultados.

Para una mejor visualización de los resultados se mostrará un diagrama comparativo del consumo total de energía de las simulaciones realizadas en la sección anterior para cada alternativa.

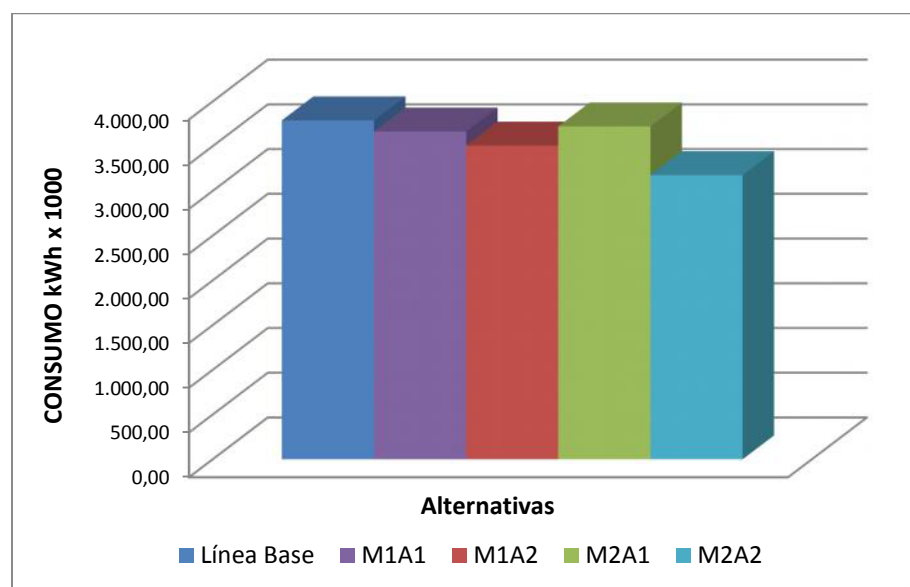


FIGURA 5.17 CONSUMO ANUAL SIMULADO DE LOS MODELOS PARA CADA ALTERNATIVA DE AHORRO.

En la FIGURA 5.17, la línea base muestra que el consumo total simulado es de 3'788,474.38 KWh, según las simulaciones, se ha obtenido que para la alternativa M1A2, se ahorraría un 7.42% de energía, seguido por la alternativa M1A1 que se obtiene un 3.28%. Para el caso de la sustitución del enfriador (M2A2) de 450 TON, el

ahorro llega hasta un 16.15 %. La alternativa restante, solo lleva a un ahorro energético de 1.76%, por lo que su proporción en la mejora de la eficiencia es muy baja. La tabla 23 resumen las proporciones de disminución del consumo.

TABLA 24
RESUMEN DE MEJORA DE EFICIENCIA SEGÚN
ALTERNATIVAS.

MEJORA DE EFICIENCIA ENERGETICA	
Disminución de la temperatura del agua de entrada al condensador	3.28%
Aumento de la temperatura de salida del evaporador	7.42%
Implementación de variadores de frecuencia en las bombas de agua de ingreso al evaporador.	1.76%
Sustitución de enfriador por otro que posea variador de frecuencia	16.15%

Basado en que las categorías de mayor consumo obtenidas en la línea base fueron climatización (41%), equipo interior (23%) e iluminación interior (17%) y que las categorías restantes son relacionadas directamente con la climatización, las categorías a analizar serán la climatización, ventilación, bombas y rechazo de calor.

Las alternativas que obtuvieron una mayor disminución en el consumo de energía son mostradas en la siguiente gráfica en función de los usos finales (FIGURA 5.18).

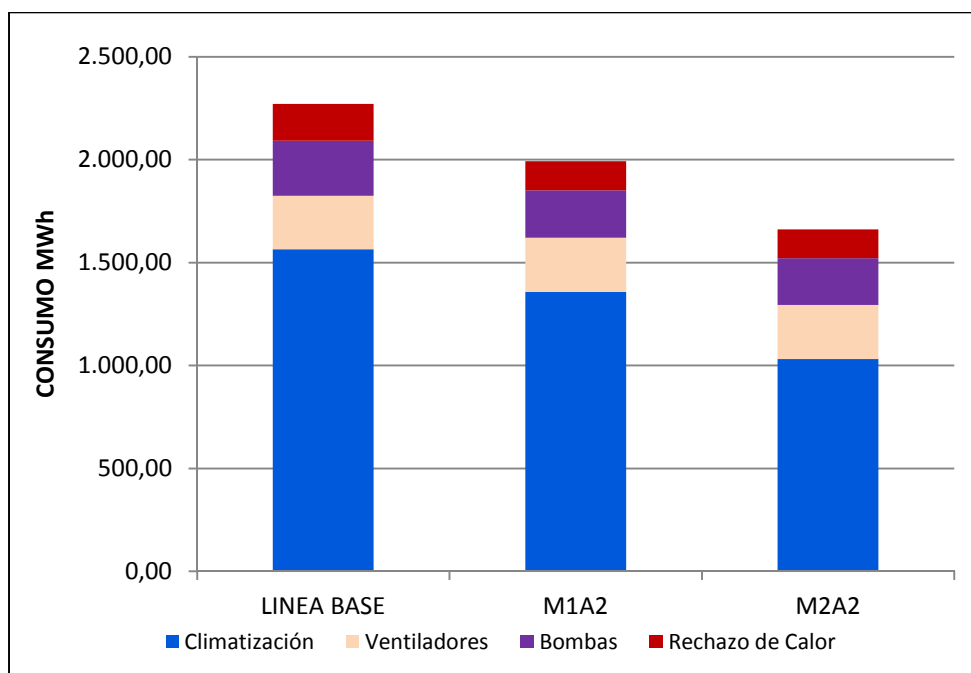


FIGURA 5.18 USO FINAL ANUAL DE ALTERNATIVAS

El consumo por climatización muestra una disminución significativa para las alternativas M1A2 (13.18%) y M3A1 (34.12%). La alternativa M1A2, en comparación con los valores mensuales obtenidos en la línea base, proporciona como mínimo un 2% de disminución para el mes de marzo, y un máximo de 20% para el mes de agosto. Para la alternativa M3A1, el comportamiento llega

hasta un 60% de disminución para el mes de agosto, pero en marzo su consumo aumenta un 9% más que la línea base.

Para la energía consumida en trabajos de bombeo se ha obtenido una disminución en los modelos M1A2 y M2A1 de 14% y 14.82% respectivamente. Para M1A2 se obtuvo una mínima disminución del 5% para el mes de Marzo, mientras que en Agosto es 21%. La alternativa M2A2 muestra un comportamiento uniforme entre el 14 y 15 % casi todo el año, y el menor consumo en Agosto, 18% de disminución.

Para rechazo de calor, tanto para M1A2 como para M2A2 se obtuvieron 21.34% y 21.75% respectivamente. Para M1A2, la mayor disminución fue calculada por el software en el mes de Agosto (29%), y la menor disminución, de 9% para el mes de Abril. La alternativa M2A2 permanece casi constante entre el 21% y 22%, alcanzando un 25% en Agosto.

La ventilación mecánica del sistema, tanto para M1A1 y M2A2 permanecen constantes debido a que no se ha realizado ningún planteamiento que modifique su funcionamiento.

Combinación de las medidas de ahorro energético.

Es posible lograr una mayor reducción en el consumo de energía mediante la implementación simultánea de las medidas de ahorro previamente planteadas, por este motivo también se propone la simulación de modelos adicionales que contienen combinaciones de las alternativas, las cuales se muestran a continuación.

TABLA 25

COMBINACIÓN DE MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO.

MODELO DE COMBINACIÓN	DESCRIPCIÓN
MC 1	Combinación de las alternativas 1 y 2 de la medida 1.
MC 2	Combinación de la alternativa 1 de la medida 1 y la alternativa 1 de la medida 2.
MC 3	Combinación de la alternativa 1 de la medida 1 y la alternativa 2 de la medida 2.
MC 4	Combinación de la alternativa 2 de la medida 1 y la alternativa 1 de la medida 2.
MC 5	Combinación de la alternativa 2 de la medida 1 y la alternativa 2 de la medida 2.
MC 6	Combinación de las alternativas 1 y 2 de la medida 2.

La siguiente FIGURA 5.19 muestra en comparación el consumo energético del efecto combinado de las alternativas planteadas; se obtuvo un mayor ahorro energético en aquellos modelos que combinan la variación del setpoint del evaporador M1A2, logrando hasta un 9.52% para el caso de las M1A1+M1A2. Para la alternativa

que contempla de la sustitución del enfriador M2A2, se ha obtenido que con la mejora de los setpoints del evaporador y con el chiller con VFD se logra un 26.42%.

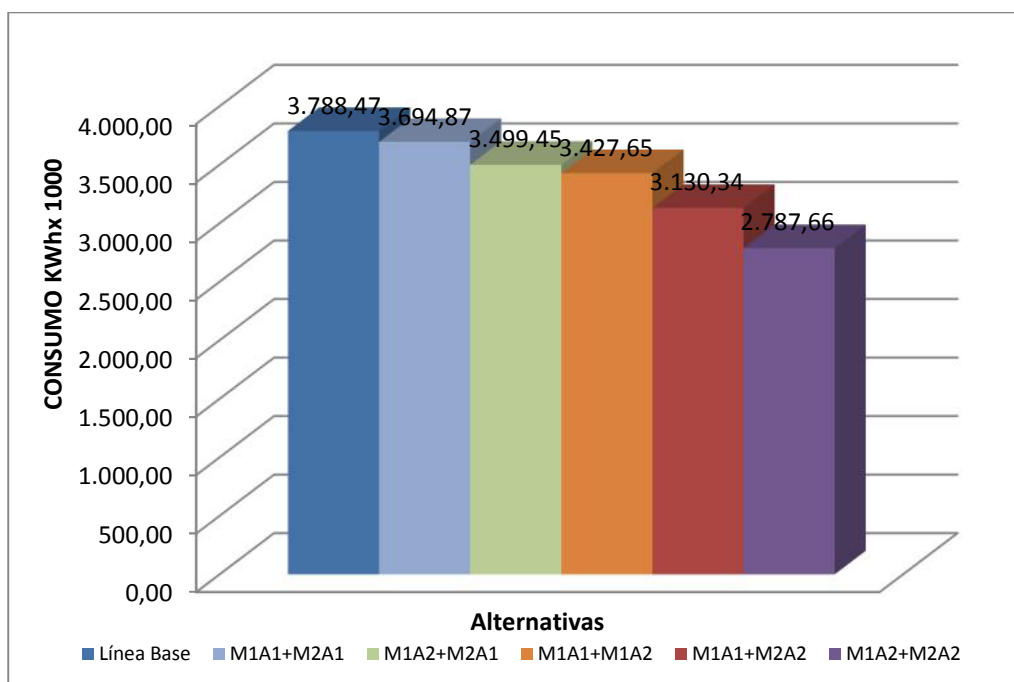


FIGURA 5.19 CONSUMO ANUAL COMBINANDO CADA ALTERNATIVA

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones.

Mediante las medidas propuestas se han simulado alternativas basadas en criterios técnicos utilizando motores de cálculo computacionales, se ha podido estimar que es posible mejorar la eficiencia energética del edificio.

Los softwares de simulación energética permiten estimar parámetros de funcionamiento y consumo cada cortos periodos de tiempo, lo que nos permite predecir el comportamiento de los parámetros a lo largo de un día hasta un año. Utilizando esta herramienta se definió la línea base del edificio, la misma que fue

validada mediante los índices de calibración recomendados por el ASHRAE 14-2002.

También se obtiene los usos finales de la energía en el edificio, con lo que se obtuvo la situación actual del edificio, evidenciando que el 41% de la energía consumida por el edificio en un año, corresponde a climatización, seguido por los equipos internos 23% y la iluminación.

La aplicación de criterios técnicos para mejorar el rendimiento de los equipos del sistema de climatización, permite obtener ahorros significativos de energía; siendo la alternativa de aumento de la temperatura del agua que ingresa al evaporador del enfriador la que permite una mayor reducción del consumo (7,42 %) sin necesidad de sustituir el equipo. Para el planteamiento de la sustitución del enfriador convencional, por uno con variador de frecuencia se ha obtenido el 16,15% de reducción de consumo.

Como contribución a las medidas a corto plazo para la mejora energética de edificios del sector público, este estudio ha estimado que es posible obtener hasta un 26.42% de ahorro para el Edificio

Gobierno Zonal de Guayaquil. Estudios similares podrían evaluar las medidas a implementar e identificar las oportunidades de mayor impacto en el consumo de energía y lograr un mejor desempeño energético en los edificios públicos.

6.2 Recomendaciones.

Se debería realizar un estudio para mejorar y optimizar la iluminación del edificio, ya que al ser la fachada totalmente acristalada, existen posibilidades de disminuir la potencia de iluminación, considerando no elevar la carga térmica hacia edificio debido a la radiación solar.

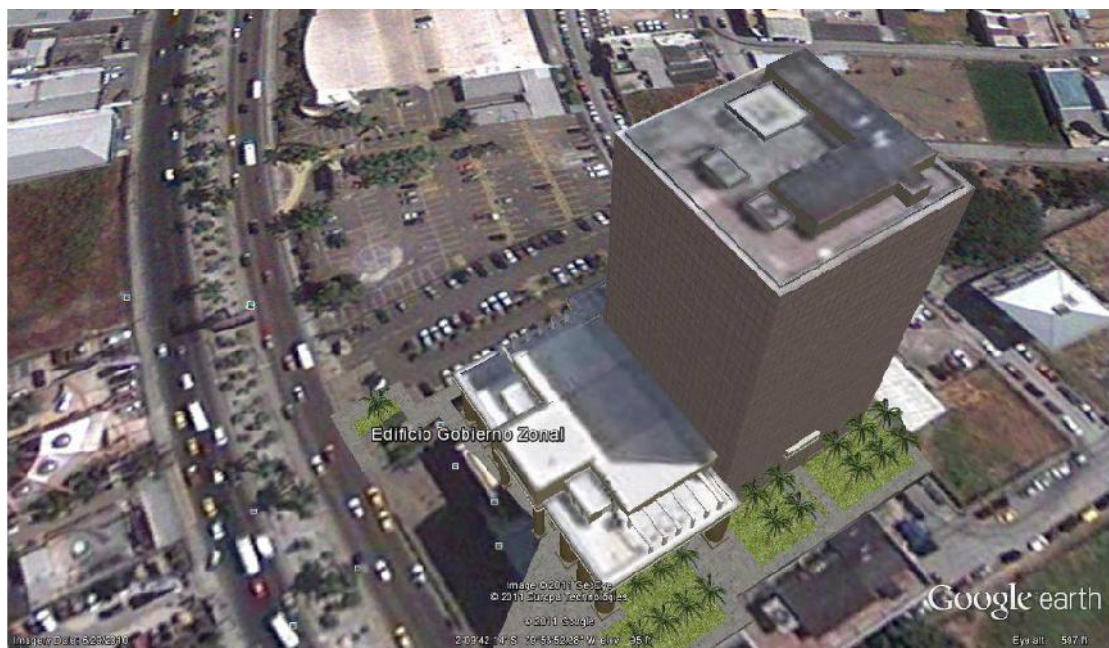
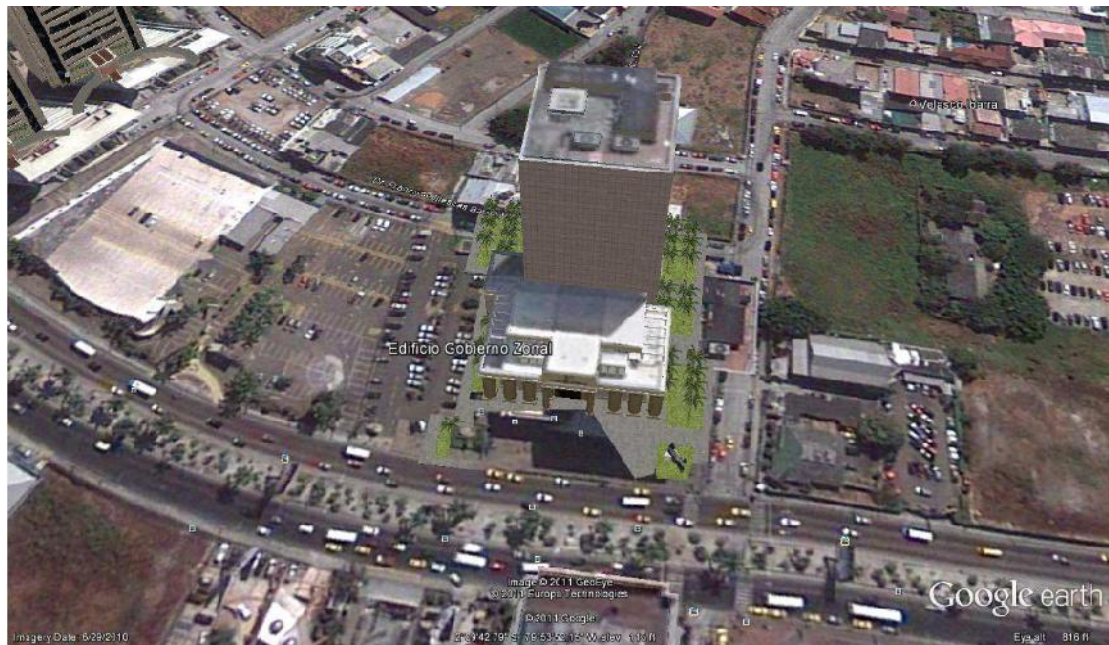
Uno de los aspectos más importantes para el dimensionamiento de los sistemas de climatización es la composición de la envolvente; por este motivo, se recomienda realizar un estudio que permita conocer el efecto que tendrían ciertas modificaciones de la envolvente en el consumo energético del edificio.

Para mejorar la confiabilidad de las predicciones, se recomienda realizar un levantamiento utilizando equipos de medición y verificación de energía de tal manera que los resultados obtenidos se acerquen a los consumos reales.

APÉNDICES

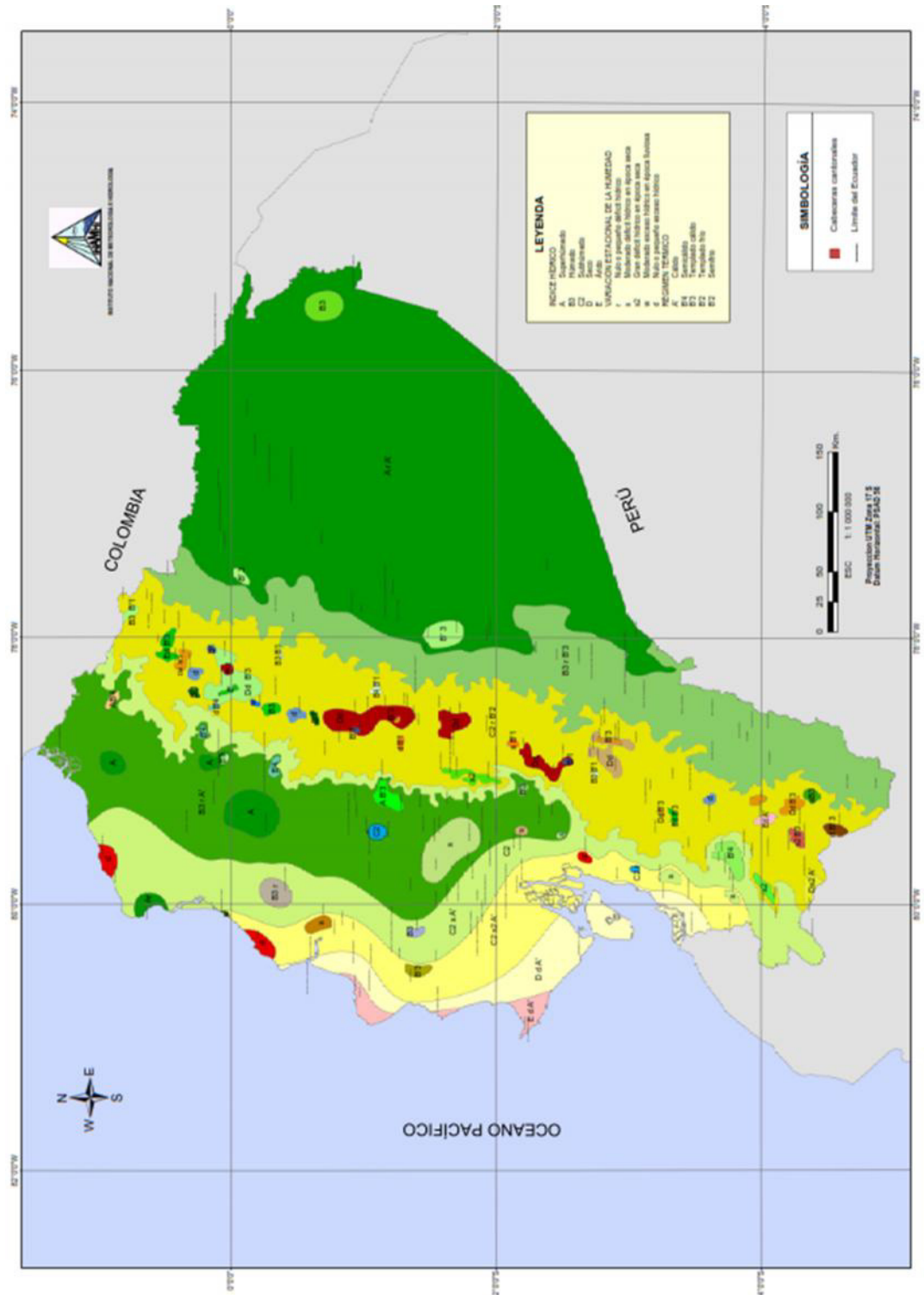
APÉNDICE A

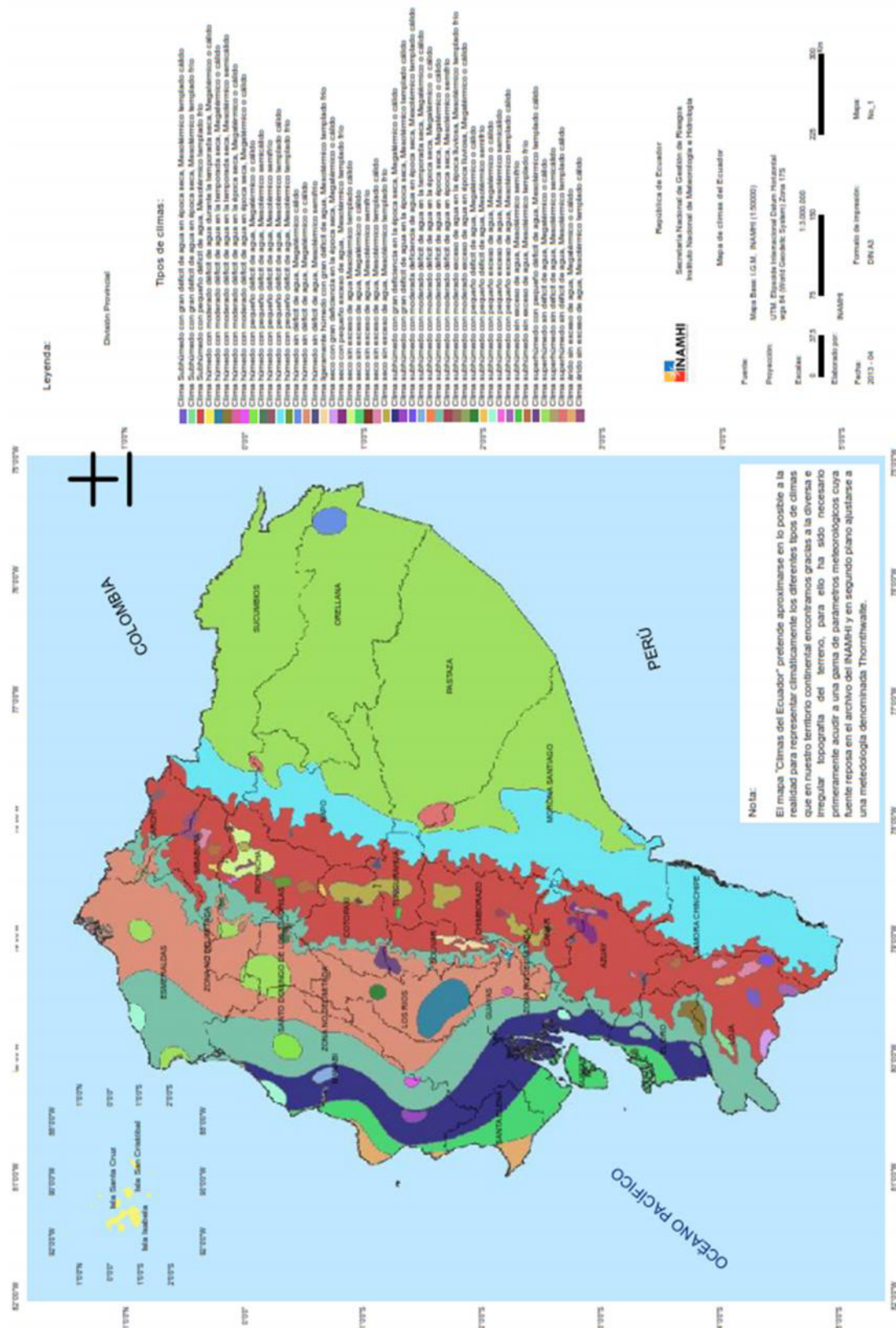
FOTOGRAFÍAS DEL EDIFICIO.





APÉNDICE B MAPAS DE CLIMAS DEL ECUADOR SEGÚN INAMHI



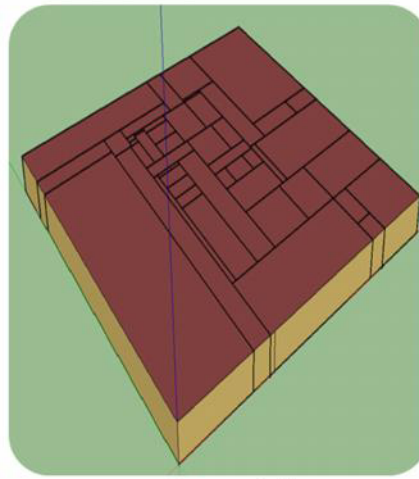


APÉNDICE C

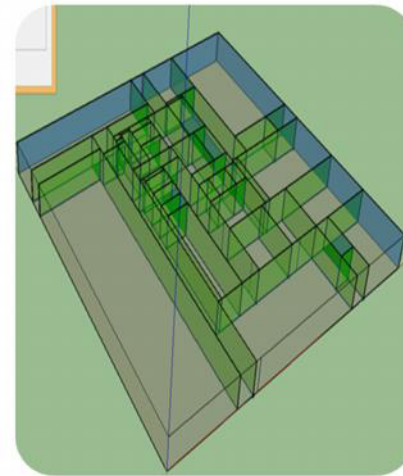
ELABORACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL



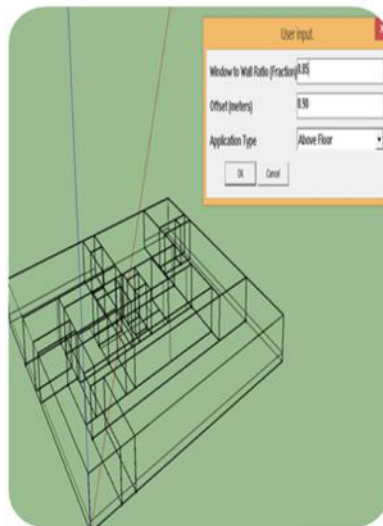
Plano



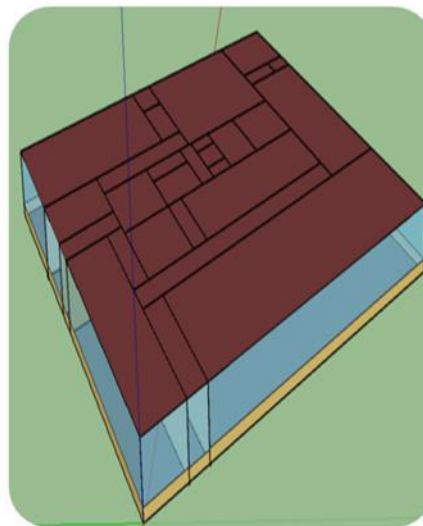
Geometría



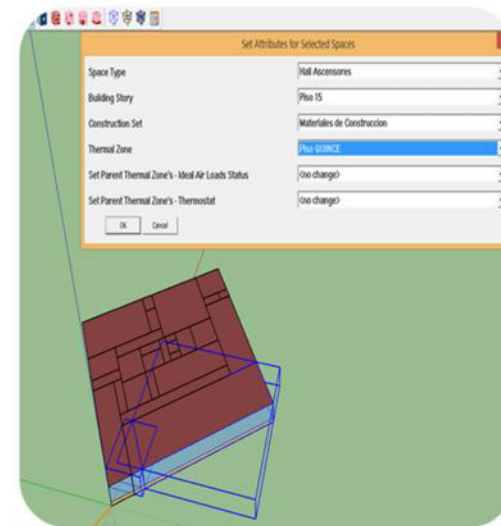
Superficies



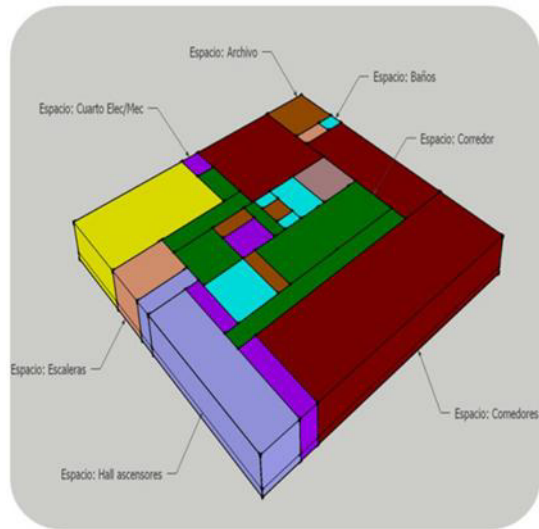
Fenestración



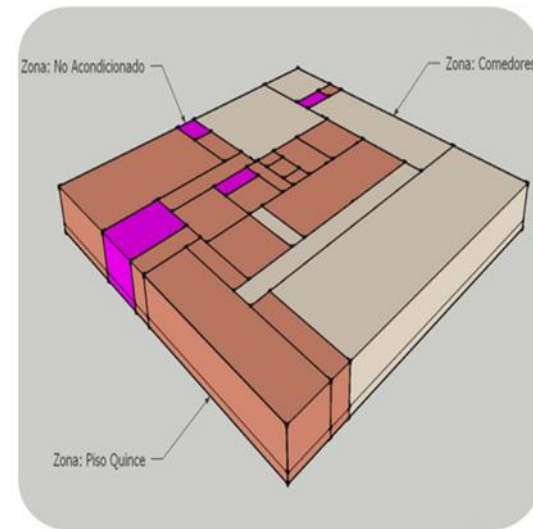
Fenestración



Atributos



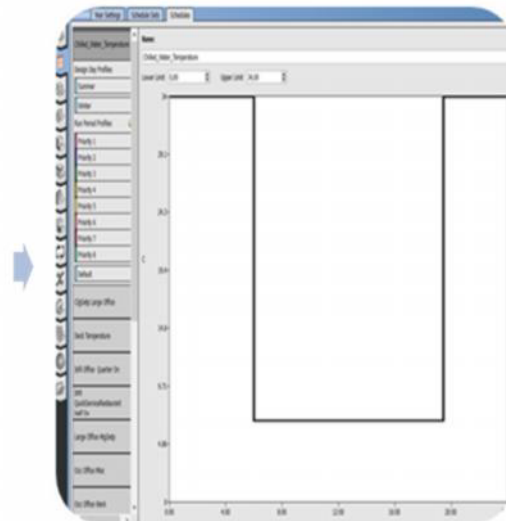
Tipos de Espacio



Zonas Térmicas



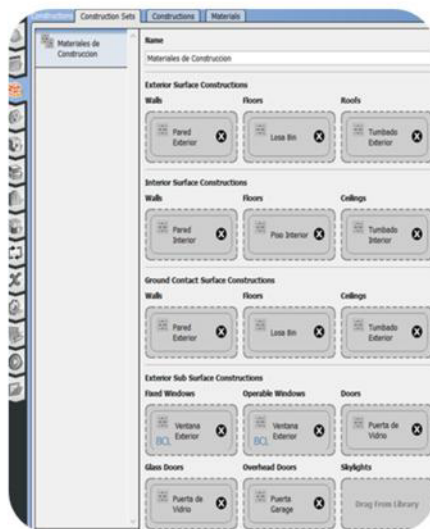
Datos de Clima



Perfiles



Materiales



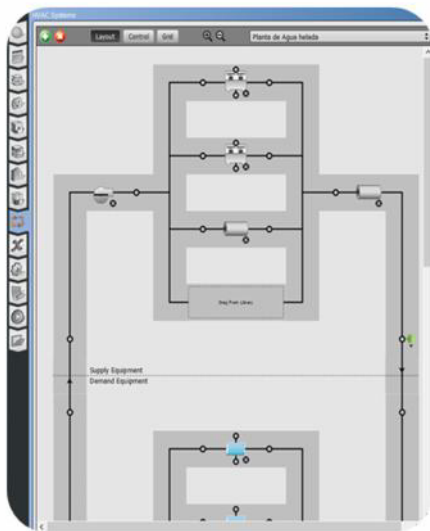
Capas de
Materiales



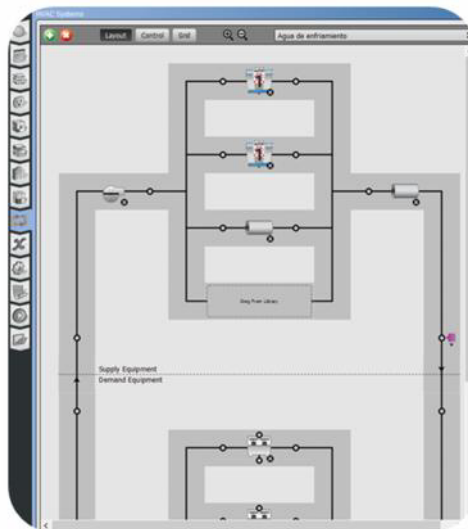
Ganancias
Internas



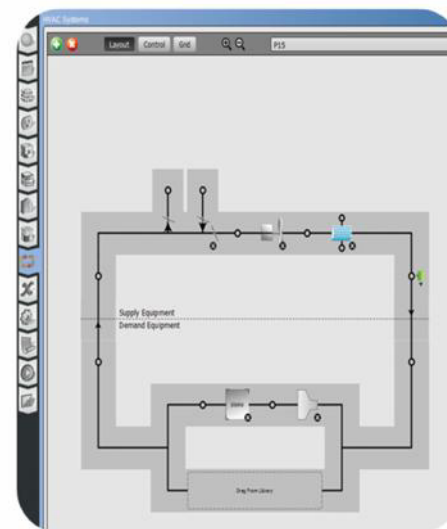
Pisos



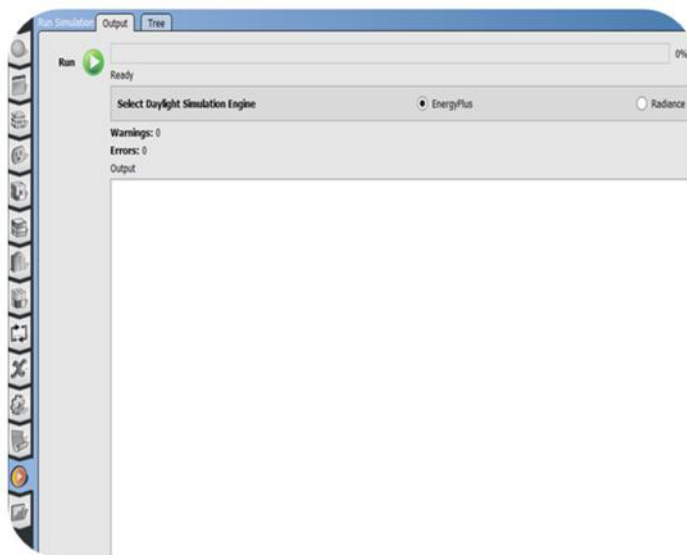
HVAC: Planta
Agua Helada



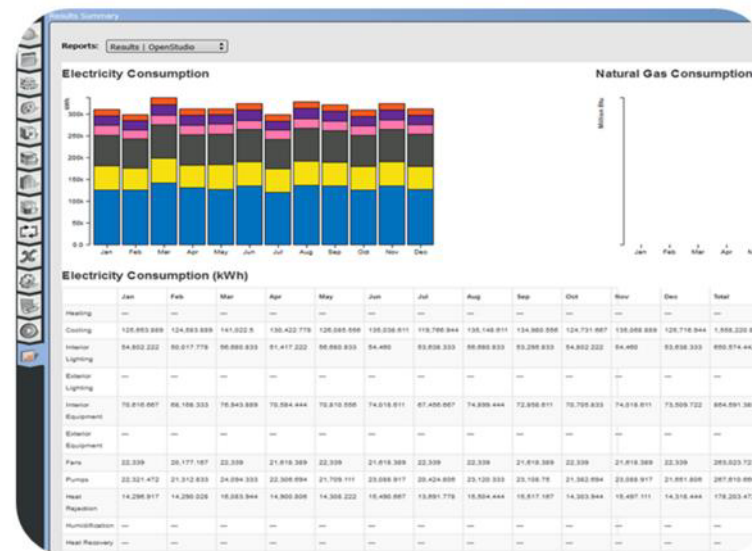
HVAC: Torres de
enfriamiento



HVAC:
Manejadoras



Simulacion



Resultados

APÉNDICE D

TIPOS DE ZONAS CLIMÁTICAS SEGÚN ASHRAE

International Climate Zone Definitions

Zone Number	Zone Name	Thermal Criteria (I-P Units)	Thermal Criteria (SI Units)
1A and 1B	Very Hot –Humid (1A) Dry (1B)	$9000 < CDD50^{\circ}F$	$5000 < CDD10^{\circ}C$
2A and 2B	Hot-Humid (2A) Dry (2B)	$6300 < CDD50^{\circ}F \leq 9000$	$3500 < CDD10^{\circ}C \leq 5000$
3A and 3B	Warm – Humid (3A) Dry (3B)	$4500 < CDD50^{\circ}F \leq 6300$	$2500 < CDD10^{\circ}C < 3500$
3C	Warm – Marine (3C)	$CDD50^{\circ}F \leq 4500$ AND $HDD65^{\circ}F \leq 3600$	$CDD10^{\circ}C \leq 2500$ AND $HDD18^{\circ}C \leq 2000$
4A and 4B	Mixed-Humid (4A) Dry (4B)	$CDD50^{\circ}F \leq 4500$ AND $3600 < HDD65^{\circ}F \leq 5400$	$CDD10^{\circ}C \leq 2500$ AND $HDD18^{\circ}C \leq 3000$
4C	Mixed – Marine (4C)	$3600 < HDD65^{\circ}F \leq 5400$	$2000 < HDD18^{\circ}C \leq 3000$
5A, 5B, and 5C	Cool-Humid (5A) Dry (5B) Marine (5C)	$5400 < HDD65^{\circ}F \leq 7200$	$3000 < HDD18^{\circ}C \leq 4000$
6A and 6B	Cold – Humid (6A) Dry (6B)	$7200 < HDD65^{\circ}F \leq 9000$	$4000 < HDD18^{\circ}C \leq 5000$
7	Very Cold	$9000 < HDD65^{\circ}F \leq 12600$	$5000 < HDD18^{\circ}C \leq 7000$
8	Subarctic	$12600 < HDD65^{\circ}F$	$7000 < HDD18^{\circ}C$

Marine (C) definition – Locations meeting all four of the following criteria:

1. Mean temperature of coldest month between $27^{\circ}F$ ($-3^{\circ}C$) and $65^{\circ}F$ ($18^{\circ}C$)
2. Warmest month mean $< 72^{\circ}F$ ($22^{\circ}C$)
3. At least four months with mean temperatures over $50^{\circ}F$ ($10^{\circ}C$)
4. Dry season in summer. The month with the heaviest precipitation in the cold season has at least three times as much precipitation as the month with the least precipitation in the rest of the year. The cold season is October through March in the Northern Hemisphere and April through September in the Southern Hemisphere.

Dry (B) definition – Locations meeting the following criteria:

Not marine and

$$P < 0.44 \times (T - 19.5) \quad [\text{I-P units}]$$

$$P < 2.0 \times (T + 7) \quad [\text{SI units}]$$

Where:

P = annual precipitation in inches (cm) and

T = annual mean temperature in $^{\circ}F$ ($^{\circ}C$).

Moist (A) definition – Locations that are not marine and not dry.

DATOS DEL ARCHIVO DE CLIMA GYE-ESPOLTM2.epw[illegible]

Datos del archivo de día de diseño ECU_Guayaquil.ddy


IDF Editor - [C:\EnergyPlusV8-2-7\WeatherData\ECU_... -







File Edit View Jump Window Help




 New Obj Dup Obj Del Obj Copy Obj Paste Obj

Class List

- [-----] ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial
- [-----] Timestep
- [-----] ConvergenceLimits
- [-----] ProgramControl

Compliance Objects

- [-----] Compliance:Building

Location and Climate

- [0001] Site:Location

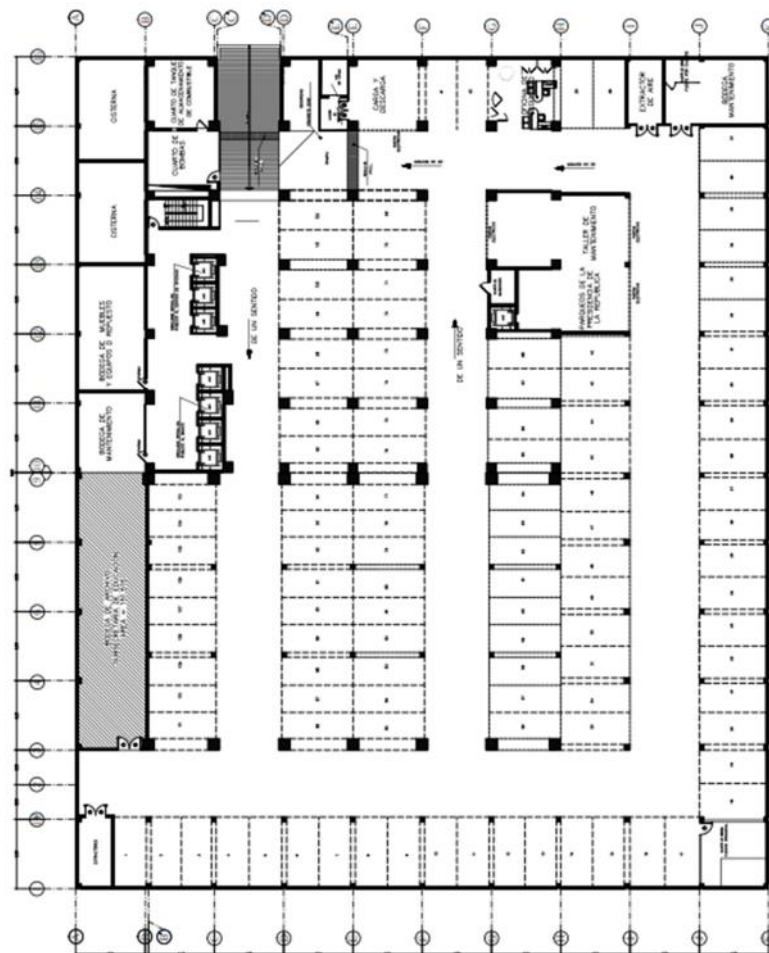
Comments from IDF

Explanation of Object and I

Object Description:
The design day object creates the parameters for the program to create

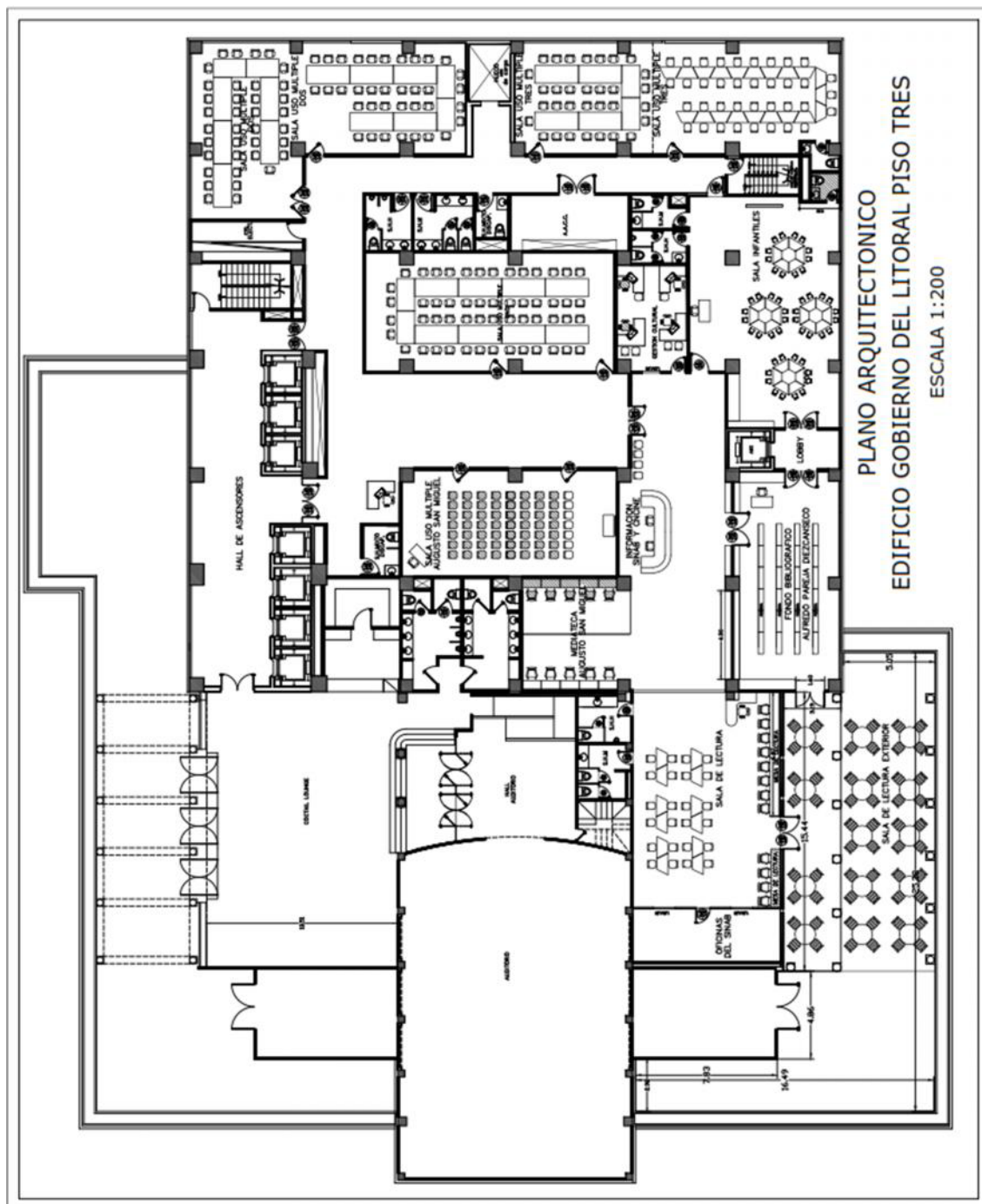
Field	Units	Obj1
Name		Guayaquil
Month		2
Day of Month		21
Day Type		WinterDesignDay
Maximum Dry-Bulb Temperature	C	33,33
Daily Dry-Bulb Temperature Range	deltaC	10
Dry-Bulb Temperature Range Modifier Type		DefaultMultipliers
Dry-Bulb Temperature Range Modifier Day Schedule N.		
Humidity Condition Type		WetBulb
Wetbulb or DewPoint at Maximum Dry-Bulb	C	26,66
Humidity Condition Day Schedule Name		
Humidity Ratio at Maximum Dry-Bulb	kgWater/kgDryA	0,0085
Enthalpy at Maximum Dry-Bulb	J/kg	
Daily Wet-Bulb Temperature Range	deltaC	
Barometric Pressure	Pa	110000
Wind Speed	m/s	2
Wind Direction	deg	260
Rain Indicator		No
Snow Indicator		No
Daylight Saving Time Indicator		No
Solar Model Indicator		ASHRAETau
Beam Solar Day Schedule Name		
Diffuse Solar Day Schedule Name		
ASHRAE Clear Sky Optical Depth for Beam Irradiance (	dimensionless	
ASHRAE Clear Sky Optical Depth for Diffuse Irradiance	dimensionless	
Sky Clearness		0

SOTANO
PLANO ARQUITECTONICO

[illegible]

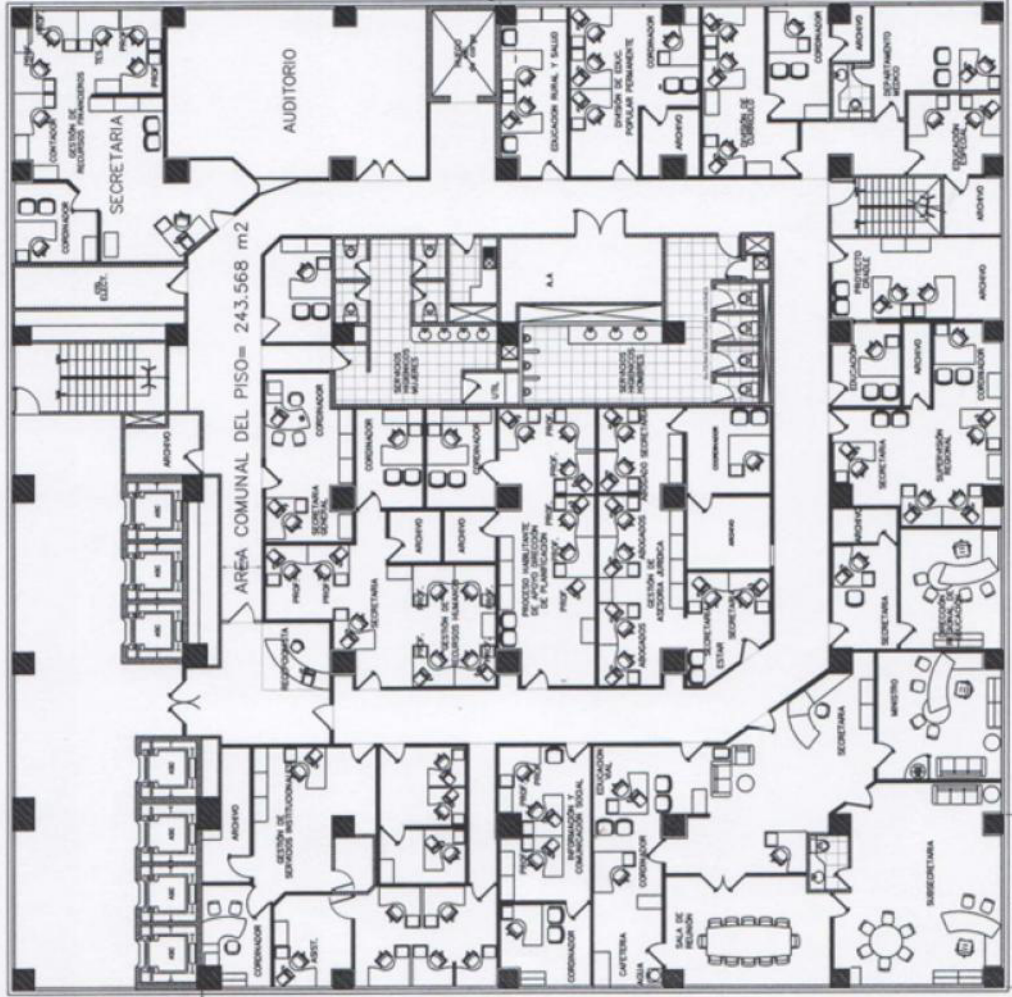
[illegible][illegible]

[illegible]



Piso 4

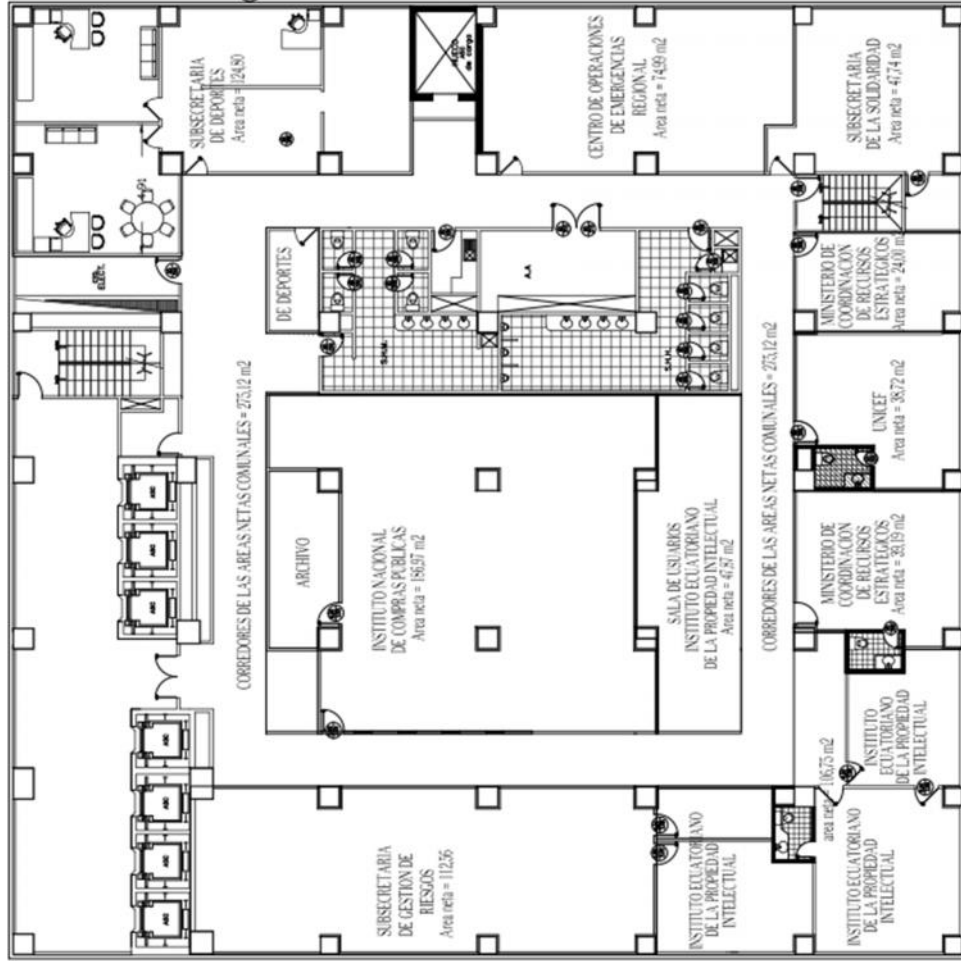
PLANO ARQUITECTONICO



PROYECTO: EDIFICIO GOBIERNO ZONAL DE GUAYAQUIL		
CONTENIDO DE LA HOJA: PLANTA ARQUITECTONICA DEL PISO CUATRO		USUARIO DE DISEÑO: DISEÑO DEL SECTOR HABITACIONAL
PROYECTISTA: DR. KATIA TORRES SANCHEZ DISEÑO DE LA PLANTA DE Pisos		PROYECTISTA: ALBERTO ENDARA OLAYO DISEÑO DE LA PLANTA DE Pisos
DEPENDENCIA: SUBSECRETARIA DEL HABITAMIENTO DE GUAYAQUIL		DEPENDENCIA: SUBSECRETARIA DEL HABITAMIENTO DE GUAYAQUIL
FECHA: OCTUBRE DE 2011		AREA TOTAL: 1.296,00 M2
ANEXO: ANEXO UNO		ANEXO: ANEXO UNO
ESCALA: 1:200		ESCALA: 1:200
PROYECTISTA: DR. KATIA TORRES SANCHEZ		PROYECTISTA: ALBERTO ENDARA OLAYO
FECHA: OCTUBRE DE 2011		FECHA: OCTUBRE DE 2011

Piso 5

PLANO ARQUITECTONICO



PROYECTO:		EDIFICIO GOBIERNO ZONAL DE GUAYAQUIL	
CONTENIDO DE LA PLANTA:		DESCRIPCION DE LAS AREAS NETAS ASIGNADAS	
PLANTA ARQUITECTONICA DEL PISO CINCO		FONDO DE LA INFANCIA UNICEF PARA LA INFANCIA UNICEF	
DISEÑADO POR: DR. JAHUE RODA GUTIERREZ		DISEÑADO POR: DR. JAHUE RODA GUTIERREZ	
DEPENDENCIA: FONDO DE LA INFANCIA UNICEF		DEPENDENCIA: FONDO DE LA INFANCIA UNICEF	
FECHA: FEBRERO DE 2010		FECHA: FEBRERO DE 2010	
ÁREA TOTAL: 91.98 M2		ÁREA TOTAL: 91.98 M2	
ANEXO DOB		ANEXO DOB	

[illegible][illegible]

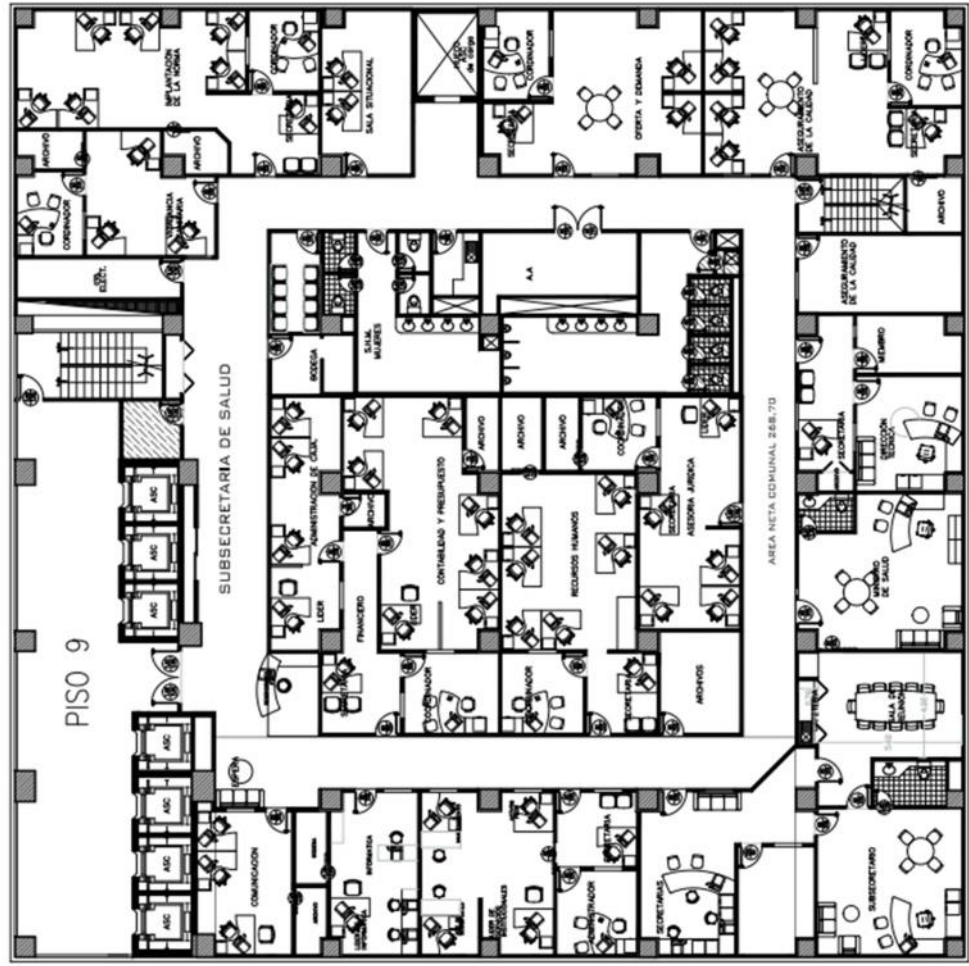
Architectural floor plan of the second floor of the Centro Cultural de la Universidad de la Habana. The plan shows various rooms including classrooms (Aula), lecture halls (Sala), meeting rooms (Sala de reuniones), and administrative offices (Oficina). It also includes a large common area (Área común) and a library (Biblioteca). The plan is oriented with North (N) at the top. The total area of the floor is 257.80 m².

SUBSECRETARIA DE CULTURA
REGION CENTRO NORTE Y GALAPAGOS

AREA NETA DE LA
SUBSECRETARIA DE CULTURA = 235,52 m²

[illegible]

[illegible]



Piso 9 PLANO ARQUITECTONICO

PROYECTOS EDIFICIO GOBIERNO ZONAL DE GUAYAQUIL CONTENIDO DE LA OBRA: PLANTA ARQUITECTONICA DEL PISO NUEVE AREA ASIGNADA AL MINISTERIO DE SALUD		PROYECTISTA DIA. KATTIA TORRES SANCHEZ DEPENDENCIA: SUBSECRETARIA DEL MINISTERIO DE SALUD PUBLICA		PROYECTISTA DIA. KATTIA TORRES SANCHEZ DEPENDENCIA: SUBSECRETARIA DEL MINISTERIO DE SALUD PUBLICA	
FECHA: OCTUBRE DE 2011		FECHA: OCTUBRE DE 2011		FECHA: OCTUBRE DE 2011	
AREA TOTAL: 1.296.00 M2		AREA TOTAL: 1.296.00 M2		AREA TOTAL: 1.296.00 M2	
ANEXO UNO		ANEXO UNO		ANEXO UNO	

[illegible]

[illegible]

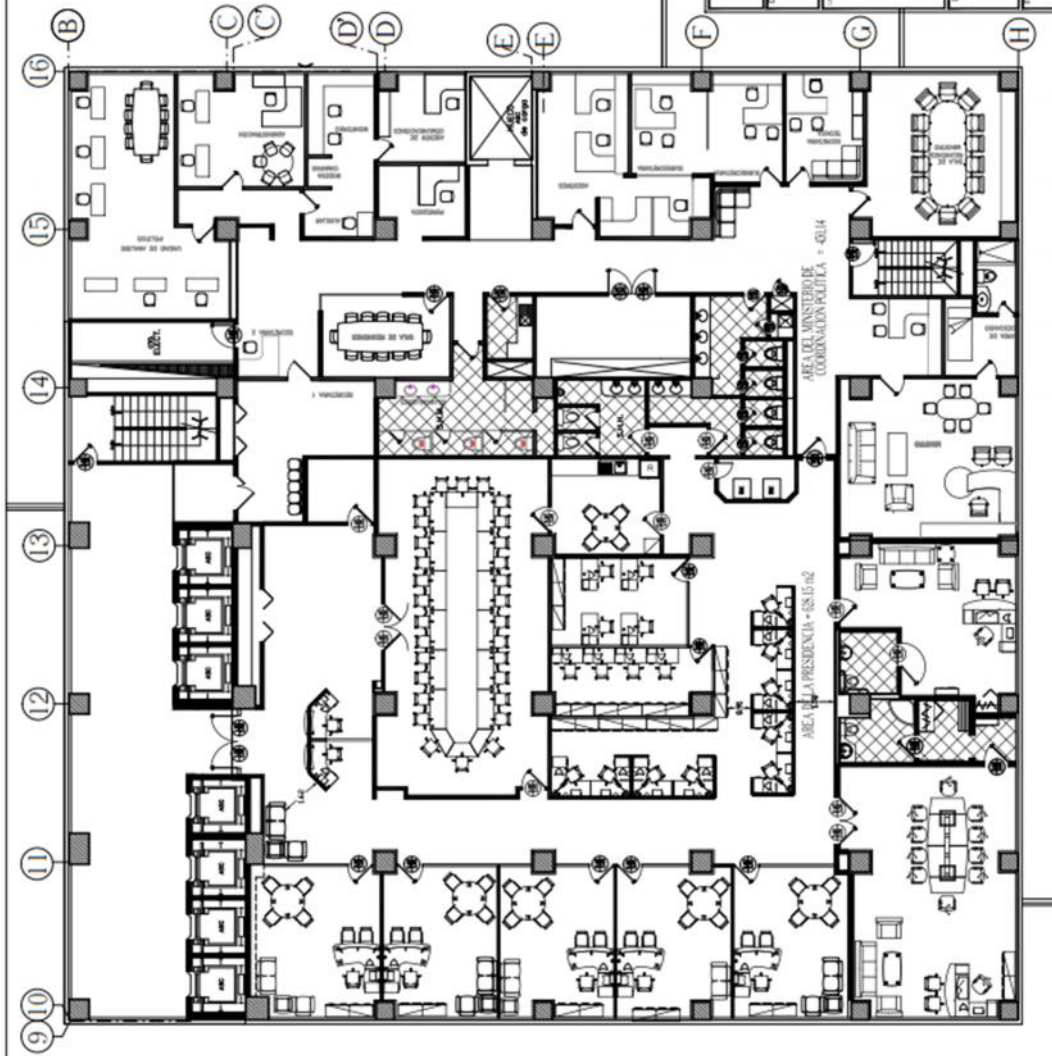
PROYECTO:	EDIFICIO GOBIERNO ZONAL DE GUAYAQUIL		
CONTRATANTE:	GOBIERNO ZONAL DE GUAYAQUIL		
CONTRATADO:	ING. LAURA HERNANDEZ		
FECHA:	FEBRERO DE 2010		
VALOR:	1.46.071 M2		
DEPARTAMENTO:	SECRETARIA NACIONAL DEL AGUA		
SECRETARIA:	SECRETARIA NACIONAL DEL AGUA		
SECRETARIO:	ING. JORGE QUEVEDO J.		
SECRETARIA:	ANEXO UNO		
SECRETARIO:	ANEXO UNO		

[illegible][illegible]

[illegible]

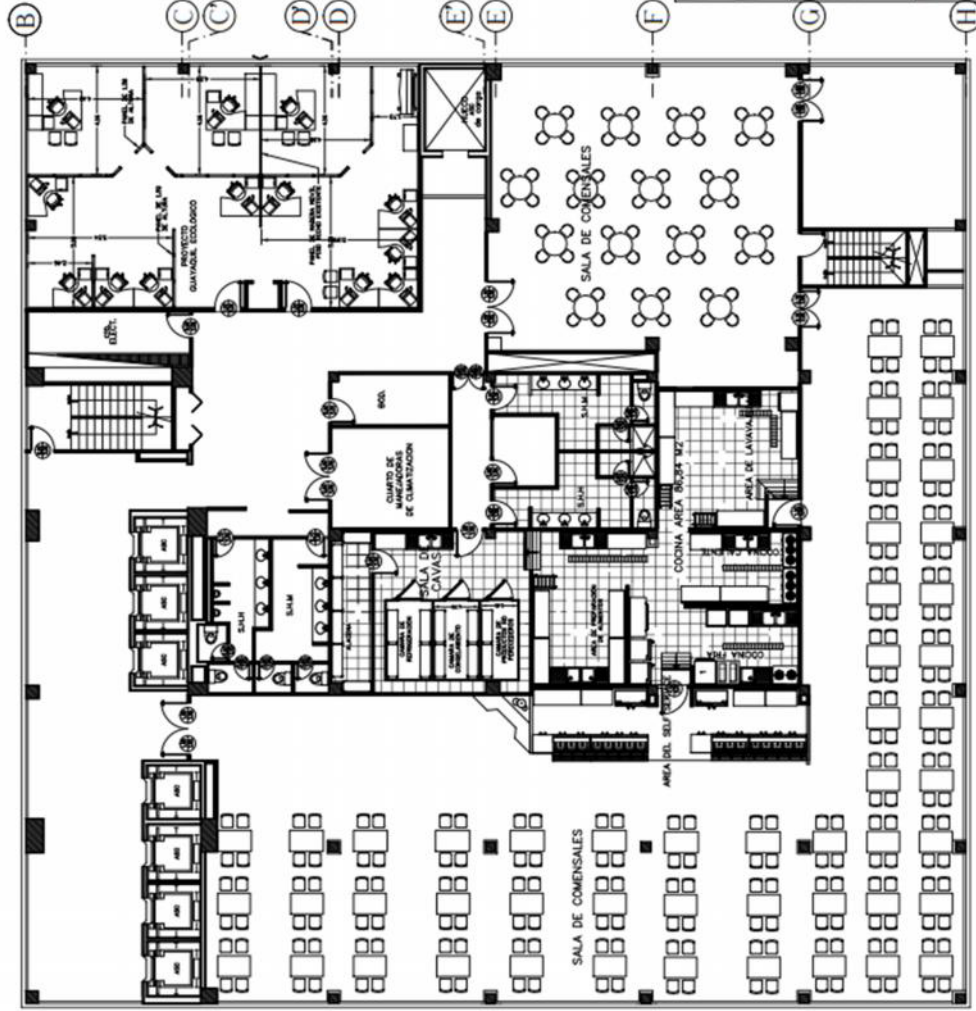
Piso 14

PLANO ARQUITECTONICO

[illegible]

Piso 15

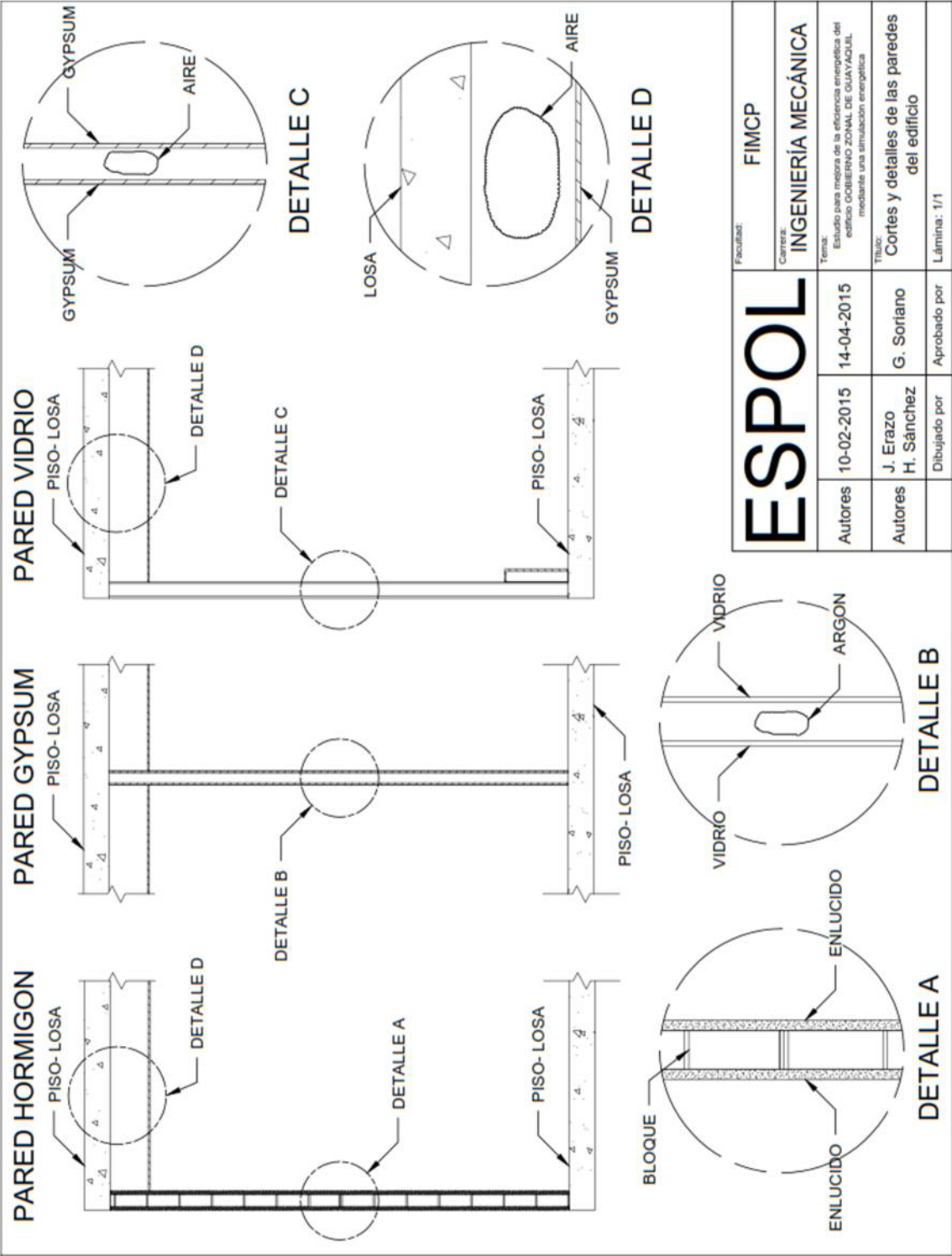
PLANO ARQUITECTONICO



PROYECTO:		EDIFICIO GOBIERNO ZONAL DE GUAYAQUIL	
CLIENTE:		GOBIERNO DE GUAYAQUIL	
OBJETIVO:		RECONSTRUCCION DE LAS AREAS NETAS ASIGNADAS	
FECHA:		15/05/2010	
AUTOR:		ING. JORGE GARCIA	
REVISOR:		ING. JORGE GARCIA	
APROBADO:		ING. JORGE GARCIA	
Escala:		1:200	
L-1		L-1	

Piso 15

APÉNDICE G **CORTES Y DETALLES DE LAS PAREDES DEL EDIFICIO**



ESPOL		Facultad:	FIMCP
		Carrera:	INGENIERÍA MECÁNICA
Autores	10-02-2015	14-04-2015	Tema:
Autores	J. Erazo H. Sánchez	G. Soriano	Título:
	Dibujado por	Aprobado por	Cortes y detalles de las paredes del edificio
			Lámina: 1/1

APÉNDICE H

RESAULTADOS DE LA IMPLEMENTACION DE MEDIDAS DE AHORRO

Línea Base

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembr e	Octubre	Noviembr e	Diciembr e	Total
Climatizació n	125,659.4 4	124,709.7 2	141,251.3 9	130665.0 0	126,106.1 1	135,114.4 4	119,825.2 8	140,337.7 8	135,061.39	124,797.5 0	135,144.1 7	125,754.7 2	1,564,426.9 4
Iluminación Interior	54,802.22	50,017.78	56,680.83	51,417.22	56,680.83	54460.00	53,638.33	56,680.83	53,295.83	54,802.22	54460.00	53,638.33	650,574.44
Equipo Interior	70,643.33	68,195.28	76,974.72	70,611.39	70,837.50	74,048.33	67,481.11	76,974.72	72,886.94	70,732.50	74,048.33	73,538.06	866,972.22
Ventiladore s	22,092.47	19,954.47	22,092.47	21,379.81	22,092.47	21,379.81	22,092.47	22,092.47	21,379.81	22,092.47	21,379.81	22,092.47	260,121.00
Bombas	22,237.19	21,228.19	23,999.19	22,218.44	21,616.86	22,997.19	20,343.69	23,881.72	23,018.75	21,299.33	22,997.19	21,561.06	267,398.83
Rechazo de Calor	14,335.22	14,309.97	16,103.33	14,914.33	14,322.94	15,503.86	13,711.69	16,106.36	15,518.22	14,316.11	15,509.78	14,329.11	178,980.94
Total	309,769.8 9	298,415.4 2	337,101.9 4	311,206.1 9	311,656.7 2	323,503.6 4	297,092.5 8	336,073.8 9	321,160.94	308,040.1 4	323,539.2 8	310,913.7 5	3,788,474.3 8

M1A1: Disminución de la temperatura del agua de entrada al condensador

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembr e	Octubre	Noviembr e	Diciembr e	Total
Climatizació n	125,332.2 2	124,294.1 7	140,665.5 6	130,092.2 2	125,733.3 3	134,716.3 9	119,475.5 6	134,811.1 1	134,630.56	124,396.9 4	134,719.4 4	125,385.8 3	1,554,253.3 3
Iluminación Interior	54,802.22	50,017.78	56,680.83	51,417.22	56,680.83	54,460	53,638.33	56,680.83	53,295.83	54,802.22	54,460	53,638.33	650,574.44
Equipo Interior	70,616.67	68,168.33	76,943.89	70,584.44	70,810.56	74,018.61	67,456.67	74,899.44	72,858.61	70,705.83	74,018.61	73,509.72	864,591.39
Ventiladore s	22,339	20,177.17	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	263,023.72
Bombas	14,130.33	13,496.75	15,338.56	14,182.47	13,881.97	14,594.86	12,909.94	14,624.06	14,612.81	13,541.39	14,593.83	13,819.94	169,726.92
Rechazo de Calor	13,053.28	13,240.22	15,021.94	13,906.36	13,200.22	13,921.50	12,244.69	13,786.81	13,836.94	12,878.92	13,886.28	12,988.64	161,965.81
Total	300,273.7 2	289,394.4 2	326,989.7 8	301,801.1 1	302,645.9 2	313,329.7 5	288,064.1 9	317,141.2 5	310,853.14	298,664.3 1	313,296.5 6	301,681.4 7	3,664,135.6 1

M1A2 Aumento de la temperatura de salida del evaporador.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Climatización	109,575	113,314.44	139,117.78	122,191.94	115,007.50	113,645	99,750.56	112,817.78	109,749.17	103,316.11	110,426.67	109,323.89	1,358,235.83
Iluminación Interior	54,802.22	50,017.78	56,680.83	51,417.22	56,680.83	54,460	53,638.33	56,680.83	53,295.83	54,802.22	54,460	53,638.33	650,574.44
Equipo Interior	70,616.67	68,168.33	76,943.89	70,584.44	70,810.56	74,018.61	67,456.67	74,899.44	72,858.61	70,705.83	74,018.61	73,509.72	864,591.39
Ventiladores	22,339	20,177.17	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	263,023.72
Bombas	19,041.92	18,731.19	22,774.86	20,343.92	19,912.89	19,068.08	16,717.78	18,964.61	18,762.36	17,634.33	18,857.92	19,159.22	229,969.08
Rechazo de Calor	11,287.31	11,732.61	14,634.83	12,784.33	12,081.14	11,635.61	10,168.25	11,509.61	11,360.47	10,688.11	11,477.83	11,430.19	140,790.30
Total	287,662.11	282,141.53	332,491.19	298,940.25	296,831.92	294,445.69	270,070.58	297,211.28	287,644.83	279,485.61	290,859.42	289,400.36	3,507,184.77

M2A1 Implementación de variadores de frecuencia en las bombas de agua de ingreso al evaporador.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Climatización	124,981.94	124,160.28	140,509.17	130,008.89	125,559.17	134,693.61	119,478.06	134,881.11	134,689.72	124,406.67	134,734.44	125,264.44	1,553,367.50
Iluminación Interior	54,802.22	50,017.78	56,680.83	51,417.22	56,680.83	54,460	53,638.33	56,680.83	53,295.83	54,802.22	54,460	53,638.33	650,574.44
Equipo Interior	70,643.33	68,195.28	76,974.72	70,611.39	70,837.50	74,048.33	67,481.11	74,929.17	72,886.94	70,732.50	74,048.33	73,538.06	864,926.67
Ventiladores	22,092.47	19,954.47	22,092.47	21,379.81	22,092.47	21,379.81	22,092.47	22,092.47	21,379.81	22,092.47	21,379.81	22,092.47	260,121.00
Bombas	17,964.06	17,425.83	19,687.67	18,237.50	17,299.22	18,427.03	16,225.78	18,268.67	18,308.97	16,992.72	18,372.94	17,102.19	214,312.58
Rechazo de Calor	14,320.36	14,310.89	16,105	14,919.81	14,314.78	15,503.14	13,708.81	15,507.19	15,515.14	14,312.17	15,504.78	14,322.44	178,344.50
Total	304,804.39	294,064.53	332,049.86	306,574.61	306,783.97	318,511.92	292,624.56	322,359.44	316,076.42	303,338.75	318,500.31	305,957.94	3,721,646.69

M2A2 Sustitución de enfriador por otro que posea variador de frecuencia.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Climatización	85,659.17	125,191.39	153,927.22	137,697.78	104,530.28	66,770.56	50,390.83	55,673.61	57,849.44	54,850	60,856.11	77,256.11	1,030,652.50
Iluminación Interior	54,802.22	50,017.78	56,680.83	51,417.22	56,680.83	54,460	53,638.33	56,680.83	53,295.83	54,802.22	54,460	53,638.33	650,574.44
Equipo Interior	70,616.67	68,168.33	76,943.89	70,584.44	70,810.56	74,018.61	67,456.67	74,899.44	72,858.61	70,705.83	74,018.61	73,509.72	864,591.39
Ventiladores	22,339	20,177.17	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	263,023.72
Bombas	18,985.44	18,127.56	20,510.89	18,988.69	18,523.83	19,638.17	17,372.22	19,669.58	19,658.03	18,197.42	19,638.17	18,466.50	227,776.50
Rechazo de Calor	11,269.69	11,290.61	12,696.53	11,778.31	11,285.36	12,154.83	10,726.31	12,130.67	12,137.56	11,216.75	12,110.69	11,252.67	140,049.97
Total	263,672.19	292,972.83	343,098.36	312,084.83	284,169.86	248,660.56	221,923.36	241,393.14	237,417.86	232,111.22	242,701.97	256,462.33	3,176,668.53

M1A1+M1A2

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Climatización	108,894.72	114,838.61	147,504.44	128,480.83	128,365	109,198.06	91,932.22	105,287.50	104,599.44	104,307.50	108,376.39	122,576.11	1,374,360.83
Iluminación Interior	54,802.22	50,017.78	56,680.83	51,417.22	56,680.83	54,460	53,638.33	56,680.83	53,295.83	54,802.22	54,460	53,638.33	650,574.44
Equipo Interior	70,616.67	68,168.33	76,943.89	70,584.44	72,855	74,018.61	69,474.44	76,943.89	72,858.61	72,687.78	74,018.61	73,509.72	872,680.00
Ventiladores	22,339	20,177.17	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	263,023.72
Bombas	12,418.47	12,155.14	14,821.17	13,316.08	13,595.50	12,368.25	10,890.78	12,346.39	12,103.64	11,971.72	12,299.44	13,146.11	151,432.69
Rechazo de Calor	9,082	9,688	12,625.31	10,940.11	10,894.89	9,107.03	7,560.06	8,707.89	8,716.17	8,738.81	9,098.61	10,420.36	115,579.22
Total	278,153.08	275,045.03	330,914.64	296,357.08	304,730.22	280,770.33	255,834.83	282,305.50	273,192.08	274,847.03	279,871.44	295,629.64	3,427,650.91

M1A1+M2A1

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Climatización	124,341.39	123,130.28	139,170.28	128,786.67	129,607.50	133,747.78	123,694.44	138,981.94	133,726.94	128,606.67	133,781.11	134,060.56	1,571,635.56
Iluminación Interior	54,802.22	50,017.78	56,680.83	51,417.22	56,680.83	54,460	53,638.33	56,680.83	53,295.83	54,802.22	54,460	53,638.33	650,574.44
Equipo Interior	70,616.67	68,168.33	76,943.89	70,584.44	72,855	74,018.61	69,474.44	76,943.89	72,858.61	72,687.78	74,018.61	73,509.72	872,680.00
Ventiladores	22,339	20,177.17	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	263,023.72
Bombas	14,128.97	13,487.86	15,186.31	14,055.22	14,039.47	14,594.83	13,471.25	15,153.97	14,592.94	14,032.75	14,593.83	14,595.89	171,933.30
Rechazo de Calor	13,039.97	13,225.94	15,002.06	13,889.64	13,731.58	13,907.58	12,771.17	14,304.14	13,823.08	13,386.56	13,872.56	14,068.08	165,022.36
Total	299,268.22	288,207.36	325,322.36	300,351.58	309,253.39	312,347.19	295,388.64	324,403.78	309,915.80	305,854.97	312,344.50	312,211.58	3,694,869.39

M1A1+M2A2

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Climatización	84,528.06	123,426.39	151,569.72	135,354.17	107,572.78	66,183.06	52,196.67	56,529.17	57,515.83	55,981.39	60,267.78	81,832.78	1,032,957.78
Iluminación Interior	54,802.22	50,017.78	56,680.83	51,417.22	56,680.83	54,460	53,638.33	56,680.83	53,295.83	54,802.22	54,460	53,638.33	650,574.44
Equipo Interior	70,616.67	68,168.33	76,943.89	70,584.44	72,855	74,018.61	69,474.44	76,943.89	72,858.61	72,687.78	74,018.61	73,509.72	872,680.00
Ventiladores	22,339	20,177.17	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	263,023.72
Bombas	14,775.19	17,470.19	20,179.94	17,410.25	16,859.42	12,448.86	10,293.42	11,579.31	11,491.36	10,792.36	11,477.22	13,994.36	168,771.89
Rechazo de Calor	11,363.42	11,909.19	13,658.69	12,517.25	12,219	11,752.75	10,642	11,857	11,514.39	11,184.78	11,599.69	12,111.92	142,330.08
Total	258,424.56	291,169.06	341,372.08	308,901.72	288,526.03	240,481.67	218,583.86	235,929.20	228,294.42	227,787.53	233,441.69	257,426.11	3,130,337.92

M1A2+M2A1

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Climatización	108,947.22	112,696.39	138,250.56	121,469.72	114,247.22	113,141.39	99,353.61	112,374.17	109,263.33	102,795.56	109,913.89	108,778.89	1,351,231.95
Iluminación Interior	54,802.22	50,017.78	56,680.83	51,417.22	56,680.83	54,460	53,638.33	56,680.83	53,295.83	54,802.22	54,460	53,638.33	650,574.44
Equipo Interior	70,616.67	68,168.33	76,943.89	70,584.44	70,810.56	74,018.61	67,456.67	74,899.44	72,858.61	70,705.83	74,018.61	73,509.72	864,591.39
Ventiladores	22,339	20,177.17	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	263,023.72
Bombas	18,930.25	18,730.64	22,743.50	20,321.25	19,448.17	19,073.92	16,714.44	18,944.67	18,741.92	17,589.33	18,846.58	19,058.25	229,142.92
Rechazo de Calor	11,297.14	11,740.94	14,656	12,794.69	12,066.94	11,649.28	10,180.22	11,517.36	11,364.42	10,691.69	11,483.14	11,439.44	140,881.28
Total	286,932.50	281,531.25	331,613.78	298,205.72	295,592.72	293,961.58	269,682.28	296,755.47	287,142.50	278,923.64	290,340.61	288,763.64	3,499,445.69

M1A2+M2A2

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Climatización	53,294.72	63,206.94	81,646.67	89,893.06	65,658.89	50,735.56	43,148.06	46,077.50	48,460.28	48,069.17	52,740	57,446.39	700,377.22
Iluminación Interior	54,802.22	50,017.78	56,680.83	51,417.22	56,680.83	54,460	53,638.33	56,680.83	53,295.83	54,802.22	54,460	53,638.33	650,574.44
Equipo Interior	70,616.67	68,168.33	76,943.89	70,584.44	70,810.56	74,018.61	67,456.67	74,899.44	72,858.61	70,705.83	74,018.61	73,509.72	864,591.39
Ventiladores	22,339	20,177.17	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	22,339	21,618.39	22,339	21,618.39	22,339	263,023.72
Bombas	16,407.72	16,098.39	19,474.14	17,446.31	17,112	16,477.83	14,458.53	16,403.92	16,241.78	15,251.19	16,312.64	16,507.33	198,191.78
Rechazo de Calor	8,883.08	9,244.50	11,493.75	10,071.58	9,515.86	9,182.36	7,979.94	9,048.06	8,952.03	8,449.56	9,063.06	9,020.69	110,904.47
Total	226,343.42	226,913.11	268,578.28	261,031.00	242,117.14	226,492.75	209,020.53	225,448.75	221,426.92	219,616.97	228,212.70	232,461.47	2,787,663.03

M1A1

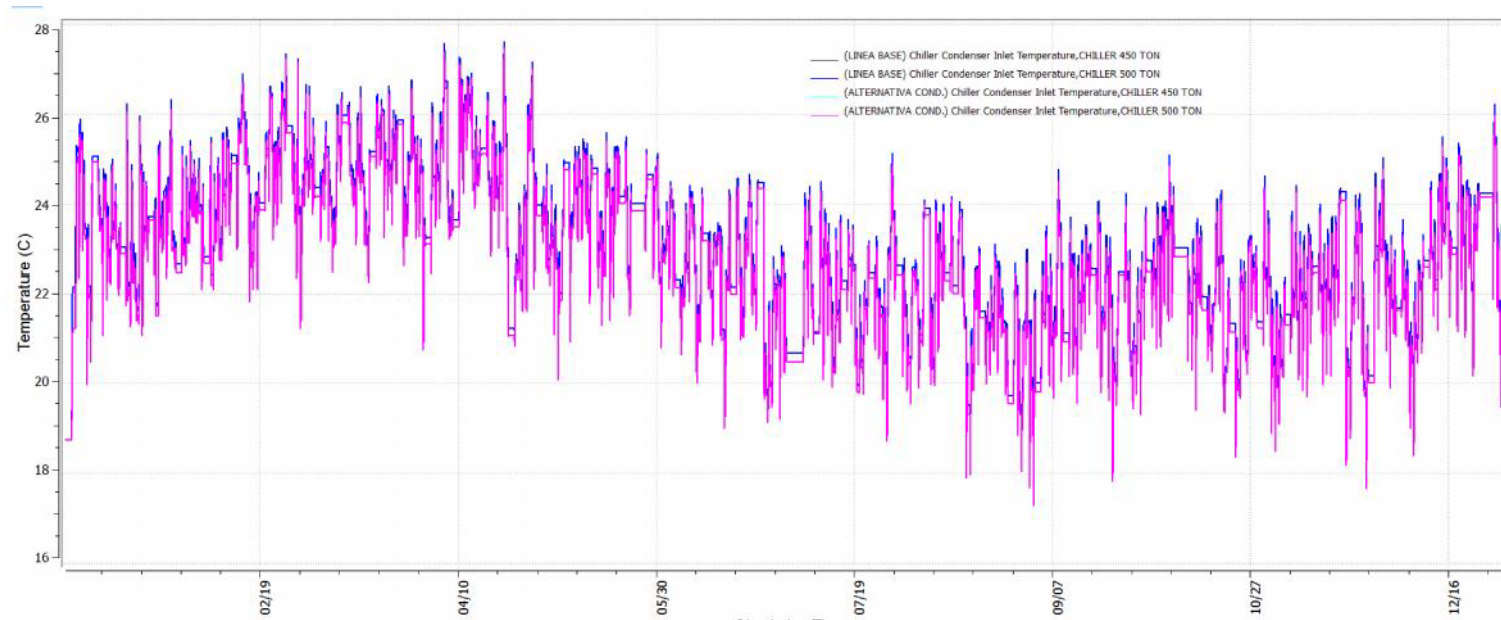


FIGURA 1. COMPORTAMIENTO ANUAL DE TEMPERATURA EN CONDENSADOR.

M1A2

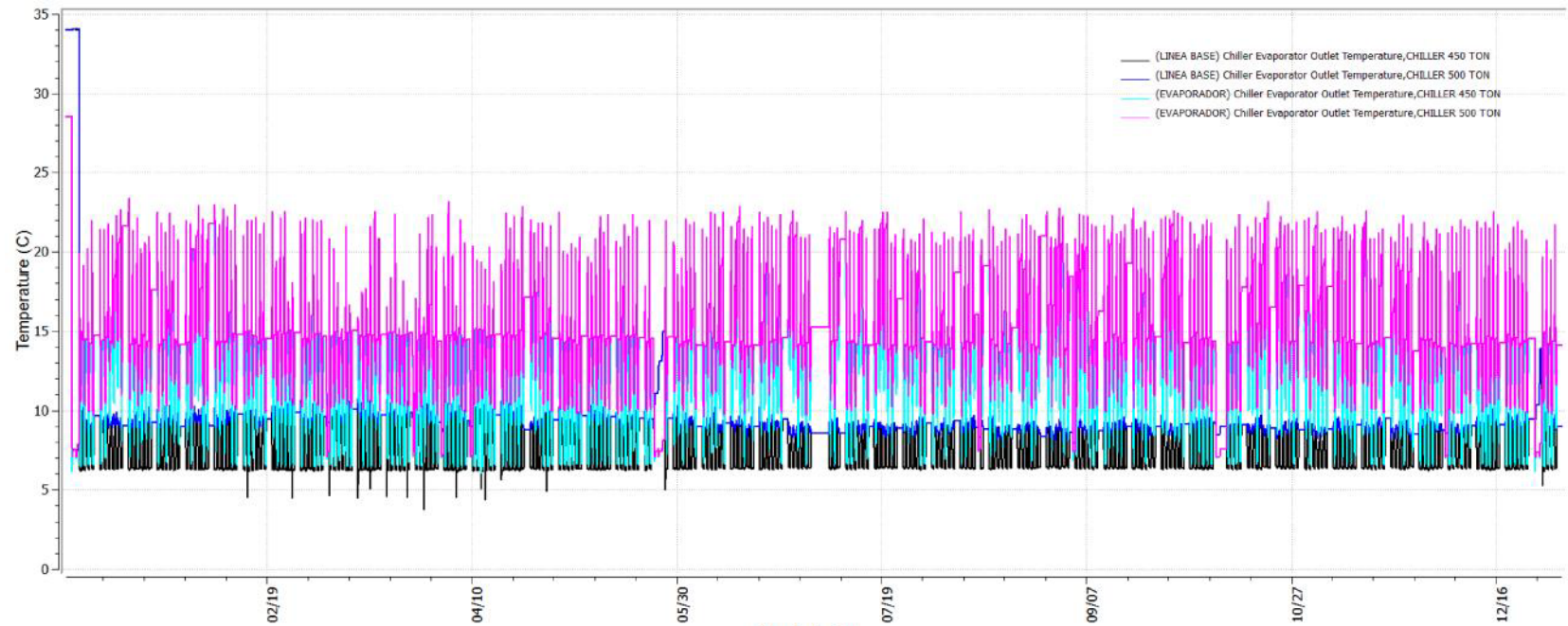


FIGURA 2. COMPORTAMIENTO ANUAL DE TEMPERATURA EN EVAPORADOR.

M2A1

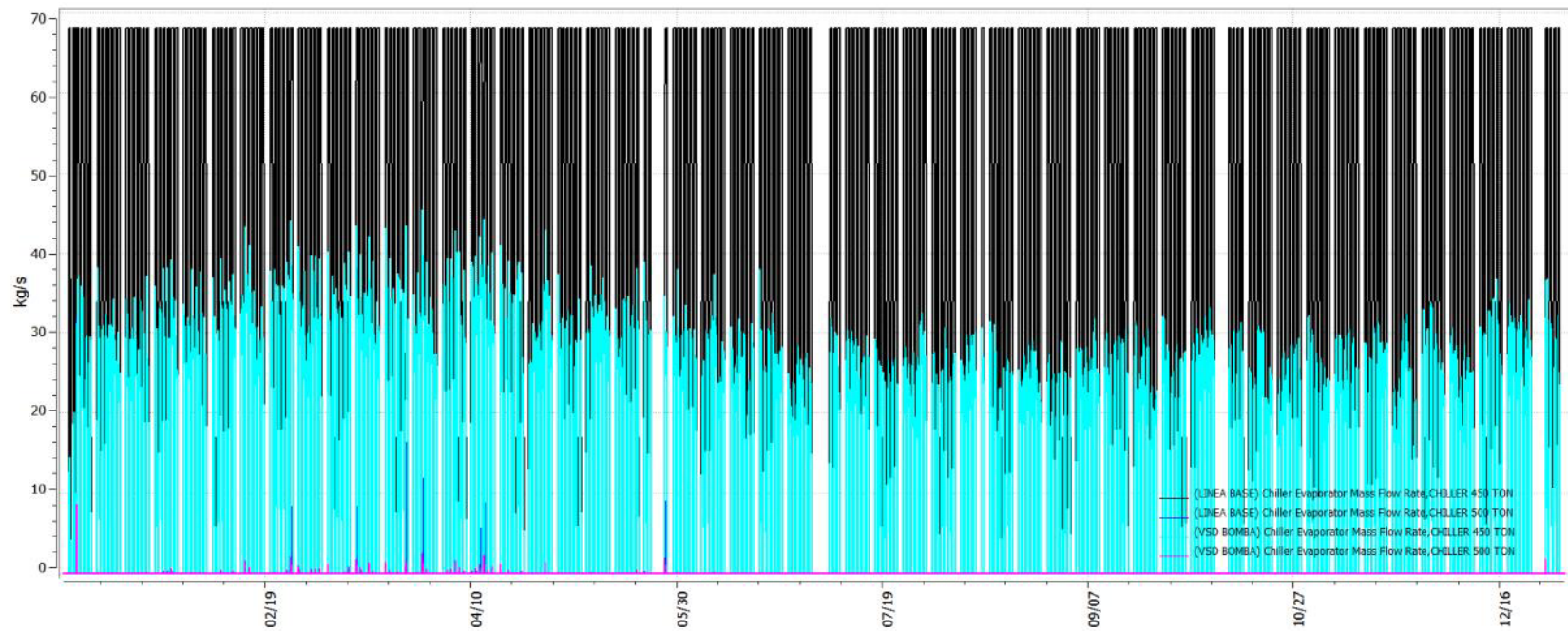


FIGURA 3. COMPORTAMIENTO ANUAL DE FLUJO MÁSSICO EN EVAPORADOR.

M2A2

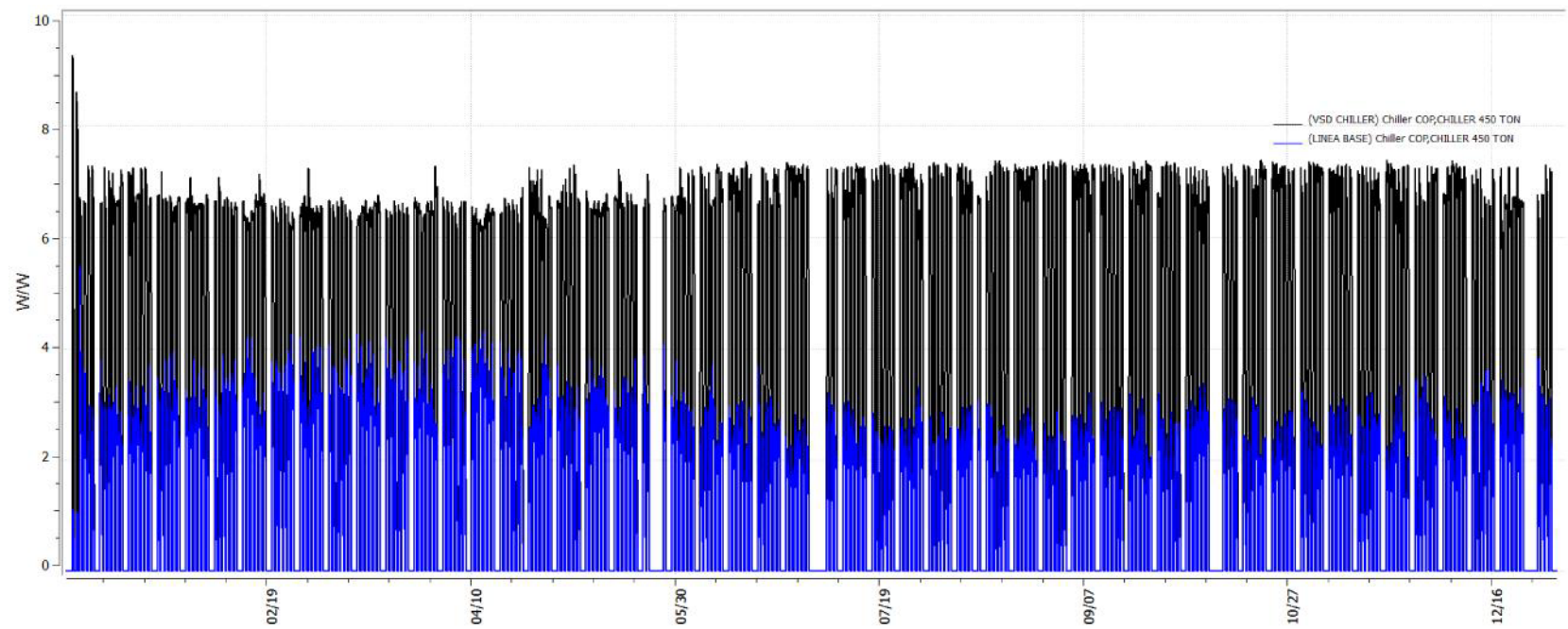


FIGURA 4. COMPORTAMIENTO ANUAL COP.

APÉNDICE I

ANÁLISIS ECONÓMICO

En este apéndice se desarrolla un estudio de viabilidad económica para la alternativa de sustitución del Chiller.

Para esto se estimó basado en el consumo energético de la línea base, y el consumo de la alternativa de mencionada, el ahorro obtenido, el cual se ha calculado su costo, basado en la tarifa actual del kilovatio – hora (kW/h).

kWh/\$		\$ 0.06	
Meses	Línea Base	Alternativa M2A2	Ahorro
Enero	\$ 18,586.19	\$ 15,820.33	\$ 2,765.86
Febrero	\$ 17,904.93	\$ 17,578.37	\$ 326.56
Marzo	\$ 20,226.12	\$ 20,585.90	-\$ 359.79
Abril	\$ 18,672.37	\$ 18,725.09	-\$ 52.72
Mayo	\$ 18,699.40	\$ 17,050.19	\$ 1,649.21
Junio	\$ 19,410.22	\$ 14,919.63	\$ 4,490.58
Julio	\$ 17,825.55	\$ 13,315.40	\$ 4,510.15
Agosto	\$ 20,164.43	\$ 14,483.59	\$ 5,680.85
Septiembre	\$ 19,269.66	\$ 14,245.07	\$ 5,024.58
Octubre	\$ 18,482.41	\$ 13,926.67	\$ 4,555.74
Noviembre	\$ 19,412.36	\$ 14,562.12	\$ 4,850.24
Diciembre	\$ 18,654.83	\$ 15,387.74	\$ 3,267.09
Total	\$ 227,308.46	\$ 190,600.11	\$ 36,708.35

Los costos del equipo que se realizará la sustitución son los siguientes:

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	COSTO EQUIPO	COSTO INSTALACIÓN	TOTAL
1	Chiller centrifugo con VFD enfriados por agua de 450 TON	265,213.00	39,781.95	304,994.95

A continuación se observa en un escenario estándar se asumirá que este ahorro se lo obtendrá a lo largo de la vida útil de la maquinaria (20 años), lo que implica que los retornos a valores presente, con una tasa mínima de ahorro de rendimiento del 15%, se puede demostrar que el valor actual neto es positivo, si se realiza la venta del equipo antiguo por no menos de \$75250 para que sea rentable realizar la sustitución.

TMAR	15%
Valor Maquinaria	304994.95

	1	2	3	4	5
Ingresos	\$ 36,708.35	\$ 36,708.35	\$ 36,708.35	\$ 36,708.35	\$ 36,708.35
(+) Depreciación M.A	-	-	-	-	-
(-) Depreciación M.N	13,260.65	13,260.65	13,260.65	13,260.65	13,260.65
(=) UAI	23,447.70	23,447.70	23,447.70	23,447.70	23,447.70
(-) Impuestos	-	-	-	-	-
(=) UDI	23,447.70	23,447.70	23,447.70	23,447.70	23,447.70
(-) Depreciación M.A	-	-	-	-	-
(+) Depreciación M.N	13,260.65	13,260.65	13,260.65	13,260.65	13,260.65
(+) Vta. Maq. Ant.	-	-	-	-	-
(-) Compra maq. Nueva	(304,994.95)	-	-	-	-
(=) FLUJO DE CASH	36,708.35	36,708.35	36,708.35	36,708.35	36,708.35
VAN	(75,225.22)				
TIR	10%				

[illegible]

	14	15	16	17	18	19	20
\$	36,708.35	\$	36,708.35	\$	36,708.35	\$	36,708.35
	-		-		-		-
	13,260.65		13,260.65		13,260.65		13,260.65
	23,447.70		23,447.70		23,447.70		23,447.70
	-		-		-		-
	23,447.70		23,447.70		23,447.70		23,447.70
	-		-		-		-
	13,260.65		13,260.65		13,260.65		13,260.65
	36,708.35		36,708.35		36,708.35		36,708.35

TMAR	15%
Valor Maquinaria	304994.95

	1	2	3	4	5
Ingresos	\$ 36,708.35	\$ 36,708.35	\$ 36,708.35	\$ 36,708.35	\$ 36,708.35
(+) Depreciación M.A	-	-	-	-	-
(-) Depreciación M.N	13,260.65	13,260.65	13,260.65	13,260.65	13,260.65
(=) UAI	23,447.70	23,447.70	23,447.70	23,447.70	23,447.70
(-) Impuestos	-	-	-	-	-
(=) UDI	23,447.70	23,447.70	23,447.70	23,447.70	23,447.70
(-) Depreciación M.A	-	-	-	-	-
(+) Depreciación M.N	13,260.65	13,260.65	13,260.65	13,260.65	13,260.65
(+) Vta. Maq. Ant.	75,250.00				
(-) Compra maq. Nueva	(304,994.95)				
(=) FLUJO DE CAJA	36,708.35	36,708.35	36,708.35	36,708.35	36,708.35
VAN	24.78				
TIR	15%				

[illegible]

[illegible]

BIBLIOGRAFÍA

1. Demanda de energía eléctrica en Guayaquil subió 4,63%, (Martes, 4 de marzo de 2014), Diario El Universo versión digital, extraído de: <http://www.eluniverso.com/noticias/2014/03/04/nota/2282816/demanda-energia-guayaquil-subio-463>, ingresado el 15/12/2014, hora 13:00.
2. Buildings Energy Data Book (March, 2010). US Departament of Energy. Extraído de: <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/TableView.aspx?table=3.1.4>, ingresado el 31/12/2014 a las 2:51.
3. ASHRAE, Thermal environmental conditions for human occupancy. ANSI/ASHRAE Standard 55-2010., ASHRAE, Atlanta, Ga, 2010.
4. Castro, Miguel. Hacia una Matriz Energética Diversificada en Ecuador, Quito, CEDA, noviembre 2011, 34-66 p.
5. Enkvist, Per-Anders, Tomas Naucér y Jerker Rosander (2007). "A cost curve for greenhouse gas reduction". The Mckinsey Quarterly 1: 35-45.
6. Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER), Plan de Eficiencia Energética en el Ecuador. Noviembre, 2010.
7. Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), 2012. Boletín estadístico del sector eléctrico ecuatoriano del año 2011, 46 p.

8. CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad) (2013). "Plan Maestro de Electrificación 2013 – 2022: Estudio y Gestión de la Demanda Eléctrica", 25 p.
9. Carvajal, Pablo; Orbe, Adrián (2013). Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. "Balance Energético Nacional 2013 (Base 2012)", 49 p.
10. Albornoz, Esteban; Estimación del Impacto, "Visión Sector Eléctrico Ecuatoriano Beneficios Proyecto Mazar", Vol. I, Cuenca, octubre 2012, 15p.
11. Vega, Raúl (2010). Estimación del Impacto Físico y Económico sobre los Recursos Hídricos por Efectos del Cambio Climático en Ecuador. Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático (CEPAL - ERECC Ecuador). Quito.
12. Cornejo Mauricio, Soriano Guillermo, Términos de referencia para un estudio sobre: "Estudio de factibilidad para uso de suelo como sumidero de calor para reemplazo de torres de enfriamiento/enfriadores evaporativos", 2p.
13. Peralta, J., López, Á, Barriga, A., & Sosa, I. (2013). Análisis estadístico de la información meteorológica para la explotación de energías renovables en el Ecuador. Conference Paper, (2), 9-9. Retrieved March 21, 2014, from http://www.researchgate.net/publication/262420217_Analisis_estadistico_de_la_informacin_meteorologica_para_la_explotacin_de_energias_renovables_en_el_Ecuador.
14. Autoridad Portuaria de Guayaquil, Ubicación Geográfica. Extraído de: <http://www.apg.gob.ec/institucional/geografica>

15. Instituto Oceanográfico de la Armada. (2005). DERROTERO DE LA COSTA CONTINENTAL E INSULAR DEL ECUADOR (4). Armada del Ecuador.
16. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2013, Quito-Ecuador). Anuario Meteorológico 2011, p. 104.
17. World Business Council for Sustainable Development: Energy Efficiency in Buildings: Business realities and opportunities. Summary report. Geneva, Switzerland (2007).
18. MEER: Políticas y Estrategia para el Cambio de la Matriz Energética del Ecuador (2008).
19. Agencia Chilena de Eficiencia Energética: razones de la adopción del modelo público-privado y sus implicancias. Análisis crítico del marco institucional. Taller de memoria: "Instrumentos para la elaboración de una política energética sustentable." No. 11100288, 2010-2012.
20. Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE), extraído de: <http://www.acee.cl/eficiencia-energetica/ee>, ingresado el 25/08/14, hora 13:47.
21. Hunn, B. (1996). Methods of Energy Analysis. In Fundamentals of building energy dynamics (p. 227). Cambridge, Mass.: MIT Press.
22. Garcés, C. (2012, July 1). Estrategias de diseño sustentable y materiales para la construcción en la región costa. EL OFICIAL: Información Que Construye.

23. Millstein, Don. (2011, Noviembre). Submetering for Improved Building Operations & Maintenance Performance: Whether designed in or retrofitted, submeters are installed on the “building side” of the main utility meter to measure energy usage from the enterprise level all the way down to a single device or circuit, extraído de: <http://www.automatedbuildings.com/news/nov11/articles/emon/111021123404emon.html>.
24. Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), (Quito, 2009) NTE INEN 2506:2009 Eficiencia energética en edificaciones. Requisitos. Primera edición, 1p.
25. Krarti, M. (2000). Energy audit of building systems: An engineering approach. Boca Raton, FL: CRC Press.
26. ASHRAE Guideline 14 (2002), Measurement of energy and demand savings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
27. American Society of Heating, & Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2001). 2001 ASHRAE handbook: Fundamentals. Atlanta, GA: ASHRAE.
28. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), & Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2008). Guía técnica de procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios. Madrid, España.

29. Lawrence Berkeley National Laboratory, & Hirsch J. (2009). Building Energy Use and Cost Analysis Program. Berkeley, DC: United States. Dept. of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.
30. OpenStudio user documentation: Installation and Introductory Tutorial, National Renewable Energy Laboratory (NREL), extraído de: http://nrel.github.io/OpenStudio-user-documentation/getting_started/getting_started/, ingresado el 03/01/2015 hora 16:00.
31. Hirsch & Associates, J. (2004, September). eQuest Energy Simulation Training for Design & Construction Professionals [PDF], pag 284
32. Harriman Lewis, Lstiburek Joseph (2009). The ASHRAE guide for buildings in Hot & Humid Climates. 2nd Ed, Chapter 4: Reducing energy consumption, 39p.
33. Sevillano Calvo/INSTITUTO DE EDUCACION SECUNDARIA VIRGEN DEL PILAR, F. (2011). Motores asíncronos trifásicos, variadores de frecuencia [pdf], 143p. Fernando Sevillano Calvo, Variadores de frecuencia en bombas, 143p.
34. Yorkland Controls Ltd. Environmental Solutions, Application Guide: Variable Frequency Drivers in Retrofit or New Applications, REV2005.10.
35. L.D. Danny Harvey, 2006, "A Handbook on Low-Energy Buildings and District-Energy Systems: Fundamentals, Techniques and Examples", Taylor & Francis Group, 249 p.

36. Thomas Hartman, P.E., September 2001, "All-Variable Speed Centrifugal Chiller Plants", ASHRAE Journal: Centrifugal Chillers, 43, 44p.
37. Mick Schwedler, P.E., and Beth Bakkum, November 2009, "Upgrading Chilled-Water Systems", ASHRAE Journal, 17p.
38. Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), 2012. Boletín estadístico del sector eléctrico ecuatoriano del año 2011.
39. Clarke, J. (2001). Energy simulations in building design (2nd Ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
40. CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad) (2007). "Plan Maestro de Electrificación 2007 - 2016". Quito, Consejo Nacional de Electricidad Ecuador, 433 p.
41. Consejo Mundial de la Energía (2010). Eficiencia Energética: Una Receta para el Éxito, "Usado con permiso del Consejo Mundial de Energía, Londres, www.worldenergy.org", p. 25.
42. Crawley, D., Hand, J., Kummert, M., & Griffith, B. (n.d.). Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs. Building and Environment, 661-673.
43. Crawley, D., Lawrie, L., Winkelmann, F., Buhl, W., Huang, Y., Pedersen, C., Glazer, J. (n.d.). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. Energy and Buildings, 319-331.

- 44.Domus - Procel Edifica (2011). Programa de Simulação Termoenergético – versão beta 2011. Atualizado em 10 de novembro de 2011. (<http://domus.pucpr.br/>).
- 45.Energy Design Resources. HVAC Simulation Guidebook Volume: Segunda Edición, 2012.
- 46.EnergyPlus. (2008). EnergyPlus: Getting started with EnergyPlus. Retrieved from: <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/documentation.html>
- 47.eQUEST. (2008). eQUEST-The quick energy simulation tool, an overview. Retrieved from <http://www.doe2.com/download/equest/eQUESTv3Overview.pdf>
- 48.Hong, T. (2008). Comparing Computer Run Time of Building Simulation Programs. Build Simul (2008). Berkeley,,: Tsinghua Press and Springer.
- 49.Hong, T. (2009, January 1). Comparisons of HVAC simulations between EnergyPlus and DOE-2.2 for data centers.(Report). ASHRAE Transactions.
- 50.Kaplan, Michael; Caner, Phoebe; Kaplan Engineering. Guidelines for energy simulation of commercial buildings. Portland: Commercial Technology Section - RMCB, 1992.
- 51.Neill, Z. (2011, July 1). Procel Edifica (2011). models for a DoD building.(Report). ASHRAE Transactions.
- 52.Sree Rallapalli, H. (2010). A Comparison of EnergyPlus and eQUEST Whole Building Energy Simulation Results for a Medium Sized Office Building (Master's thesis).