



---

**Universidad de Valladolid**



**PROGRAMA DE DOCTORADO EN  
INGENIERÍA INDUSTRIAL  
INGENIERÍA ENERGÉTICA**

**TESIS DOCTORAL:**

**HERRAMIENTAS DE GESTIÓN ENERGÉTICA  
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN  
EDIFICIOS APLICADO A UN CAMPUS  
UNIVERSITARIO EN COLOMBIA**

Presentada por Rosaura del Pilar Castrillón  
Mendoza, para optar al grado de  
Doctor/a por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:  
D. Francisco Javier Rey Martínez  
D. Paúl Andrés Manrique



# Dedicatoria

## A mis tres amores

Antonio Puente Castrillòn mi hijo, por su hermosa carcajada que irrumpe cualquier momento de tensión para robar la atención y hacerte caer en cuenta lo maravilloso que resulta vivir en familia.

Esteban Puente Castrillòn mi hijo, por su maravillosa curiosidad que te invita siempre a estar en constante alerta para seguir investigando.

Orlando Puente mí esposo, por su entrañable compromiso de padre y compañero de vida, siempre atento y respetuoso a remar hacia objetivos comunes de familia.

# Agradecimientos

A mi familia por su comprensión y acompañamiento durante todo este proceso, por respetar mis decisiones y a mis hijos por quitarles parte de su tiempo e incluirlos en esta aventura sin poder siquiera opinar pero con el cariño y comprensión para acompañarme.

A D. Francisco Javier Rey por su dedicación y tiempo de asesoría durante todo el proceso, por ánimo y paciencia y por enseñarme a valorar cada conocimiento y convertirlo en algo útil para los objetivos propuestos, por compartir de manera generosa su conocimiento y ponerlo al servicio de esta investigación y por su amistad.

Al resto del departamento de Ingeniería Energética D. Eloy Velasco Gómez, D. Julio Francisco San José Alonso y Dña. Ana Tejero González, por su hospitalidad, ánimo y constantes palabras de apoyo.

D. Javier M<sup>a</sup> Rey Hernández por su apoyo incondicional y su constante reconocimiento al trabajo realizado en esta investigación, por compartir su experiencia.

A la profesora María de Jesús Hernández, por ser el complemento perfecto entre hospitalidad, gastronomía y cultura y sobre todo por su desinteresado acompañamiento y amistad para quienes estamos de paso en este país.

A D. Paul Andrés Manrique por su asesoría y aporte en el transcurso de esta investigación.

A mis estudiantes del semillero de investigación en Gestión y Eficiencia energética los hoy Ingenieros Álvaro José Colonia, Paul Andrés Wallens por su colaboración. De manera muy especial a la Ingeniera Andrea María Quintero por su valioso e incondicional acompañamiento a lo largo de estos años, por su interlocución respetuosa, oportuna para cuestionar y hacerte reflexionar y por darme siempre el mejor de los ánimos, por su generosidad y amistad.

A la vicerrectoría Académica, al doctor Álvaro del Campo Parra, Al Centro de Desarrollo Académico, a la doctora Sonia Cadena, A la facultad de Ingeniería Dr. Freddy Naranjo Pérez por su apoyo incondicional y permanente confianza. A mis compañeros y grupo GIEN.

# Resumen

Los contenidos de la memoria de la presente tesis doctoral, estructurados a través de diferentes capítulos son:

Revisión del estado actual de la eficiencia energética a nivel mundial haciendo especial énfasis en la situación de Latinoamérica, específicamente en Colombia. Si bien, se encuentran algunas respuestas favorables en torno al adelanto de estrategias para apostarle al cumplimiento de los ODS, específicamente lo relacionado con el sector de edificaciones donde se destaca una participación activa en torno al desarrollo de políticas enmarcadas en la planificación energética del país, los ministerios y/ u organizaciones relacionadas con la construcción ; estos elementos de alguna manera permiten reflexionar y/o identificar algunos vacíos y la necesidad de trabajar estratégicamente hacia directrices que permitan contar con lineamientos claros respecto a temas de edificaciones sostenibles con disposiciones que permitan contar con códigos de construcción sostenibles, certificaciones propias y reglamentación clara hacia la operación eficiente de los edificios durante su ciclo de vida. Lo anterior, favorece la reciente hoja de ruta que ha establecido la IEA para los países de Latinoamérica.

Realización de un análisis de las relevancias de un sistema de gestión energética SGE y de las herramientas y técnicas utilizadas para el desarrollo de los procesos de planificación energética y algunos de los componentes más significativos. Se destacan aspectos relacionados con la forma de aplicar estos conceptos a las edificaciones y enfatizando en el cumplimiento específico de las normas de apoyo a los sistemas de gestión en pro del mejoramiento de la eficiencia energética en edificaciones.

Presentación de las bases teóricas y se propone una metodología para la aplicación y desarrollo de los 4 modelos para la estimación de líneas bases e indicadores. En este sentido, se desarrolla el uso de los modelos basados en series de tiempos para edificaciones que solo utilizan la variable consumo , modelos de regresión univariable y multivariable, cuando existan recursos de medición de otros parámetros adicionales al consumo energético y se analiza el uso de la simulación dinámica a través de Design Builder, como un recurso importante para establecer condiciones iniciales en la formulación de líneas bases e indicadores para diseños nuevos y cuando existan recursos de información arquitectónica y de monitorización en los existentes. De tal forma se presentan diferentes alternativas al usuario de una edificación con respecto a qué modelo usar con referencia a la selección de los límites y el periodo de reporte de la información, la verificación de la fuente y calidad de los datos, así como la revisión de las variables relevantes de mayor afectación al consumo energético, el análisis muestral y el patrón de comportamiento de los datos. Todo lo anterior, validado con un análisis estadístico realizado en software R estudio.

Análisis y conclusiones detallado de los efectos en la estimación de ahorros energéticos de los modelos propuestos para evaluar la línea base e indicadores, mostrando que la selección de uno u otro implica la sobreestimación o subestimación en el pronóstico de consumo de energía que afecta los valores de ahorros estimados en un análisis de eficiencia energética y estudio medioambiental.

Los análisis anteriores se soportan sobre medidas experimentales del campus universitario y de un edificio de aulas 4, donde se analizaron los datos de monitorización de los años 2017 a 2019, utilizando herramientas de gestión energética. Se seleccionó un edificio de aulas para realizar la simulación dinámica en Design Builder, la misma conto con datos de monitorización de sensores ubicados dentro de este espacio para medir consumos de equipo de uso final y condiciones climáticas, como referencia para calibrar el modelo de simulación que no solo permitió encontrar algunas MAES acorde a las condiciones de ubicación geográfica climáticas del campus, además nos permitió utilizar la simulación dinámica como herramienta adicional para establecer líneas bases. Finalmente, se estableció un análisis energético del caso práctico mediante indicadores energéticos, ambientales, económicos, de gestión energética y caracterización de un edificio casi nulo nZEB como análisis para las condiciones de Colombia.

# Abstract

The Doctoral Thesis is structured according to the following steps:

World Energy Efficiency Review, focusing on the situation in Latin America, mainly in Colombia. Although there are some favorable responses regarding the advancement of strategies to achieve the SDGs, specifically related to the building sector, where an active participation in the development of policies framed in the energy development of the country, the ministries and organizations related to the building sector is highlighted.

These elements somehow allow reflecting and identifying some gaps, or the need to work strategically towards guidelines that allow having clear guidelines regarding sustainable building issues with regulations that allow having sustainable building standards, certifications and clear regulations towards the efficient operation of buildings during their life cycle. This is in line with the recent roadmap established by the IEA for Latin American countries.

An analysis of the relevance of an Energy Management system (EMS), the tools and techniques used for the development of energy planning processes, as well as some of the most significant components.

Aspects related to how to apply these concepts to buildings are highlighted, focusing on the specific compliance with the standards that support management systems for the improvement of energy efficiency in buildings.

Theoretical bases are discussed, providing a methodology for the application and development of the 4 models for the estimation of baselines and indicators. In this sense, the use of models based on time series is developed for buildings that only use the consumption variable, univariate and multivariate regression models, when there are resources for measuring other parameters, besides energy consumption.

The use of dynamic simulation through Design Builder is analyzed as an important resource to establish initial conditions in the formulation of baselines and indicators for new designs and when there are architectural information and energy monitoring resources in the existing ones. In this way, different alternatives have been shown to the building user, regarding which model to use with reference to the selection of the limits and the reporting period of the information, the verification of the source and quality of the data, as well as the review of the relevant variables with the greatest impact on energy consumption, the sample analysis and the performance pattern of the data.

All of the above, validated with a statistical analysis performed in R Studio software.

Detailed analysis and results of the effects on the estimation of energy savings of the proposed models to evaluate the baseline and indicators. It is shown that the choice of one or the other, leads to an overestimation or underestimation in the energy consumption forecast that affects the estimated savings values in an energy efficiency analysis and environmental study. The above analyses are supported on experimental measurements of the university campus, and of a classroom building 4, where monitoring data from the years 2017 to 2019 were

analyzed using energy management tools. A classroom building was selected to perform the dynamic simulation in Design builder.

The simulation used monitoring data from sensors located within this space to measure end-use equipment consumption and climatic conditions, as a reference to calibrate the simulation model that not only allowed us to find some Energy Saving Measures (ESM) according to the weather data at the campus location, but also allowed us to use the dynamic simulation as an additional tool to set baselines.

Finally, an energy analysis of the case study has been established by means of energy, environmental, economic, energy management indicators, and characterization regarding a near-zero building nZEB, as an analysis for the Colombian scenario.

# ÍNDICE

<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
<b>ESTRUCTURA DE LA TESIS .....</b>	<b>24</b>
<b>CAPÍTULO 1: ENERGÉTICA EDIFICATORIA .....</b>	<b>26</b>
1.1.    CONSUMO DE ENERGÍA Y PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL.....	26
1.2.    SITUACIÓN ENERGÉTICA DE LAS EDIFICACIONES.....	32
1.3.    IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LAS EDIFICACIONES.....	37
1.3.1. <i>Contexto de las edificaciones en china</i> .....	39
1.3.2. <i>Contexto de las edificaciones en Estados Unidos</i> .....	40
1.3.3. <i>Contexto de las edificaciones en Europa (EU)</i> .....	41
1.3.4. <i>Contexto de las edificaciones en Latinoamérica y el Caribe</i> .....	43
1.3.5. <i>Contexto de las edificaciones en Colombia</i> .....	47
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>61</b>
<b>CAPÍTULO 2: SISTEMA DE GESTIÓN ENERGÉTICA. HERRAMIENTAS DE LA PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA .....</b>	<b>64</b>
2.1.    IMPORTANCIA DE UN SISTEMA DE GESTIÓN ENERGÉTICA SGEN .....	66
2.2.    DESARROLLO DE UN SGEN Y DE LA NORMA ISO 50001 .....	67
2.3.    ESTRUCTURA DE LOS SGEN SEGÚN LA NORMA ISO 50001.....	70
2.3.1. <i>Normas relacionadas con la familia de normas de la ISO 50001</i> .....	77
2.3.2. <i>Planificación Energética</i> .....	78
2.4.    HERRAMIENTAS USADAS PARA LA GESTIÓN ENERGÉTICA .....	80
2.4.1. <i>Herramientas usadas para el análisis de los usos y consumos de energía</i> .....	81
2.4.2. <i>Herramientas usadas para identificar las áreas de uso significativo de la energía (USE)</i> .....	85
2.4.3. <i>Herramientas usadas para la identificación y priorización de oportunidades para el mejoramiento del desempeño energético</i> .....	88
2.5.    LÍNEA DE BASE ENERGÉTICA .....	92
2.5.1. <i>Etapas para el establecimiento de una línea de base energética</i> .....	94
2.6.    INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO (IDEN).....	98
2.6.1. <i>Selección de indicadores de desempeño energético</i> .....	99
2.6.2. <i>Indicadores de Desempeño Energético en Edificaciones</i> .....	103
2.6.2.1. <i>Indicadores de Gestión Energética</i> .....	107
2.6.2.2. <i>Indicadores de Impacto Ambiental</i> .....	110
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>114</b>
<b>CAPÍTULO 3: MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LÍNEAS BASES.....</b>	<b>117</b>
3.1.    MODELO DE PRONÓSTICO BASADO EN SERIES DE TIEMPO .....	125
3.1.1. <i>Modelo Ingenuo</i> .....	128
3.1.2. <i>Promedios Móviles</i> .....	128
3.1.3. <i>Suavización Exponencial Simple</i> .....	128
3.1.4. <i>Suavización Exponencial Holt</i> .....	129
3.1.5. <i>Suavización Exponencial Winters</i> .....	129
3.1.6. <i>Descomposición de Series</i> .....	130
3.2.    MODELO DE REGRESIÓN.....	132
3.3.    MODELO DE SIMULACIÓN .....	137

<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>140</b>
<b>CAPÍTULO 4: CASO ESTUDIO ENERGÉTICO DEL CAMPUS UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE, UAO ..</b>	<b>142</b>
4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE.....	142
4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN INSTALADOS .....	147
4.2.1. <i>Equipos de medición</i> .....	150
4.3. ANÁLISIS DE LOS USOS Y CONSUMOS DE LA ENERGÍA EN EL CAMPUS.....	161
4.3.1. <i>Gráficos de tendencia de consumo por tipo de energético</i> .....	161
4.3.2. <i>Análisis del uso y consumo de la energía eléctrica y fotovoltaica</i> .....	164
4.3.3. <i>Análisis del Consumo de energía eléctrica global de la UAO en los años 2014 – 2019</i> .....	168
4.3.4. <i>Análisis de consumo de energía eléctrica del campus UAO en una semana</i> .....	169
4.3.5. <i>Análisis del uso y consumo de la energía eléctrica por subestaciones</i> .....	171
4.3.6. <i>Matriz Energética del Campus</i> .....	172
4.3.7. <i>Análisis del Consumo de Energía de las Aulas</i> .....	173
4.3.8. <i>Análisis de los usos significativos del Campus</i> .....	177
<b>CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y ESTUDIO ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE AULAS 4 DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE .....</b>	<b>181</b>
5.1. SITUACIÓN .....	181
5.2. DESCRIPCIÓN GENERAL Y USO .....	182
5.3. DISTRIBUCIÓN .....	185
5.4. MATERIALES .....	189
5.5. OCUPACIÓN.....	190
5.6. CONDICIONES DE DISEÑO EXTERIORES E INTERIORES.....	191
5.7. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES .....	193
5.7.1. <i>Consumo de Energía Eléctrica del Edificio</i> .....	195
5.8. SISTEMAS Y EQUIPOS DEL EDIFICIO .....	197
5.8.1. <i>Sistema de Aire Acondicionado</i> .....	197
5.8.2. <i>Sistemas de Iluminación</i> .....	198
5.8.3. <i>Equipos Ofimáticos</i> .....	200
5.8.4. <i>Régimen de Ocupación y Usos</i> .....	202
5.9. COSTE ECONÓMICO DEL CONSUMO ENERGÉTICO E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....	202
5.10. REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA DEL EDIFICIO EN DESIGNBUILDER .....	203
5.11. COMPARACIÓN DE LOS CONSUMOS ENERGÉTICOS MEDIDOS Y SIMULADOS.....	209
5.11.1. <i>Consumo Total de Energía</i> .....	209
5.11.2. <i>Consumo de Energía por Usos</i> .....	211
5.11.3. <i>Impacto Medioambiental – Emisiones de CO<sub>2</sub></i> .....	213
<b>CAPÍTULO 6: PROPUESTAS DE MAE’S PARA EL EDIFICIO DE AULAS 4 MEDIANTE SIMULACIÓN ENERGÉTICA</b>	<b>214</b>
6.1. MAE I – SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO MÁS EFICIENTE. ....	214
6.1.1. <i>Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE I</i> .....	221
6.2. MAE II – REDISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN INTERIOR. ....	222
6.3. MAE III – FILTROS SOLARES Y SOMBRAS – LAMAS .....	229
6.3.1. <i>Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE III</i> ....	233
6.4. MAE IV – FILTROS SOLARES Y SOMBRAS – VIDRIO ELECTROCRÓMICO .....	234
6.4.1. <i>Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE IV</i> ....	237
6.5. MAE V – FILTROS SOLARES Y SOMBRAS – VOLADIZOS .....	238
6.5.1. <i>Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE V</i> ....	242
6.6. MAE VI – FILTROS SOLARES Y SOMBRAS – PERSIANAS REFLECTIVAS .....	243
6.6.1. <i>Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE VI</i> ....	246

6.7.	MAE VII – FILTROS SOLARES Y SOMBRAS – PELICULAS PROTECTORAS .....	247
6.7.1.	<i>Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE VII ...</i>	250
6.8.	MAE VIII – IMPLEMENTACIÓN DE TODAS LAS MAE’S PROPUESTAS.....	251
6.8.1.	<i>Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE VIII ..</i>	254
	PROPUESTA DE ALMACENAMIENTO PARA EL SISTEMA DE ILUMINACIÓN .....	256
<b>CAPÍTULO 7: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LÍNEAS BASES E INDICADORES .....</b>		<b>258</b>
7.1.	METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE MODELOS DE LINEA BASE E INDICADORES.....	258
7.1.1.	<i>Seleccionar límite de instalación - Periodo de reporte de la línea LBE.....</i>	260
7.1.2.	<i>Verificar la fuente y calidad de los datos para cuantificar el consumo de energía y las variables relevantes.....</i>	260
7.1.3.	<i>Revisar las variables relevantes que afectan el consumo y los factores estáticos durante el periodo de evaluación .....</i>	261
7.1.4.	<i>Análisis de la información muestral y patrón de comportamiento de los datos a analizar.....</i>	262
7.1.5.	<i>Definir un modelo para su utilización .....</i>	263
7.2.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA PROPUESTA AL EDIFICIO DE AULAS DE LA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE. ....	264
7.2.1.	<i>Modelos de Series de Tiempo .....</i>	267
7.2.2.	<i>Modelos de Regresión Lineal y Multivariable .....</i>	279
7.2.3.	<i>Ajuste de bondad de los modelos de regresión lineal .....</i>	295
7.2.3.	<i>Modelo de Simulación .....</i>	322
7.3.	INDICADORES ENERGÉTICOS Y AMBIENTALES APLICADOS A EDIFICIOS .....	322
7.3.1.	<i>Indicador de Intensidad Energética IE. ....</i>	324
7.3.2.	<i>Indicador IE referido al consumo de Energía primaria Edificios nZEB.....</i>	329
7.3.3.	<i>Indicador del Impacto Ambiental – Emisiones de CO2 .....</i>	334
7.3.4.	<i>Indicadores de Gestión Energética .....</i>	339
7.4.	EFECTOS DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LÍNEA BASE E INDICADORES SOBRE LA ESTIMACIÓN DE AHORROS ENERGÉTICOS.....	345
7.4.1.	<i>Análisis del modelo 2019 considerando datos diarios, semanales y mensuales .....</i>	349
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>356</b>
<b>TRABAJOS FUTUROS .....</b>		<b>359</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Población urbana y rural del mundo, 1950-2050.....	26
Figura 2. Cambio en la demanda de energía primaria. Fuente: World Energy Outlook 2017 [4].....	27
Figura 3. Emisiones de CO2 en diferentes regiones 2014-2040 Fuente: World Energy Outlook 2017 [4] .....	27
Figura 4. Generación mundial de energía eléctrica y emisiones de CO2 asociadas. ....	28
Figura 5. Consumo de Energía por regiones. Fuente: BP - Outlook for Energy 2017 [5] .....	28
Figura 6. Fuentes de Energía Primaria – Matriz Energética Mundial.....	29
Figura 7. Consumo de energía primaria a 2014 Fuente: Energy Efficiency Policies 2016. World Energy Council [6].....	29
Figura 8. Medidas para pasar de un 6DS al 2DS. Fuente: Energy Technology Perspectives 2016 IEA [7]. .....	30
Figura 9. Reducción acumulada de emisiones de CO2 por sector y tecnología horizonte 2050. Fuente: Energy Technology Perspectives 2016 IEA [7].....	31
Figura 10. Impacto de la Eficiencia en el consumo final de energía a nivel global en el 2DS.....	31
Figura 11. Reducciones globales de Co2 entre 6DS y 2DS por sector. Fuente: Energy Technology Perspectives 2017, IEA.....	33
Figura 12. Uso final de energía por m2 a nivel mundial. Fuente: UN Environment and International Energy Agency [8].....	34
Figura 13. Consumo global de Energía en edificios. Fuente: UN Environment and International Energy Agency [8].....	34
Figura 14. Crecimiento del parque edificatorio a 2060. ....	35
Figura 15. Códigos de energía por País Fuente: Building Energy Efficiency Policies [9] .....	35
Figura 16. Proporción del consumo de energía final 2016. Fuente: UN Environment and International Energy Agency [8].....	36
Figura 17. Proporción de emisiones de CO2 2016. Fuente: UN Environment and International Energy Agency [8].....	36
Figura 18. Consumo de energía del sector de edificios, intensidad energética y superficie (2010-16) Fuente: IEA – Energy Efficiency 2017 .....	37
Figura 19. Proporción del progreso de la política de eficiencia de la calefacción y la refrigeración espaciales desde el año 2000 a partir de la construcción de sobres frente a los equipos HVAC Fuente: IEA – Energy Efficiency 2017 .....	37
Figura 20. Proyecciones de consumo final de energía de edificios para las principales regiones y países, 2012-50.....	39
Figura 21. Consumo de energía por fuente para el año 2017 Fuente: IEA, 2018 .....	40
Figura 22. Consumo de energía por sector para el 2017 Fuente: IEA, 2018.....	40
Figura 23. Energía final demandada en 2017 países de la Unión Europea Fuente: Comisión Europea, 2017 [19].....	42
Figura 24. Participación del Consumo Final por Energético y Sectores: América Latina y El Caribe – 2017 Fuente: sieLAC-OLADE[20] .....	43
Figura 25. Porcentaje de consumo final y emisiones de GEI en las edificaciones en Latinoamérica ...	44
Figura 26. Antecedentes de la política nacional de edificaciones sostenibles Fuente: Dirección de Desarrollo Urbano DNP .....	49

Figura 27. Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionadas con las edificaciones sostenibles Fuente: Dirección de Desarrollo Urbano DNP, basado en la ODS .....	54
Figura 28. Índice del PIB total y construcción 2017 Fuente: Cálculos DNP con base en cuentas trimestrales DANE .....	56
Figura 29. Emisiones directas de GEI por sector 2016 Fuente: Inventario nacional de GEI – Colombia [37].....	56
Figura 30. Consumo Nacional de Energía Fuente: Ministerio de Minas y energía, y UPME - PROURE 2017.....	57
Figura 31. Consumo de energía eléctrica, gas natural y GLP en el Sector Terciario Fuente: UPME – PAI PROURE, 2016 .....	58
Figura 32. Usos de la electricidad en el Sector Terciario .....	58
Figura 33. Desarrollo de las normas de un SGEN a nivel mundial.....	68
Figura 34. Ciclo de Mejora Continua PHVA norma ISO 50001:2018.....	71
Figura 35. Cambios principales norma ISO 50001:2018 con respecto a la ISO 50001:2011.....	72
Figura 36. Términos y definiciones de la nueva versión de la ISO 50001 :2018 .....	73
Figura 37. Familia de normas de ISO5000 que aportan a la implementación de los SGEN .....	77
Figura 38. Proceso de planificación Energética.....	79
Figura 39. Herramientas usadas para la revisión energética .....	80
Figura 40. Proceso de auditoria energética adaptado según requisitos ISO50002 .....	90
Figura 41. Concepto de periodo base y periodo de reporte para IDE .....	93
Figura 42. Pasos para el establecimiento de una línea de base energética.....	94
Figura 43. Lo que se quiere conseguir con una LBE .....	98
Figura 44. Aspectos para tener en cuenta en el establecimiento de indicadores de desempeño energético.....	99
Figura 45. Errores comunes en la selección del IDEn.....	103
Figura 46. Gráfico ilustrativo del indicador de Eficiencia Energética.....	108
Figura 47. Gráfica seguimiento Indicador de Eficiencia IEE .....	108
Figura 48. Diagrama para ejemplificar el proceso para desarrollar, usar y actualizar IDE y LBE según la norma ISO 50006. Tomado y adaptado de la norma ISO 50006 versión 2016 .....	124
Figura 49. Etapas de un pronóstico.....	126
Figura 50. Vista superior campus universitario.....	142
Figura 51. Vista frontal y entrada peatonal principal del campus universitario .....	143
Figura 52. Diagrama energético campus UAO .....	145
Figura 53. Sistema de medición de energía eléctrica instalado en la UAO.....	147
Figura 54. Sistema de medición de energía eléctrica instalado en la UAO.....	148
Figura 55. Vista superior del campus universitario y sistemas marcación de los SSFV del campus ...	149
Figura 56. Consumo de energía total y por áreas de la UAO. ....	151
Figura 57. Energía activa consumida y subestaciones del campus. ....	151
Figura 58. Parámetros eléctricos monitorizados de Aulas 4.....	152
Figura 59. Diagrama unifilar general de medición UAO.....	152
Figura 60. Parámetros medidor de Frontera .....	152
Figura 61. Diagrama unifilar subestación 1.....	152
Figura 62. Parámetros medidor subestación 1 .....	152
Figura 63 Diagrama unifilar subestación 2.....	153
Figura 64. Parámetros medidor subestación 2 .....	153
Figura 65 Diagrama unifilar subestación 3.....	153

Figura 66. Parámetros medidor subestación 3 .....	153
Figura 67. Parámetros medidor Edificio de Aulas 4 .....	153
Figura 68. Estación meteorológica Davis Vantage pro 2.....	155
Figura 69. Diagrama de condensación Planta de agua fría Edificio Central. Metasys .....	155
Figura 70. Diagrama planta de agua fría – Enfriadora de agua Edificio central. Metasys .....	156
Figura 71. Diagrama planta de agua fría con información desplegada– Enfriadora de agua Edificio central. Metasys .....	156
Figura 72. Curvas de comportamiento y parámetros monitorizados en planta de agua fría .....	156
Figura 73. Tendencia de consumo por tipo de energético año 2016 .....	163
Figura 74. Tendencia de consumo por tipo de energético año 2017 .....	163
Figura 75. Tendencia de consumo por tipo de energético año 2018 .....	163
Figura 76. Tendencia de consumo por tipo de energético año 2019 .....	164
Figura 77. Tendencia de generación sistema fotovoltaico por area año 2017 .....	165
Figura 78. Tendencia de generación sistema fotovoltaico por area año 2018.....	166
Figura 79. Tendencia de consumo de energía eléctrica y fotovoltaica 2016.....	166
Figura 80. Tendencia de consumo de energía eléctrica y fotovoltaica 2017.....	167
Figura 81. Distribución de la Generación de Energía SSFV 2017 .....	167
Figura 82. Tendencia de consumo de energía eléctrica y fotovoltaica 2018.....	167
Figura 83. Distribución de la Generación de Energía SFV 2018 .....	168
Figura 84. Tendencia de consumo de energía eléctrica mensual desde el año 2014-2019 .....	169
Figura 85. Análisis consumo de energía eléctrica global UAO en una semana de marzo 2017.....	170
Figura 86. Análisis consumo de energía eléctrica global UAO en una semana de junio 2017.....	170
Figura 87. Análisis consumo de energía eléctrica global UAO en una semana de marzo 2018.....	170
Figura 88. Análisis consumo de energía eléctrica global UAO en una semana de junio 2018.....	171
Figura 89. Participación de subestaciones en el consumo de energía eléctrica .....	171
Figura 90. Matrices de consumo de energía años 2016 – 2018.....	172
Figura 91. Perfil de consumo de energía en un día de la subestación 3 .....	173
Figura 92. Perfil de consumo semanal subestación 3 .....	173
Figura 93. matriz de consumo de energía eléctrica de aulas 2016 – 2019 .....	174
Figura 94. tendencia de consumo de energía eléctrica aulas por jornada-Años 2016 y 2017 .....	176
Figura 95. Pareto uso significativo de energía eléctrica UAO .....	177
Figura 96. Pareto general de consumo de energía eléctrica UAO .....	178
Figura 97. Pareto de consumo de energía eléctrica por usos significativos en edificio central UAO. 178	
Figura 98. Pareto de consumo de energía eléctrica por usos significativos en bienestar universitario UAO .....	179
Figura 99. Pareto consumo de energía eléctrica por usos significativos aulas 1 .....	179
Figura 100. Pareto consumo de energía eléctrica por usos significativos aulas 2 .....	179
Figura 101. Pareto consumo de energía eléctrica por usos significativos aulas 3 .....	180
Figura 102. Pareto consumo de energía eléctrica por usos significativos aulas 4 .....	180
Figura 103. Ubicación Campus Universitario Universidad Autónoma de Occidente.....	181
Figura 104. Localización del edificio de aulas 4.....	182
Figura 105. Fachada este del edificio de aulas 4.....	183
Figura 106. Fachada sureste del edificio de aulas 4.....	184
Figura 107. Fachada escaleras del edificio.....	184
Figura 108. Fachada sur del edificio de aulas 4.....	184
Figura 109. Fachada norte del edificio de aulas 4.....	184

Figura 110. Primer piso. ....	185
Figura 111. Segundo piso. ....	186
Figura 112. Tercer piso. ....	187
Figura 113. Cuarto piso. ....	188
Figura 114. Condiciones de diseño exteriores anuales. ....	191
Figura 115. Condiciones de diseño interiores. ....	192
Figura 116. Condiciones de diseño exteriores sub-horario. ....	192
Figura 117. SSFV instalado en el Edificio de aulas 4. ....	194
Figura 118. Diagrama Unifilar de subestación 2 con ubicación del medidor del aula 4. ....	195
Figura 119. Consumo de Energía Eléctrico anual. ....	196
Figura 120. Histórico de consumo de energía eléctrica mensual 2016 – 2019. ....	196
Figura 121. Plantilla de diseño piso 1. ....	203
Figura 122. Plantilla de diseño piso 2. ....	204
Figura 123. Plantilla de diseño piso 3. ....	204
Figura 124. Plantilla de diseño piso 4. ....	204
Figura 125. Plantilla de diseño techo. ....	205
Figura 126. Piso 1. ....	205
Figura 127. Piso 2. ....	205
Figura 128. Piso 3. ....	205
Figura 129. Piso 4. ....	206
Figura 130. Techo. ....	206
Figura 131. Vista norte del edificio. ....	206
Figura 132. Vista sur del edificio. ....	206
Figura 133. Vista oeste del edificio. ....	207
Figura 134. Vista este del edificio. ....	207
Figura 135. Vista de planta del edificio. ....	207
Figura 136. Vista suroeste del edificio. ....	207
Figura 137. Vista noreste del edificio. ....	208
Figura 138. Vista suroeste del edificio con diagrama solar. ....	208
Figura 139. Vista noroeste del edificio con diagrama solar. ....	208
Figura 140. Consumo energético anual simulado y real. ....	210
Figura 141. Distribución de consumo energético mensual desglosado por uso final. ....	212
Figura 142. Distribución porcentual de consumo energético por uso final. ....	212
Figura 143. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual. ....	213
Figura 144. Emisiones de CO <sub>2</sub> mensual para el edificio. ....	213
Figura 145. Distribución de consumo energético anual. ....	218
Figura 146. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE I. ....	219
Figura 147. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE I. ....	219
Figura 148. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual. ....	220
Figura 149. Emisiones de CO <sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE I. ....	221
Figura 150. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con MAE I. ....	221
Figura 151. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con MAE I. ....	222
Figura 152. Emisiones de CO <sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE II. ....	228
Figura 153. Vista norte del edificio con implementación de lamas. ....	229
Figura 154. Vista sur del edificio con implementación de lamas. ....	229
Figura 155. Vista este del edificio con implementación de lamas. ....	229

Figura 156. Vista oeste del Edificio con implementación de lamas .....	229
Figura 157. Distribución de consumo energético anual edificio con MAE III.....	230
Figura 158. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE III.....	231
Figura 159. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE III .....	231
Figura 160. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual con MAE III. ....	232
Figura 161. Emisiones de CO <sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE III .....	232
Figura 161. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con MAE III.....	233
Figura 162. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con MAE III.....	233
Figura 164. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE IV .....	235
Figura 165. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE I .....	235
Figura 166. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual. ....	236
Figura 167. Emisiones de CO <sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE IV .....	236
Figura 168. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con MAE IV.....	237
Figura 169. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con MAE IV .....	237
Figura 170. Vista norte del edificio con implementación de voladizos .....	238
Figura 171. Vista sur del edificio con implementación de voladizos .....	238
Figura 172. Vista oeste del edificio con implementación de voladizos .....	238
Figura 173. Vista este del edificio con implementación de voladizos.....	238
Figura 174. Distribución de consumo energético anual con MAE V implementada.....	239
Figura 175. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE V .....	240
Figura 176. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE V .....	240
Figura 177. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual implementando MAE V. .....	241
Figura 178. Emisiones de CO <sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE V .....	241
Figura 179. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con la MAE V.....	242
Figura 180. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con la MAE V.....	242
Figura 181. Distribución de consumo energético anual con MAE VI.....	243
Figura 182. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE VI .....	244
Figura 183. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE VI.....	244
Figura 184. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual. ....	245
Figura 185. Emisiones de CO <sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE VI .....	245
Figura 186. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con MAE VI.....	246
Figura 187. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con MAE VI .....	246
Figura 188. Distribución de consumo energético anual con MAE VII. ....	247
Figura 189. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE VII .....	248
Figura 190. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE VII.....	248
Figura 191. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual. ....	249
Figura 192. Emisiones de CO <sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE VII .....	249
Figura 193. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con MAE VII.....	250
Figura 194. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con MAE VII .....	250
Figura 195. Distribución de consumo energético anual. ....	251
Figura 196. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE VIII .....	252
Figura 197. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE VIII.....	253
Figura 198. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual. ....	253
Figura 198. Emisiones de CO <sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE VIII .....	254
Figura 200. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con las 6 MAE's e iluminación. ...	254

Figura 201. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con 6 MAE's e iluminación .....	255
Figura 202. Victron OpZs Solar 1830 Ah.....	257
Figura 203. Metodología para la selección de modelos de líneas bases e indicadores.....	259
Figura 204. Comportamiento histórico del consumo mensual de energía eléctrica del edificio aulas 4 .....	265
Figura 205. Grafica comportamiento estacional del edificio de aulas 4 .....	266
Figura 206. Grafica consumo anual del edificio de aulas 4.....	266
Figura 207. Promedio del consumo mensual histórico de energía Eléctrica (2016 – 2018).....	267
Figura 208. Promedio ponderado del consumo mensual histórico de energía Eléctrica (2016 – 2018) .....	268
Figura 209. Línea base – Índices de estacionalidad .....	269
Figura 210. Línea base – Media móvil de orden 12 .....	271
Figura 211. Consumo semanal de energía eléctrica para el año 2016 .....	271
Figura 212. Consumo semanal de energía eléctrica para el año 2016 .....	271
Figura 213. Consumo semanal de energía eléctrica para el año 2016 .....	272
Figura 214. Consumo semanal de energía para el periodo de vacaciones (Años 2016 – 2018).....	272
Figura 215. Consumo semanal de energía para el periodo de invierno (Años 2016 – 2018).....	273
Figura 216. Consumo semanal de energía para el periodo de verano (Años 2016 – 2018).....	273
Figura 217. Consumo semanal de energía para el primer semestre (Años 2016 – 2018) .....	273
Figura 218. Consumo semanal de energía para el segundo semestre (Años 2016 – 2018) .....	273
Figura 219. Consumo promedio según programación académica.....	274
Figura 220. Línea base – consumo promedio según programación académica .....	274
Figura 221. Consumo de energía diario para el año 2018 .....	275
Figura 222. Consumo de energía diario promedio por distintos periodos del 2018, .....	276
Figura 223. Pronóstico diario del consumo de energía eléctrica considerando el consumo promedio diario de 2018.....	276
Figura 224. Pronóstico semanal del consumo de energía eléctrica considerando el consumo promedio diario de 2018.....	277
Figura 225. Línea base – consumo promedio según programación académica .....	277
Figura 226. Resultados obtenidos con los diferentes métodos de pronóstico utilizados para obtener una línea de base energética 2019 de Aulas 4-UAO .....	278
Figura 227. Correlación entre variables – Software R Studio .....	280
Figura 228. Correlación entre el Consumo de energía final Total y las variables independientes – Software R Studio .....	280
Figura 229. Capacidad de pronóstico modelo univariable.....	296
Figura 230. Capacidad de pronóstico modelo multivariable .....	297
Figura 231. Distribución del tipo de semana para el año 2018 .....	299
Figura 232. Indicadores de Eficiencia Energética del consumo de energía eléctrica total del Campus UAO de los años 2017 – 2019.....	326
Figura 233. Indicadores de Eficiencia Energética de Generación FV del Campus UAO de los años 2017 – 2019 .....	326
Figura 234. Indicadores de Eficiencia Energética del consumo de energía eléctrica total del Edificio de Aulas 4 de los años 2017 – 2019 .....	328
Figura 235. Indicadores de Eficiencia Energética de la generación de Energía Solar FV en el Edificio de Aulas 4 de los años 2017 – 2019 .....	328
Figura 236. Etapas de Energía primaria a Energía Útil .....	329

Figura 237. Emisiones anuales de CO2 de los años 2017 – 2019 campus UAO.....	335
Figura 238. Emisiones mensuales de CO2 de los años 2017 – 2019 campus UAO .....	336
Figura 239. Indicador Ambiental mensual de los años 2017 – 2019 campus UAO .....	336
Figura 240. Emisiones anuales de CO2 de los años 2017 – 2019 campus UAO.....	337
Figura 241. Emisiones mensuales de CO2 de los años 2017 – 2019 campus UAO .....	338
Figura 242. Indicador Ambiental mensual de los años 2017 – 2019 campus UAO.....	338
Figura 243. Indicador de Eficiencia Energética anual – Edificio de Aulas 4 .....	340
Figura 244. Indicador de Eficiencia Energética IEE del edificio de aulas 4 años 2017 – 2019 .....	341
Figura 245. Indicador de Eficiencia Energética IEE del edificio de aulas 4 años 2017 y 2019.....	341
Figura 246. Indicador de Sumas Acumulativas CUSUM del edificio de aulas 4 años 2017 – 2019.....	343
Figura 247. Indicador de Sumas Acumulativas CUSUM del edificio de aulas 4 años 2017 y 2019 .....	344
Figura 248. Indicador de Eficiencia Energética mensual de los diferentes modelos .....	347
Figura 249. Indicador CUSUM de los diferentes modelos .....	348
Figura 250. Indicador de Eficiencia Energética de los modelos de LBE diaria, semanal, mensual y propuesta del 2019.....	350
Figura 251. Indicador CUSUM de los modelos de LBE diaria, semanal, mensual y propuesta del 2019 .....	351

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Objetivos Planteados por la IEA .....	30
Tabla 2. Evolución de la aplicación de la norma ISO50001 desde su publicación en 2011 .....	69
Tabla 3. Herramientas usadas para el análisis de uso y consumo de energía .....	81
Tabla 4. Herramientas usadas para la identificación de USE's .....	86
Tabla 5. Herramientas para la identificación y priorización de oportunidades para el mejoramiento del desempeño energético.....	89
Tabla 6. Etapas principales de una auditoria energética .....	91
Tabla 7. Tipo de LBE .....	93
Tabla 8. Período de base para la estimación de una LBE.....	96
Tabla 9. Selección de un método para la estimación de la LBE de acuerdo con el tipo de instalación	97
Tabla 10. Indicadores Típicos, ventajas y desventajas .....	101
Tabla 11. Indicadores para la gestión energética .....	104
Tabla 12. Clasificación de KPI o Indicadores energéticos para edificios .....	105
Tabla 13. Tipos de indicadores y líneas base propuesto por la norma ISO50006.....	119
Tabla 14. Métodos de pronóstico .....	126
Tabla 15. Componentes de una serie de tiempo .....	126
Tabla 16. Métodos de series de tiempo y características de los datos.....	127
Tabla 17. Modelos de regresión.....	134
Tabla 18. Supuestos Estadísticos para el modelo de regresión .....	135
Tabla 19. Equipos de uso final y distribución por áreas del campus de la UAO .....	146
Tabla 20. Descripción de los SSFV instalados en el campus de la UAO .....	149
Tabla 21. Medidores de Energía Eléctrica instalados en el campus .....	150
Tabla 22. Características técnica estación meteorológica .....	154
Tabla 23. Equipos de medida usados en la auditoria energética del campus .....	157
Tabla 24. cronograma de mediciones de consumo de energía eléctrica según lineamientos de la ISO50002 .....	159
Tabla 25. Datos de consumo de energía eléctrica y código de medidores implementados en la UAO .....	160
Tabla 26 datos de consumo por tipo de energéticos 2016-2019 .....	162
Tabla 27. Datos de consumo energía eléctrica y fotovoltaica .....	165
Tabla 28. Histórico de consumo mensual de energía años 2014 – 2019.....	169
Tabla 29. Datos de consumo por tipo de energía años 2016 – 2018.....	172
Tabla 30. Relacion de incremento o decremento en el consumo de energía electrica para las aulas en los año 2016 – 2019.....	174
Tabla 31. Consumo de energía electrica promedio por mes edificios de aulas 2016 – 2019.....	175
Tabla 32. consumo de energía electrica promedio en cada aulas por jornada -2016 y 2017 .....	176
Tabla 33. Superficies por pisos.....	185
Tabla 34. Superficies piso 1.....	185
Tabla 35. Superficies piso 2.....	186
Tabla 36. Superficies piso 3.....	187
Tabla 37. Superficies piso 4.....	188
Tabla 38. Materiales de construcción de los espacios del Edificio .....	189

## Índices

---

Tabla 39. Características acristalamientos edificio .....	189
Tabla 40. Ocupación del Edificio. ....	190
Tabla 41. Equipos de uso final del Edificio .....	193
Tabla 42. Histórico de consumos de Energía Eléctrica.....	195
Tabla 43. Potencia de refrigeración kw unidades split .....	197
Tabla 44. Sistemas de Iluminación del Edificio. ....	198
Tabla 45. Equipos de uso ofimático del Edificio.....	200
Tabla 46. Costes Económicos e Impacto medioambiental Edificio de Aulas 4 .....	202
Tabla 47. Valores de consumo eléctrico reales y simulados.....	209
Tabla 48. Energía total consumida.....	210
Tabla 49. Distribución de consumos energéticos por uso. ....	211
Tabla 50. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.....	211
Tabla 51. Producción mensual y anual de kg de CO <sub>2</sub> .....	213
Tabla 52. Características técnicas extractores .....	214
Tabla 53. Características técnicas de los equipos de acondicionamiento de recintos .....	215
Tabla 54. Resumen datos recintos climatizados actualizados del edificio.....	216
Tabla 55. Distribución de consumos energéticos por uso. ....	218
Tabla 56. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.....	218
Tabla 57. Producción mensual y anual de kg de CO <sub>2</sub> con MAE I .....	221
Tabla 58. Resumen de luminarias .....	226
Tabla 59. Niveles de iluminancia con la propuesta de diseño de iluminación.....	227
Tabla 60. Consumo Kwh diseño de iluminación nuevo vs actual.....	227
Tabla 61. Producción mensual y anual de kg de CO <sub>2</sub> con MAE II.....	228
Tabla 62. Distribución de consumos energéticos por uso. ....	230
Tabla 63. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.....	230
Tabla 64. Producción mensual y anual de kg de CO <sub>2</sub> con MAE III.....	232
Tabla 65. Distribución de consumos energéticos por uso. ....	234
Tabla 66. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.....	234
Tabla 67. Producción mensual y anual de kg de CO <sub>2</sub> con MAE IV.....	236
Tabla 68. Distribución de consumos energéticos por uso. ....	239
Tabla 69. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.....	239
Tabla 70. Producción mensual y anual de kg de CO <sub>2</sub> con MAE V.....	241
Tabla 71. Distribución de consumos energéticos por uso. ....	243
Tabla 72. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.....	243
Tabla 73. Producción mensual y anual de kg de CO <sub>2</sub> con MAE VI.....	245
Tabla 74. Distribución de consumos energéticos por uso. ....	247
Tabla 75. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.....	247
Tabla 76. Producción mensual y anual de kg de CO <sub>2</sub> con MAE VII.....	249
Tabla 77. Distribución de consumos energéticos por uso. ....	251
Tabla 78. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.....	252
Tabla 79. Producción mensual y anual de kg de CO <sub>2</sub> con MAE VIII.....	254
Tabla 80. Resumen ahorros de las MAE's aplicadas al edificio .....	255
Tabla 81. Potencia Total atendida y Nivel de tensión para sistemas de acumulación de energía .....	256
Tabla 82. Línea base - Promedio del consumo mensual histórico .....	267
Tabla 83. Línea base - Promedio ponderado del consumo mensual histórico .....	268
Tabla 84. Línea base – Índices de estacionalidad.....	269

Tabla 85. Línea base – Media móvil de orden 12.....	270
Tabla 86. Línea base – consumo promedio según programación académica .....	274
Tabla 87. Línea base – consumo promedio según programación académica .....	277
Tabla 88. Modelos de pronósticos implementados para determinar el consumo de energía de Aulas 4 en el 2019 .....	278
Tabla 89. Error Absoluto Porcentual MAPE de los modelos de series de tiempo .....	279
Tabla 90. Información mensual de variables monitoreadas en el edificio para el 2017 .....	279
Tabla 91. Supuestos y pruebas de verificación para los modelos de regresión.....	281
Tabla 92. Consolidado cumplimiento de supuestos estadísticos de los modelos de Regresión .....	294
Tabla 93. Ajuste de bondad de los modelos de regresión lineal .....	295
Tabla 94. Capacidad de pronóstico del modelo de Regresión lineal univariable .....	296
Tabla 95. Capacidad de pronóstico modelo univariable .....	296
Tabla 96. Capacidad de pronóstico del modelo de Regresión lineal multivariable .....	297
Tabla 97. Capacidad de pronóstico modelo multivariable.....	297
Tabla 98. Información mensual de variables monitoreadas en el edificio para el 2018 .....	298
Tabla 99. Distribución del tipo de semana para el año 2018.....	299
Tabla 100. Datos semanales – Periodo Semestre del año 2018. ....	300
Tabla 101. Datos semanales – Semestre 1 del 2018.....	302
Tabla 103. Datos semanales – Semestre 3 del 2018.....	304
Tabla 103. Ajuste de bondad del modelo de regresión lineal.....	309
Tabla 104. Capacidad de pronóstico del modelo de Regresión lineal multivariable semanal.....	310
Tabla 105. Información mensual de variables monitoreadas en el edificio para el 2019 .....	311
Tabla 106. Información semanal de las variables monitoreadas en el edificio para el año 2019 .....	312
Tabla 107. Información diaria de las variables monitoreadas para marzo.....	315
Tabla 108. Modelos de regresión lineal multivariable para el 2019.....	318
Tabla 109. Pronóstico de consumo de energía eléctrica para el mes de marzo de 2019 utilizando las LBE obtenidas. ....	319
Tabla 110. Pronóstico de consumo eléctrico mes a mes empleando LBE diarias, semanales y mensual para el 2019.....	321
Tabla 111. Modelos de LBE propuestos para pronosticar 2019 .....	321
Tabla 112. Indicadores .....	324
Tabla 113. Indicadores de Eficiencia Energética por vectores energéticos en el Campus UAO de los años 2017 – 2019 .....	325
Tabla 114. Indicadores de Eficiencia Energética por servicios de uso final en el Campus UAO de los años 2017 – 2019.....	325
Tabla 115. Indicadores de Eficiencia Energética de Generación FV y consumo de energía eléctrica total del Campus UAO de los años 2017 – 2019.....	325
Tabla 116. Indicadores de Eficiencia Energética por energéticos en el Edificio de Aulas 4 de los años 2017 – 2019.....	327
Tabla 117. Indicadores de Eficiencia Energética por servicios de uso final en el Edificio de Aulas 4 de los años 2017 – 2019 .....	327
Tabla 118. Indicadores de Eficiencia Energética de Generación FV y consumo de energía eléctrica total del Campus UAO de los años 2017 – 2019.....	327
Tabla 119. Escenario de IE con implementación de MAE’s en el edificio de aulas 4.....	328
Tabla 120. Factores de paso de energía final a Energía primaria – Colombia .....	331
Tabla 121. IE de energía primaria no renovable Kw h, renovable y total en el CAMPUS UAO.....	331

Tabla 122. IE de energía primaria no renovable, renovable y total en Kwh en el Edificio de Aulas 4	331
Tabla 123. Factores de paso de energía final a Energía primaria – España .....	332
Tabla 124. IE de energía primaria no renovable, renovable y total en kWh en el CAMPUS UAO .....	332
Tabla 125. IE de energía primaria no renovable, renovable y total en kWh en el Edificio de Aulas 4	332
Tabla 126. Tabla comparativa Edificio de aulas 4 vs Edificio con MAE's propuestas .....	333
Tabla 127. Consumo de energía final total y emisiones de CO2 por meses en el CAMPUS UAO.....	335
Tabla 128. Consumo de energía final total y emisiones de CO2 por meses en el Edificio de Aulas 4	337
Tabla 129. Consumo eléctrico real y estimado para los años 2017 – 2019 del edificio de aulas 4 ....	339
Tabla 130. Indicador de Eficiencia Energética IEE del edificio de aulas 4 años 2017 – 2019.....	340
Tabla 131. CUSUM edificio de aulas 4 años 2017 – 2019 .....	343
Tabla 132. Resumen indicadores del campus UAO.....	345
Tabla 133. Resumen de indicadores del Edificio de Aulas 4 .....	345
Tabla 134. Consumo eléctrico real y estimados en kWh en los diferentes modelos para el año de 2019 .....	346
Tabla 135. Indicador de Eficiencia Energética de los diferentes modelos.....	346
Tabla 136. Indicador CUSUM de los diferentes modelos.....	347
Tabla 137. Consumo eléctrico real y estimados en kWh bajo las LBE diaria, semanal, mensual y propuesta de 2019 .....	349
Tabla 138. Indicador de Eficiencia Energética de los modelos de LBE diaria, semanal mensual y propuesta del 2019.....	350
Tabla 139. Indicador CUSUM de los modelos de LBE diaria, semanal mensual y propuesta del 2019 .....	351

## OBJETIVOS

Una de las problemáticas actuales a nivel mundial del cambio climático, es el elevado consumo energético que se produce en nuestras sociedades, existen 3 sectores importantes en consumo energético como el industrial, transporte y edificios.

En Colombia, se ha desarrollado políticas energéticas de ahorro energético encaminadas fundamentalmente a nivel industrial y transporte, sin embargo, el sector edificios sea relegado y ahora estudios recientes han demostrado la importancia en el consumo energético de este sector.

El objetivo principal de esta tesis va dirigido al estudio de herramientas de Gestión Energética para cumplir los ODS que propone la ONU y a los recientes compromisos que ha suscrito Colombia en términos de transición energética, donde los pilares fundamentales están enfocados a incrementar la matriz energética en la parte de energías renovables y fortalecer la eficiencia energética en toda la cadena productiva.

A lo largo de la estructura de esta tesis se componen diversos objetivos específicos como son:

1. Presentar un panorama actual del estado de las edificaciones a nivel mundial con especial énfasis en Latinoamérica y Colombia.
2. Analizar las herramientas de planificación energética en un sistema de gestión, destacando la construcción de las líneas de base energética e indicadores de desempeño energético.
3. Proponer modelos para estimar las líneas base e indicadores en edificaciones desarrollando cuatro modelos, en el primero y segundo se aporta modelo basado en series de tiempo, en el tercero modelos de regresión univariable y multivariable y en el cuarto se proponer la simulación dinámica utilizando el motor de cálculo energy plus y software desing builder. Lo anterior validados sobre bases matemáticas y estadísticas.
4. Realizar una revisión de la energética edificatoria del campus y edificio de aulario 4 seleccionado como caso de estudio.
5. Analizar la monitorización experimental del campus y del aulario 4.

6. Realizar la simulación dinámica del edificio de aula seleccionado, utilizando software Design Builder con su motor de cálculo energy plus, verificar, calibrar el modelo con datos experimentales arrojadore de la revisión energética.
7. Obtener medidas de ahorro MAES, en las cuales se va a analizar frente al edificio base, el impacto ambiental en kg CO<sub>2</sub> y finalmente el ahorro económico.
8. Proponer una metodología para implementar la selección y aplicación de modelos para la estimación de líneas bases e indicadores energéticos en edificios planteando alternativas según los recursos de monitorización y operación de la edificación.
9. Establecer los efectos de los ahorros energéticos en la selección de los modelos propuestos de acuerdo a las condiciones de monitorización, precisión y pronóstico de la línea base energética.
10. Establecer un análisis energético del caso práctico mediante indicadores propuestos que serán energéticos, ambientales, económicos, de gestión energética y caracterización de un edificio casi nulo nZEB.

## ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis está estructurada en siete capítulos:

En el primer capítulo se presenta un panorama global de la situación energética en el mundo en torno al incremento de la población, aumento de la demanda y participación de las energías renovables y eficiencia energética, como elementos para mitigar el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> y los compromisos que exige el acuerdo de París y los objetivos de desarrollo sostenible. De igual forma se expone la situación del parque edificadorio en algunos países como China, Estados Unidos, Europa y Latinoamérica; enfatizando en la situación de Colombia y la dinámica en torno a la política energética que se viene desarrollando en Latinoamérica y en el caso específico de Colombia.

En el segundo capítulo se describe la importancia de un sistema de gestión energética SGEN y la relación que se tiene con aspectos normativos. De igual forma, se describen las herramientas y técnicas utilizadas para el desarrollo de los procesos de planificación energética y algunos de los componentes más significativos, como es el caso de la revisión energética y aspectos descriptivos en lo que se refiere a los conceptos de líneas de base e indicadores energéticos y su aporte en el mejoramiento de la eficiencia energética en edificaciones.

En el tercer capítulo se presenta los soportes teóricos para la aplicación de los modelos para la estimación de líneas bases e indicadores, como herramientas para responder a las condiciones exigidas por las normas de apoyo a la implementación de sistemas de gestión SGEN, específicamente la ISO 50006. Lo anterior, sustentado con análisis matemáticas y estadísticas a fin de poder contar con resultados válidos y aplicables a las condiciones de funcionamiento de las edificaciones. Enfatizando como resultado significativo la posibilidad de contar con alternativas de análisis según las condiciones de medición, disponibilidad de datos y condiciones reales de operación de los edificios. Respondiendo a los vacíos normativos en torno a validar e implementar sus modelos.

En el cuarto capítulo se presenta la revisión energética realizada al campus y al edificio de aula 4, la misma se ejecutó siguiendo los estándares normativos recomendados por la ISO 50002, donde se muestra la monitorización y medidas de los años 2016 a 2019, específicamente del consumo de energía eléctrica, aprovechando el sistema de monitorización power monitor de Schneider. Así mismo, se cuenta con equipos portátiles como analizadores de red, sensores y data logger de IAQ e intensidad lumínica, además de una estación meteorológica. Elementos que permitieron hacer un análisis detallado de la situación energética de los edificios objeto de estudio.

En los capítulos quinto y sexto, se realiza el análisis de la situación actual del edificio aulario (aulas 4) relativo al consumo energético, a través de los datos obtenidos mediante el programa de simulación dinámica Design Builder, previamente calibrado con los datos experimentales de monitorización continua con un sistema BMS. Lo anterior, permitió presentar una serie de medidas de mejoras energéticas MAES en el edificio con miras a realizar recomendaciones de orden pasivo y activo para mejorar la operación del edificio y conseguir mayores ahorros energéticos, menores costes económicos y, finalmente, una reducción del impacto medioambiental.

En el capítulo siete se presenta el desarrollo de una metodología para implementar la selección y aplicación de modelos para la estimación de líneas bases e indicadores energéticos en edificios; como respuesta a los vacíos normativos donde se propone el empleo de algunos modelos para estimar las líneas bases e indicadores, sin precisar las bases teóricas, métodos estadísticos y criterios para determinar si una línea base o un indicador son válidos para establecer una referencia de consumo y un ahorro energético. En este sentido, se presentan 4 modelos en los que se utiliza las series de tiempos, los modelos de regresión univariable y multivariable en los que se emplea el software R estudio y la simulación dinámica con Design Builder. Lo anterior, soportado sobre bases estadísticas y herramientas como el cusum para analizar los efectos en la estimación de ahorros energéticos.

La tesis doctoral finaliza con el cálculo de los indicadores propuestos de intensidad energética, impacto medioambiental, gestión energética y los EPnorenovable y ERR en lo concerniente al comportamiento del edificio nZEB para el caso de estudio.

## CAPÍTULO 1: ENERGÉTICA EDIFICATORIA

En este capítulo se presenta un panorama global de la situación energética en el mundo en torno al incremento de la población, aumento de la demanda y participación de las energías renovables y eficiencia energética, como elementos para mitigar el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> y los compromisos que exige el acuerdo de París y los objetivos de desarrollo sostenible. De igual forma se presenta la situación del parque edificatorio en algunos países como China, Estados Unidos, Europa y Latinoamérica; enfatizando en la situación de Colombia y la dinámica en torno a la política energética que se viene desarrollando en el país. Lo anterior respecto al ámbito de edificaciones sostenibles y lineamientos del Plan indicativo 2017 – 2022 que traza las metas energéticas en cada uno de los subsectores transporte, industria, servicios y residencial. Además de las perspectivas de entidades como la IEA en torno al desarrollo del sector edificaciones en Latinoamérica.

### 1.1. CONSUMO DE ENERGÍA Y PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL.

El aumento de la población en áreas urbanas plantea retos frente al incremento de la demanda energética y el impacto global causado al medio ambiente. Al año 2014, el 54% de la población mundial vive en áreas urbanas y se espera que la misma continúe creciendo, de modo que, para el año 2050 aproximadamente, se espera sea un tercio rural 34% y dos tercios urbanos 66%, según el informe World Urbanization Prospects [1], [2], [3]. Actualmente entre las regiones más urbanizadas se encuentran Norte América con el 82%, América Latina y el Caribe 80% y Europa 73%. Por el contrario, África y Asia siguen siendo principalmente rurales, con 40% y 48% respectivamente.

En la figura 1, se presenta la tendencia de crecimiento de la población a nivel mundial donde desde el año 2007 la población urbana supera a la población rural y la tendencia se mantiene según las proyecciones al año 2050.

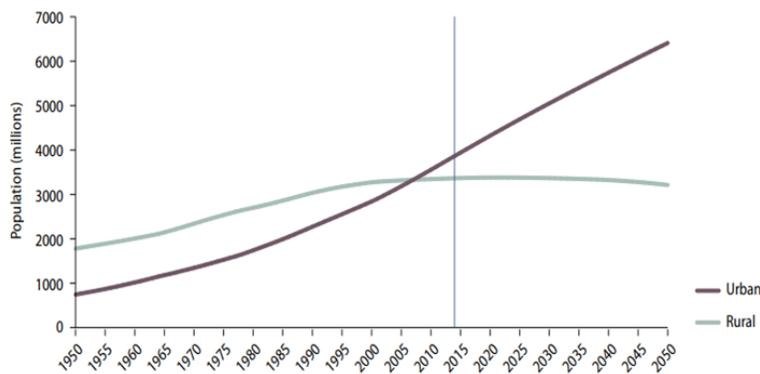


Figura 1. Población urbana y rural del mundo, 1950-2050

Fuente: World Urbanization Prospects [3].

El consumo de energía tiene una dependencia directa con el aumento de la población y su desarrollo económico. Las tendencias demográficas y económicas a nivel global (IEA, 2017) pronostican que para el 2040 la población mundial pase de 7.400 millones a 9.000 millones de habitantes, lo cual representa un impulso en la demanda mundial de energía de aproximadamente un 30%. Se provee un cambio en la demanda de energía primaria en el mundo y los roles que juegan países como Estados Unidos e India, donde el primero se convertirá en un importante exportador de energía mientras que India, será el mayor consumidor como se indica en la figura 2.

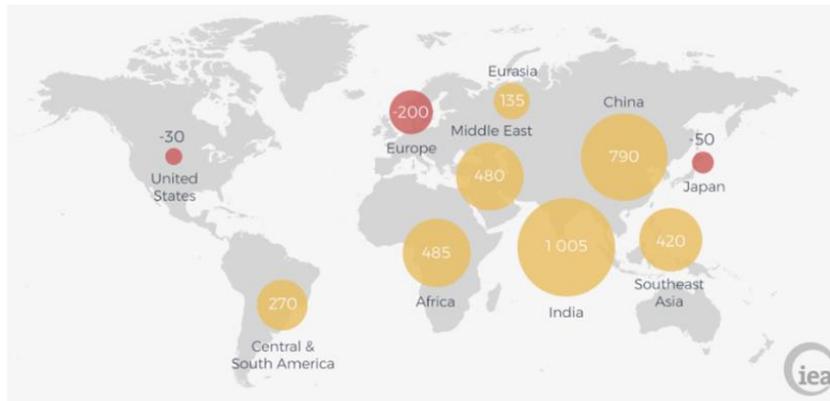


Figura 2. Cambio en la demanda de energía primaria.

Fuente: World Energy Outlook 2017 [4]

Según informes de la IEA, se proyecta que el incremento en la demanda de energía a nivel global entre 2013 y 2040 crezca un tercio [4]. La relación entre el crecimiento económico global, la demanda de energía y las emisiones de gases a la atmósfera está disminuyendo, gracias a acciones de mercados importantes como China que están realizando cambios estructurales en su economía, como incorporación de tecnologías más eficientes. Sin embargo, la demanda de servicios energéticos sigue creciendo y se provee que las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía sean un 16% superior en 2040, como se presenta en la figura 3.

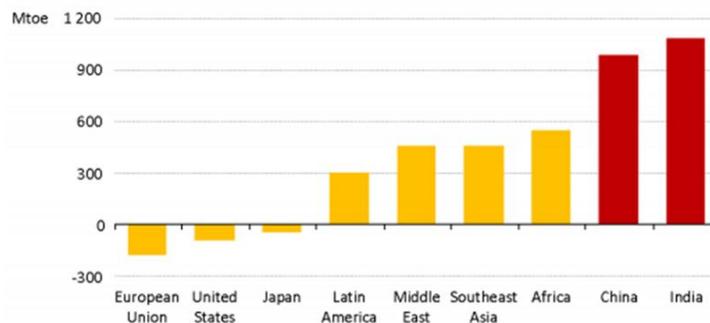


Figura 3. Emisiones de CO<sub>2</sub> en diferentes regiones 2014-2040

Fuente: World Energy Outlook 2017 [4]

Tras el inminente aumento de la demanda mundial de electricidad, se llevan a cabo múltiples acciones para reducir las consecuencias medioambientales asociadas a su generación. En este escenario se estima que para el inicio del 2030 las energías renovables jugarán un papel importante por encima del carbón como principal fuente de generación eléctrica. Se proyecta que para el 2040 el 50% de la generación en la Unión Europea, un 30% en China y Japón, y por encima del 25% en los Estados Unidos, contribuyan a la mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub> como lo presenta la figura 4.

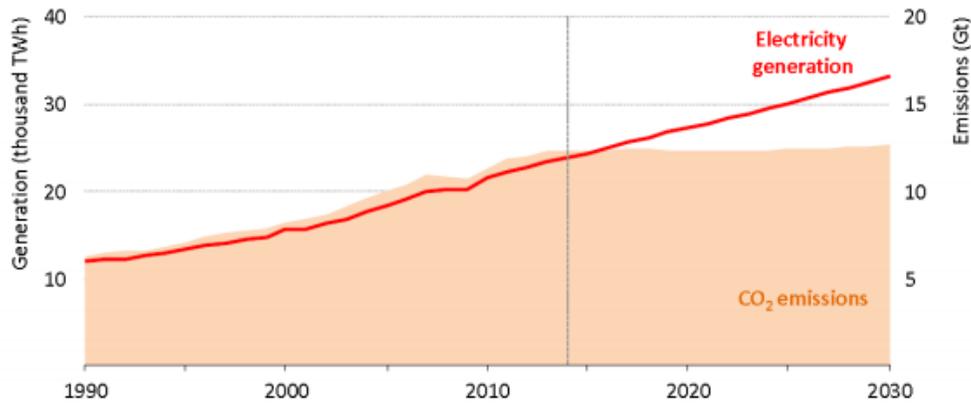


Figura 4. Generación mundial de energía eléctrica y emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas.  
Fuente: Fuente: World Energy Outlook 2017 [4]

Proyecciones de la IEA en el año 2010 señalaban disminuciones de consumo y pronosticaban que el consumo en los mercados energéticos tendría una disminución, lo cual estuvo atravesado por la recesión económica de esos años. Una vez superada la recesión económica se restableció la tendencia de consumo energético a nivel mundial, desestimando los cálculos pronosticados para ese momento, tendencia que continua en incremento como lo muestra la siguiente Figura 5 [5].

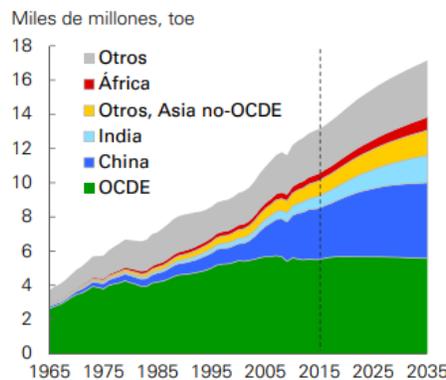


Figura 5. Consumo de Energía por regiones.  
Fuente: BP - Outlook for Energy 2017 [5]

El aumento en la demanda energética a nivel mundial ha ocasionado que la capacidad instalada de fuentes primarias de energía aumente y este cambiando en comparación con los últimos 25 años como lo presenta la figura 6. A nivel de generación de energía el gas natural proyecta incrementos en el consumo alrededor del 45%, seguido del aumento de las energías renovables que cubren alrededor del 40% del aumento de la energía primaria. No obstante, las múltiples actuaciones de la eficiencia energética vienen contrarrestando el aumento en el uso final de energía. Para el IEA [4], sin eficiencia energética se proyectaría más del doble del consumo.

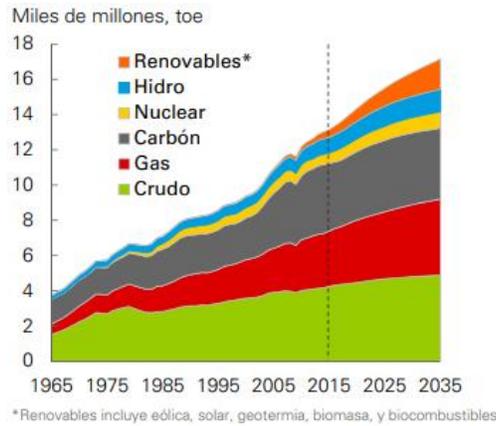


Figura 6. Fuentes de Energía Primaria – Matriz Energética Mundial.  
Fuente: BP - Outlook for Energy 2017 [5]

En esta dirección la eficiencia energética trae consigo beneficios asociados con la mejora en la seguridad del suministro, reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, creación de empleo, mejora de la productividad, acceso a la energía; razón por la cual se considera un recurso energético denominado como el primer combustible según el World Energy Council [6]. Por otro lado, la base de datos de indicadores del World Energy Council muestra que la participación de la eficiencia energética en el consumo total de energía primaria en 2014 fue del 38%, por delante del petróleo en 19% y carbón / lignito en 18%, como se evidencia en la figura 7.

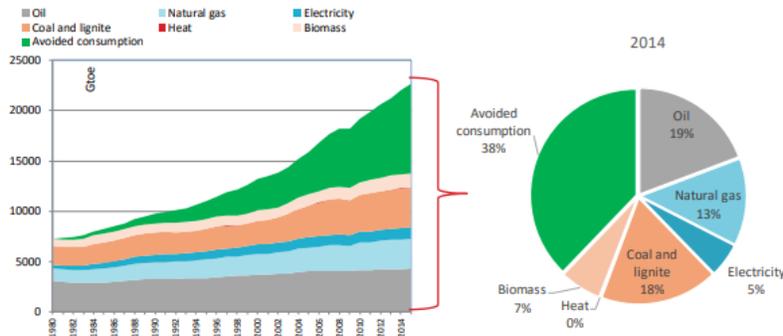


Figura 7. Consumo de energía primaria a 2014  
Fuente: Energy Efficiency Policies 2016. World Energy Council [6]

Por tal razón, la eficiencia energética se ha convertido en una prioridad en las políticas energéticas a nivel mundial, debido a su competitividad, rentabilidad de implementación, su amplia disponibilidad y los beneficios que trae consigo. A nivel gubernamental, la eficiencia energética ha sido incluida como uno de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, donde se planteó como objetivo “duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética para 2030”.

La Agencia Internacional de Energía plantea 3 escenarios claves para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible como lo enseña la tabla 1.

Tabla 1. Objetivos Planteados por la IEA

Objetivo	Escenario
6DS	Es un escenario muy poco ambicioso que asume pocas medidas de cambio climático
4DS	incluye objetivos y políticas aprobadas, con cierta ambición climática.
2DS	Este escenario asume la puesta en marcha de las medidas para limitar el incremento de la temperatura global por debajo de 2°C

Teniendo en cuenta estos escenarios, el reto básico es adoptar las medidas necesarias para pasar de un escenario como el 6DS a uno de 2DS que permita cumplir el objetivo del Acuerdo de París. La figura 8., enseña las acciones necesarias a realizar, donde se evidencia que el principal bloque de actuaciones será destinado a la mejora la eficiencia energética (el 36% de la reducción de emisiones necesaria), el segundo será la promoción de energías renovables (29% de la reducción necesaria). Por último, se consideran otro tipo de medidas, como la energía nuclear (tecnología libre de emisiones de CO<sub>2</sub>) o la Captura y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCS, en sus siglas en inglés).

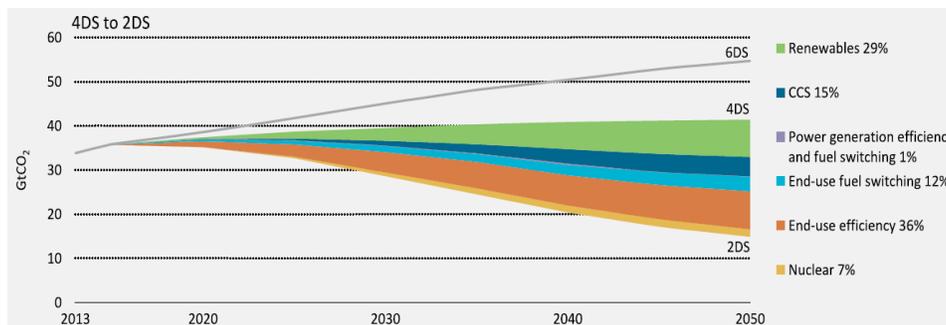


Figura 8. Medidas para pasar de un 6DS al 2DS.

Fuente: Energy Technology Perspectives 2016 IEA [7].

Para la puesta en marcha de todas estas soluciones climáticas, es clave el desempeño del sector eléctrico. Estudios realizados por la Agencia Internacional de Energía [4], destacan el papel básico que el sector debe desempeñar para mitigar las Emisiones de CO<sub>2</sub> y cumplir el escenario de 2DS, la figura 9., muestra las acciones a realizar, entre ellas se destacan:

Mejorar la eficiencia de los usos de la electricidad en la industria y los edificios, tiene efecto en la reducción de CO<sub>2</sub> provocadas por el ahorro de electricidad de estos sectores, lo que representan el 12% de la reducción acumulativa de emisiones para alcanzar el 2DS.

El sector eléctrico debe hacer el mayor esfuerzo para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, llegando a la descarbonización del sector para el año 2050. Se prevé que, para evitar el incremento de 2°C, el sector deberá haber un despliegue masivo de tecnologías de generación bajas en carbono que conduzcan a la baja en las emisiones de CO<sub>2</sub> por debajo de 40 gr CO<sub>2</sub>/kWh en 2050.

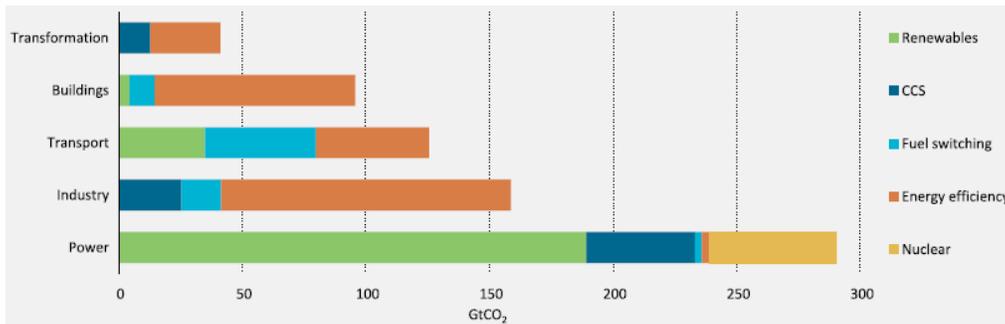


Figura 9. Reducción acumulada de emisiones de CO<sub>2</sub> por sector y tecnología horizonte 2050.

Fuente: Energy Technology Perspectives 2016 IEA [7]

En este mismo sentido, la mejora de la eficiencia energética en los edificios, la industria y el transporte es clave para los objetivos 2DS, el consumo de energía final de los tres sectores combinados articulados a políticas establecidas bajo el objetivo 2DS, contribuirían a la reducción en un 30% para 2050. Aproximadamente 126 EJ en comparación con el 6DS, como lo enseña la figura 10.

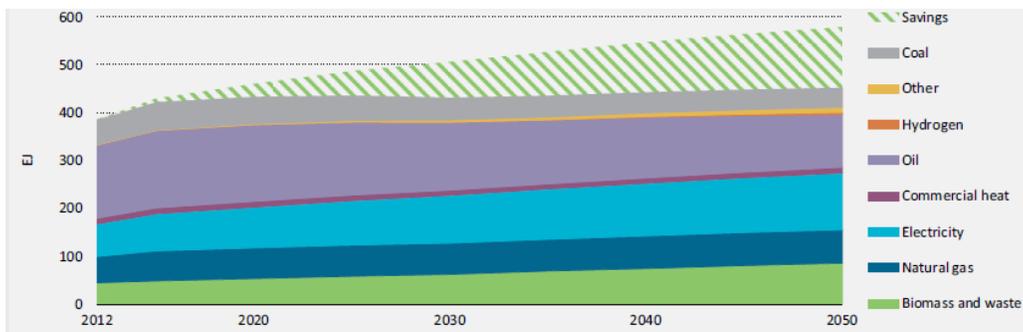


Figura 10. Impacto de la Eficiencia en el consumo final de energía a nivel global en el 2DS

Fuente: Energy Technology Perspectives 2016 IEA [7]

Teniendo en cuenta el crecimiento del mercado de equipos eléctricos a nivel mundial, la eficiencia de los equipos constituye una de las estrategias principales de la eficiencia energética que permite cumplir las metas propuestas. Actualmente los gobiernos establecen estándares mínimos de rendimiento energético (MEPS) y etiquetado de equipos (neveras, lavadoras, aires acondicionados, lámparas, motores, etc.), automóviles e incluso viviendas, con el fin de promover en los fabricantes una renovación eficiente de sus equipos e instalaciones, a su vez, en los consumidores crear conciencia en el uso de soluciones eficientes y de bajo costo.

En términos económicos, la Agencia Internacional de energía señala que la inversión al sistema energético a nivel global en el año 2015 fue de aproximadamente US \$ 1,800 billones, lo cual representó más del 2% del producto interno bruto (PIB) mundial en ese año [4]. La gran mayoría de estas inversiones (US \$ 1,600 billones) se hicieron para agregar o reemplazar equipos del lado de la oferta del sistema energético, mientras que, en eficiencia energética se invirtieron unos US \$ 220 billones, principalmente en los sectores de uso final (edificios, transporte e industria).

Para cumplir con los objetivos propuestos, se prevén en términos económicos varios escenarios, trabajar mundialmente bajo el escenario 4DS, que implica una inversión en eficiencia energética y energía baja en carbono (LCEI-Gap) a corto plazo (2030) de aproximadamente US \$ 130 mil millones anuales. Si el objetivo es, en cambio, trabajar bajo el escenario 2DS y mantener las temperaturas globales por debajo de los 2°C a largo plazo, la inversión a corto plazo rápidamente escalará a US \$ 300 mil millones o US \$ 460 mil millones.

A continuación, se presenta un panorama del sector energético de las edificaciones en relación con la situación ambiental y el compromiso con la reducción del consumo energético y la necesidad de contribuir desde la investigación en generar acciones que aporten al seguimiento de indicadores de eficiencia.

## **1.2. SITUACIÓN ENERGÉTICA DE LAS EDIFICACIONES.**

Como parte de los compromisos de limitar el incremento de la temperatura global en 2 grados Celsius (°C) para el año 2050, el sector de las edificaciones deberá reducir sus emisiones totales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en 60%. Esto incluye, tanto los subsectores residenciales y de servicios, que consumen aproximadamente el 30% de la energía global, siendo responsable de aproximadamente el 28 % de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> provenientes de los consumidores finales de energía, según estadísticas del año 2016. En la Figura 11 se observa que aplicando tecnologías sostenibles (eficiencia energética, energías renovables, smart grid, entre otras) las edificaciones pueden contribuir en un 12% a la reducción de las emisiones totales, lo cual es necesario para mitigar el incremento de la temperatura. A su vez, para llegar a la transición al 2DS, requiere que se tomen medidas

en todos los sectores dentro del sistema de la energía. Esfuerzos en el lado de la oferta, generación de energía, y otras transformaciones, o el lado del uso final que involucra edificios, industria, y transporte. Aspectos que aportan aproximadamente la mitad de las reducciones necesarias.

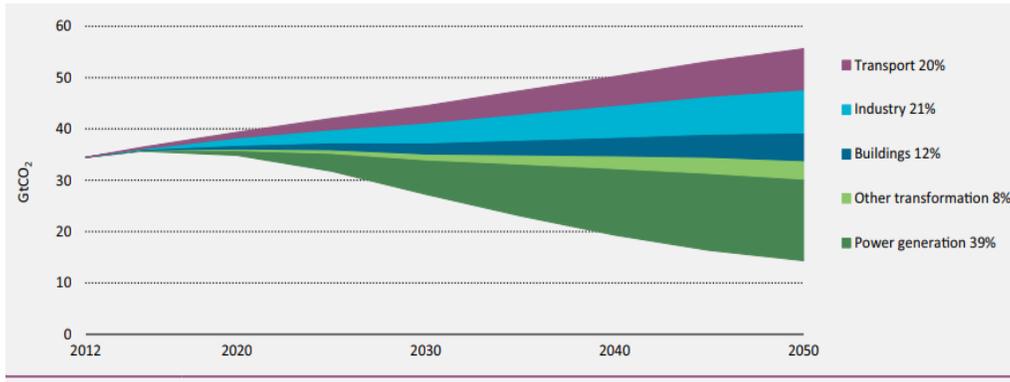


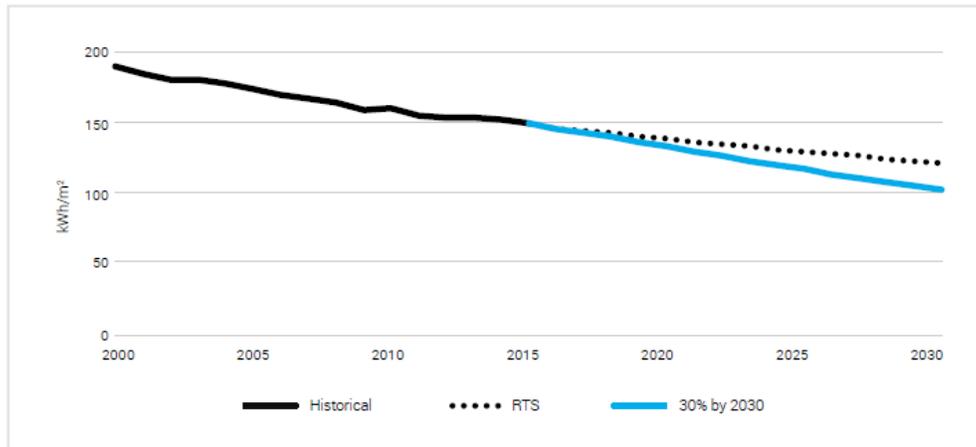
Figura 11. Reducciones globales de Co2 entre 6DS y 2DS por sector.

Fuente: Energy Technology Perspectives 2017, IEA

A medida que se incremente la población a nivel mundial, en ese mismo sentido lo hará el parque edificatorio, lo que implica más consumo de energía, principalmente eléctrica, destinada a abastecer hogares, oficinas, escuelas, centros comerciales, iglesias, centros de salud, escuelas, universidades, entre otros.

Los edificios y construcciones en conjunto representan el 36% del uso final de la energía a nivel mundial y el 39% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, relacionadas con la energía [8]. Múltiples esfuerzos se llevan a cabo para tener construcciones sostenibles (nuevas y existentes), pero no se mantienen al ritmo de un parque edificatorio en constante crecimiento y un alza en la demanda energética de los mismos. La demanda de energía eléctrica por m<sup>2</sup> del sector de edificios a nivel mundial (figura 12), necesita mejorar en un 30% en comparación con el 2015, para cumplir con las ambiciones climáticas establecidas en el Acuerdo de París.

Los edificios y construcciones en conjunto representan el 36% del uso final de la energía a nivel mundial y el 39% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, relacionadas con la energía [8]. A pesar de las acciones para contar con construcciones sostenibles (nuevas y existentes), no son suficientes frente al constante crecimiento de un parque edificatorio que implica aumentos en la demanda energética. De tal forma la demanda de energía eléctrica por m<sup>2</sup> del sector de edificios a nivel mundial, requiere mejorar en un 30% en comparación con el 2015, para cumplir con los objetivos climáticas establecidas en el Acuerdo de París (figura 12).



Notes: EJ = exajoules; kWh/m<sup>2</sup> = kilowatt-hours per square metre; RTS = Reference Technology Scenario.

Figura 12. Uso final de energía por m<sup>2</sup> a nivel mundial.  
Fuente: UN Environment and International Energy Agency [8]

El área del parque edificatorio mundial alcanzó en el año 2016 aproximadamente 235 mil millones de m<sup>2</sup>. El uso final de energía por parte del parque edificatorio pasó de 119 EJ en 2010 a 125 EJ en 2016, el aumento en los 5 EJ, como resultado de la escasa aplicación de acciones de eficiencia energética al nivel de las edificaciones. Se señala que, en la mayoría de países, los edificios, su potencial de ahorro y emisiones de CO<sub>2</sub>, permanecen sin explotar debido a la falta de políticas efectivas y el poco interés para invertir en construcción sostenible (figura 13).

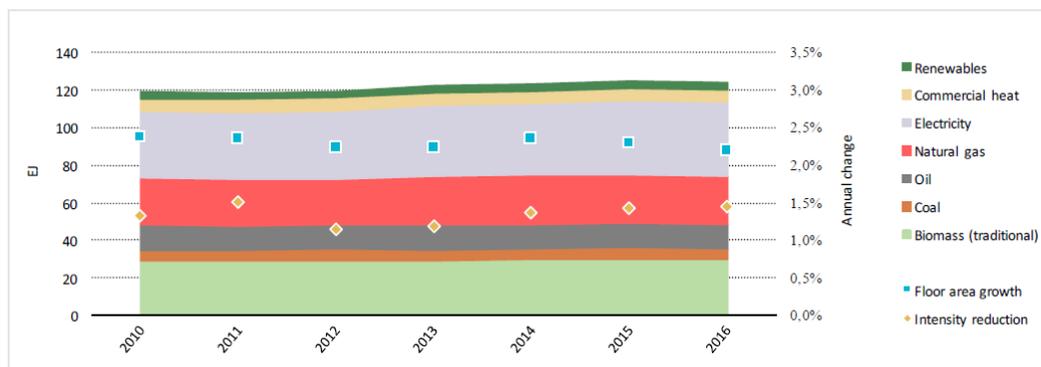
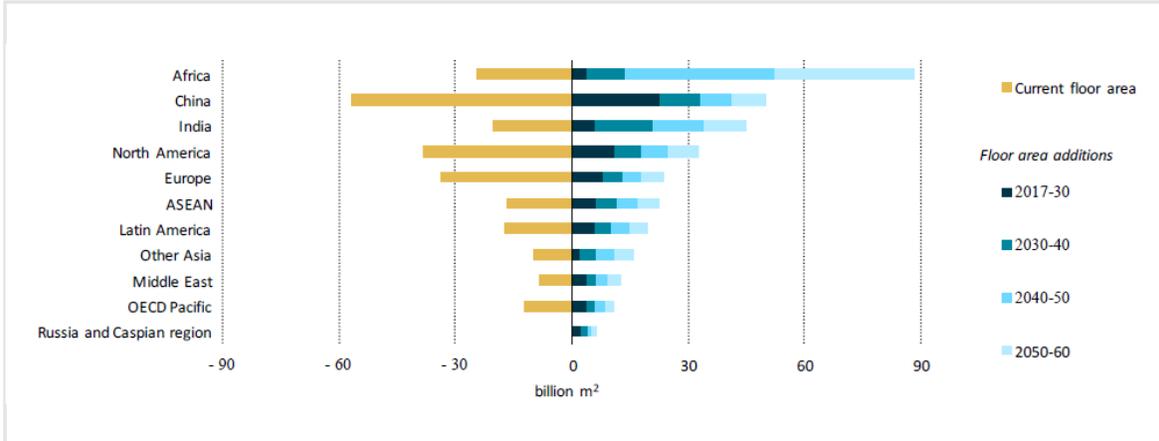


Figura 13. Consumo global de Energía en edificios.  
Fuente: UN Environment and International Energy Agency [8]

En los próximos 20 años se estima que el crecimiento del parque edificatorio estará concentrado en China, Asia y África, los dos últimos países no poseen códigos de construcción que incluyan el uso eficiente de energía eléctrica. En este sentido, se hace necesaria la actuación de organismos que regulen, exijan e implementen en cada país códigos de construcción que contemplen el uso eficiente de la energía, tanto en edificios nuevos, como en edificios ya existentes y su repotenciación (figura 14).



Notes: OECD Pacific includes Australia, New Zealand, Japan and Korea; ASEAN = Association of Southeast Asian Nations.

Figura 14. Crecimiento del parque edificatorio a 2060.  
Fuente: UN Environment and International Energy Agency [8]

A 2016 existían más de 60 países en todo el mundo con códigos y normas de energía para edificaciones, las cuales establecen requisitos mínimos para la eficiencia energética y el autoabastecimiento (instalación y uso de energías renovables) de las edificaciones nuevas. Los códigos y norma pueden ser de cumplimiento obligatorio o voluntario según cada país [9] (figura 15).

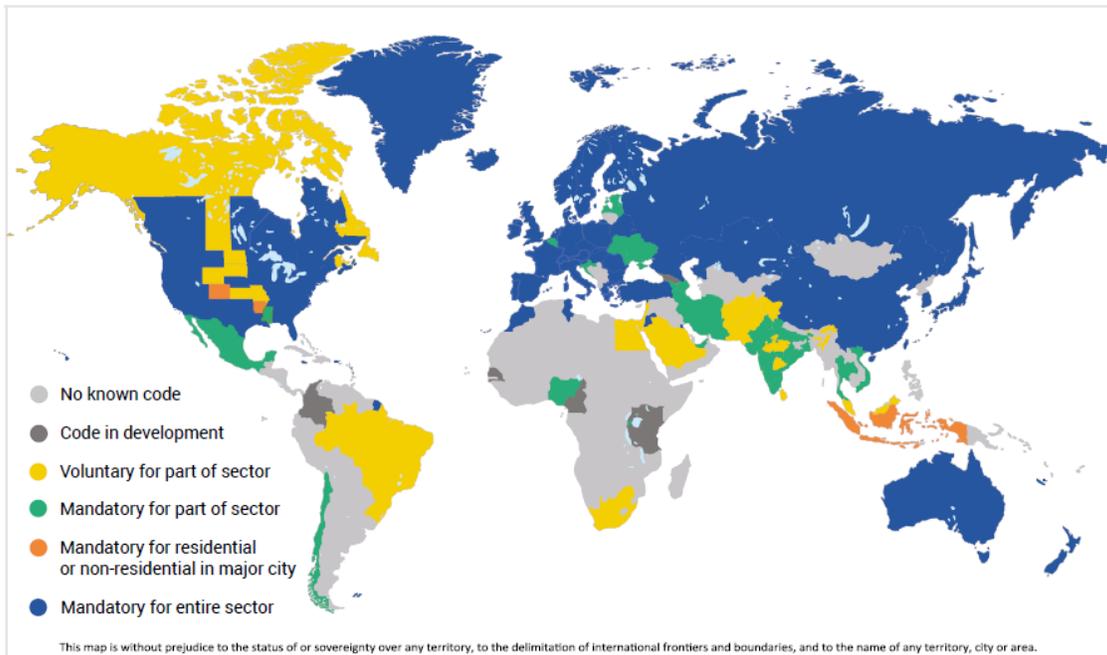


Figura 15. Códigos de energía por País  
Fuente: Building Energy Efficiency Policies [9]

En consecuencia, existe la necesidad de implementar y hacer obligatorias las normas y regulaciones relacionadas a la energía en las edificaciones. Se espera que en países en desarrollo sean construidos más de 100 mil millones de m<sup>2</sup> al año 2060, a pesar de no contar con códigos de energía.

En cuanto a la matriz de consumo de energía suele dividirse en 4 sectores: Transporte, Industria, Edificaciones o sector servicios y residencial, y otros. Para el año 2016, el sector de edificios a nivel global consumió cerca de 125 EJ, un 30% del uso total de energía final (figura 16).

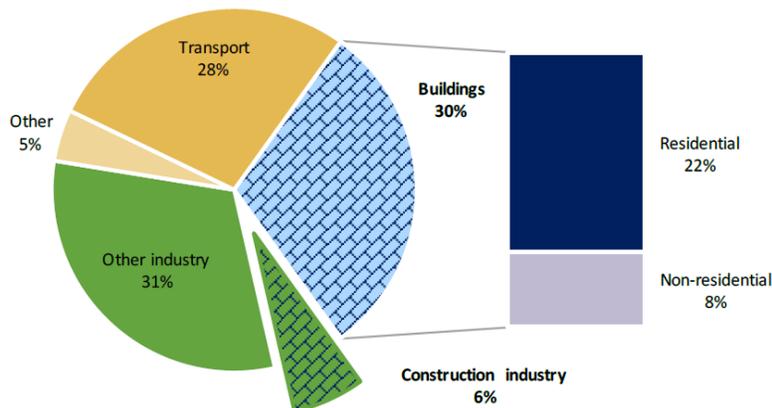


Figura 16. Proporción del consumo de energía final 2016.  
Fuente: UN Environment and International Energy Agency [8]

En este sentido, el consumo de energía final está relacionado con las emisiones de CO<sub>2</sub>. El sector de edificios a nivel mundial presentó el 28% de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con energía. Teniendo en cuenta las emisiones directas (combustibles fósiles) e indirectas (fabricación de materiales para la construcción como acero, cemento) (figura 17).

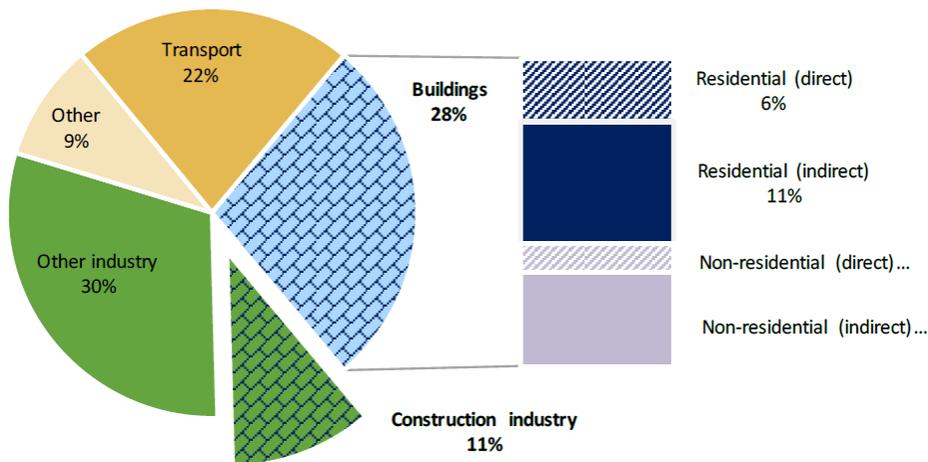


Figura 17. Proporción de emisiones de CO<sub>2</sub> 2016.  
Fuente: UN Environment and International Energy Agency [8]

### 1.3. IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LAS EDIFICACIONES

Según el informe Energy Efficiency 2017 de la IEA [4], en el sector de edificaciones se han logrado avances en eficiencia energética con iniciativas tanto políticas como tecnológicas. En el caso de las emisiones de GEI relacionadas con la construcción, se alcanzó un máximo de 9.5 giga toneladas (GtCO<sub>2</sub>-eq) en el año 2013 que disminuyeron a 9.0 Gt en año 2016.

Sin embargo, el consumo final de energía de los edificios creció constantemente de 119 EJ en 2010 a 124 EJ en 2016, como resultado de la tendencia del incremento en el área dedicada a la construcción de edificaciones, condición que, de alguna manera, supera la reducción de la intensidad energética (Figura 18).

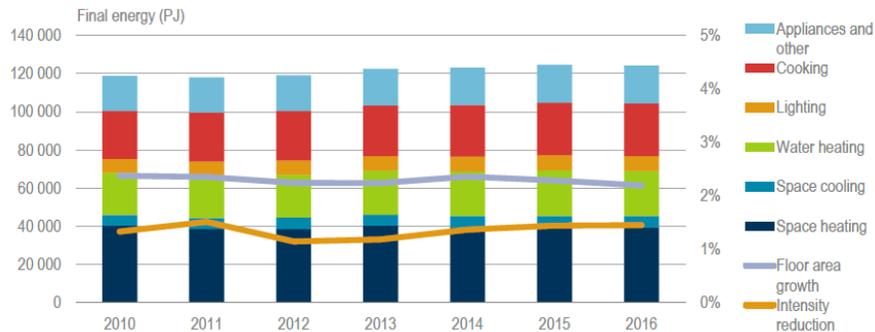


Figura 18. Consumo de energía del sector de edificios, intensidad energética y superficie (2010-16)  
Fuente: IEA – Energy Efficiency 2017

Los avances en materia de política de eficiencia energética para edificios van en ascenso en muchos países del mundo, en algunos casos, impulsados por el sector de la construcción y en otros por los adelantos tecnológicos en equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). En algunos países, como Dinamarca y Alemania, la política de construcción ha sido el factor clave para el progreso en términos de eficiencia energética, mientras que, en otros países, como Japón y Corea, el impulso se encuentra asociado a los equipos de HVAC (Figura 19).

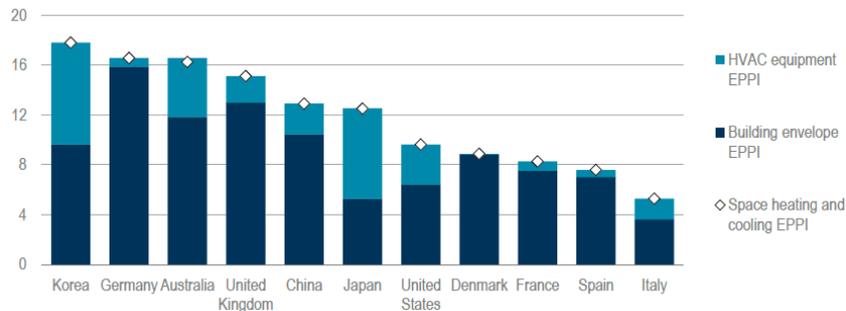


Figura 19. Proporción del progreso de la política de eficiencia de la calefacción y la refrigeración espaciales desde el año 2000 a partir de la construcción de sobres frente a los equipos HVAC  
Fuente: IEA – Energy Efficiency 2017

Una combinación de políticas en términos de construcción como de mejoramiento de la eficiencia en equipo de uso final, resulta fundamental para la transición a edificios sostenibles. Es decir, edificio altamente eficiente que integren el uso de equipos y fuentes de energía de mayor eficiencia, como la recuperación de calor residual a baja temperatura, bombas de calor y energía renovable. En este sentido, políticas que integren códigos de construcción que favorezcan la transición hacia edificaciones sostenibles, generan confianza en los mercados a nivel mundial para invertir en la construcción de edificios nuevos que sean eficientes en el consumo de energía. Un avance relacionado a lo anterior se presentó en México donde se dieron dos pasos importantes en el último año, incluida la publicación del primer código nacional de eficiencia energética de edificios en colaboración con el International Code Council, y el lanzamiento de una hoja de ruta del código de energía del edificio que proporciona objetivos nacionales en incrementos de tres años hasta 2050.

El 19 de junio de 2017, India lanzó actualización del Código de Construcción de Conservación de Energía, un código modelo nacional que puede ser adoptado y aplicado por los gobiernos estatales y locales para mejorar la eficiencia de los edificios no residenciales [10]. De otro lado en lo concerniente a electrodomésticos, la implementación de estándares que favorezcan el reemplazo de equipos con mayor eficiencia resulta una alternativa de muchos países para cumplir con compromisos de ahorro energético. Algunos informes del IEA señalan ahorros entre el 16% al 26% en los últimos 10 años para electrodomésticos, siendo significativo la participación de la iluminación en ahorros del 75% por cambio de iluminación halógena a iluminación LED. Algunas proyecciones estiman que el mercado de iluminación eficiente continuará creciendo y que el 90% de toda la iluminación interior será eficiente (CFL y LED) para 2022, debido a una combinación de política y costo decreciente de iluminación eficiente.

Otro elemento importante para aumentar la eficiencia son los equipos generadores de agua caliente (ACS), debido a las variaciones en el consumo de agua caliente del consumidor, las condiciones ambientales y el impacto de la infraestructura energética. Los estudios señalan que se puede ahorrar más energía por cambio tecnológico, es decir cambiando los tipos de equipos aumentando la eficiencia energética; En este caso las bombas de calor permiten un ahorro de energía del 60% al 85% en comparación con las calderas instantáneas y de almacenamiento típicos.

Otro elemento que aporta una mejora de la eficiencia energética en las edificaciones lo constituye la medición, control y análisis uso de la energía del edificio, como elemento para tomar decisiones sobre políticas y construcción de estrategias. Este enfoque compromete la digitalización, capacidad de capturar y análisis de datos.

A continuación, se presenta el contexto normativo y el impacto de las edificaciones en algunas regiones de alta importancia en la demanda energética a nivel mundial.

### 1.3.1. Contexto de las edificaciones en china

El informe China Building Energy Use 2016 [11], del Centro de Investigación de Energía en Edificaciones de la Universidad de Tsinghua, China., relaciona las decisiones estratégicas que ha tomado el gobierno chino según su desarrollo económico, social, político e histórico en vía de contribuir una sociedad eficiente en el uso de los recursos. Como estrategia principal, se encuentra el ahorro de energía en los diferentes sectores de consumo y como foco principal las edificaciones. Para ello, se hacen necesarias acciones que conlleven al desarrollo de medidas de eficiencia energética en las edificaciones [12].

China se caracteriza por ser un país con una economía de rápido crecimiento, con una tasa de crecimiento promedio de PIB de 6.5%, según el 13 Plan quinquenal (2016-2020) [13]. En ese sentido, el comportamiento del sector de edificios también es de crecimiento, los hogares urbanos aumentaron de 155 millones en 2001 a 264 millones en 2014, mientras que, los hogares rurales se redujeron de 193 millones a 160 millones [14].

Según lo anterior, China se considera en el sector de la construcción como un importante actor y consumidor de energía. Es la economía que mayor energía consume a nivel mundial y el segundo consumidor de energía en edificios después de Estados Unidos con un consumo cercano al 16% del consumo total de energía final en edificios a nivel mundial en el 2012. El consumo de energía final entre los años 2000 – 2012 en los edificios creció en un 37%, si la tendencia se mantiene, se estima que para el periodo 2012 – 2050 el aumento sea de un 70% adicional (figura 20) [15].

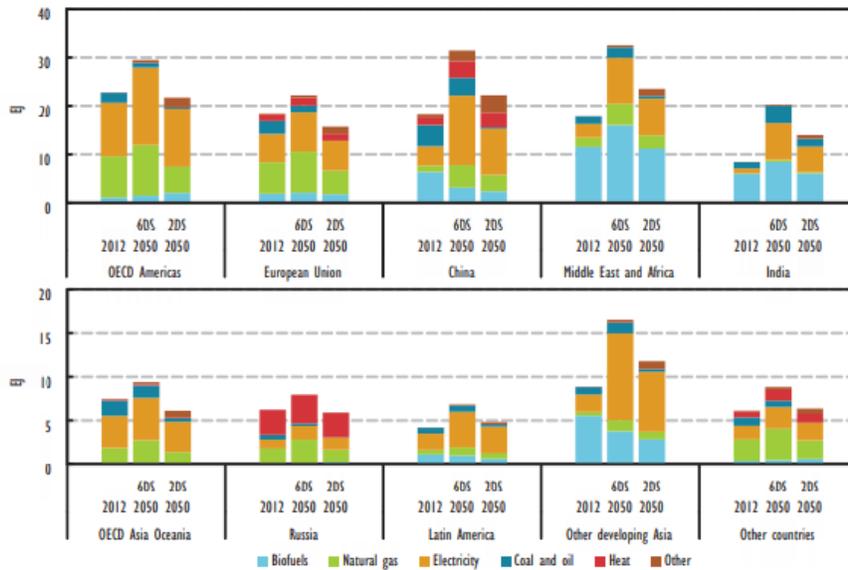


Figura 20. Proyecciones de consumo final de energía de edificios para las principales regiones y países, 2012-50

Fuente: IEA, 2015 [15].

Con el fin de cumplir los objetivos propuestos en el 2014 el consejo de estado del gobierno chino [16], dio a conocer el *Plan de acción estratégico de desarrollo energético 2014 – 2020*. En el cual se establecieron como metas principales: la reducción de consumo anual de energía primaria a 4.800 millones de TCE (141 EJ), limitar el uso total de carbón en aproximadamente 4.200 millones de TCE (aproximadamente 123 EJ) para 2020 y dio pie al desarrollo del *Plan Nacional de Nueva Urbanización para 2014 a 2020* [17], que tiene como objetivo la promoción del desarrollo verde y bajo en carbono; la conservación del agua, la tierra, la energía y otros recursos y el uso eficiente; la restauración y tratamiento ambiental; la promoción del desarrollo de ciudades verdes e inteligentes, y fomentar estilos de vida sostenibles y métodos de construcción, operación y gestión de ciudades bajas en carbono.

### 1.3.2. Contexto de las edificaciones en Estados Unidos

Estados Unidos es un país altamente desarrollado e industrializado, para el año 2015 fue el país con el mayor consumo de energía en el sector servicios (edificios) y la segunda economía consumidora de energía después de China [12].

Según el informe energético del 2017 presentado por la Agencia Internacional de Energía [4], muestra que en Estados Unidos el consumo de energía fue de 97.7 cuatrillones de BTU, la fuente principal de energía proviene de elementos fósiles (petróleo 37%, gas natural 29%) y, solo el 11% (11 cuatrillones de BTU) son generados con energías renovables como lo enseña la figura 21. La energía consumida por el país como lo enseña la figura 22, fue en el sector industrial con un 32%, sector transporte con el 29%, y el mayor en edificios con un 20% en el sector residencial y 18% en el sector comercial.

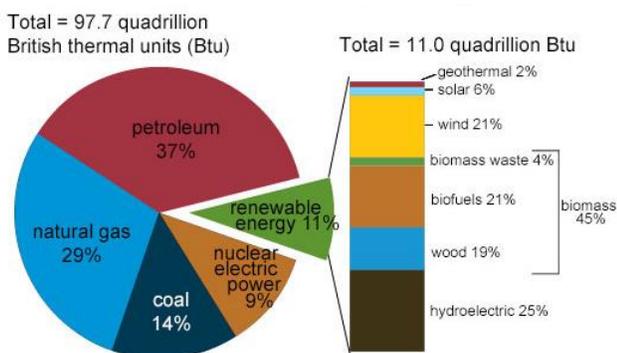


Figura 21. Consumo de energía por fuente para el año 2017  
Fuente: IEA, 2018

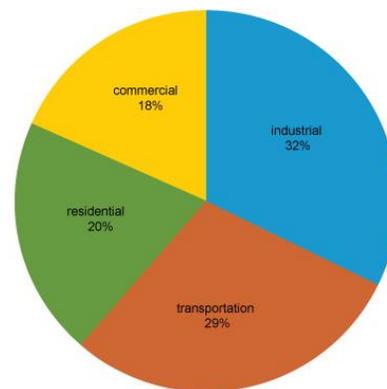


Figura 22. Consumo de energía por sector para el 2017  
Fuente: IEA, 2018

Según los datos anteriores, aproximadamente el 38% del consumo de energía es debido a los sectores residencial y comercial que relacionan directamente el sector construcción y de edificaciones. Si bien, no se estima que el sector edificaciones crezca sustancialmente en los próximos años, debido a la composición de la matriz energética (principalmente fuentes fósiles, mayores emisiones de CO<sub>2</sub> y Gases de Efecto Invernadero) se deben llevar a cabo acciones para minimizar el consumo energético en el país, principalmente en este sector.

En vía de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y contribuir al desarrollo renovable y sostenible del país, Estados Unidos ha desarrollado una política energética que aborda problemas de producción de energía, distribución y consumo, *códigos de edificación* y estándares de consumo de combustible [18].

Los códigos de construcción desarrollados se basan en la energía, su aprovechamiento y uso final. Así pues, los códigos de energía de los edificios garantizan que se utilice la energía de manera eficiente durante la vida útil del edificio, para ello se tiene el respaldo y acompañamiento de la Building Technologies Office (BTO) con el fin de aplicar los códigos en proyectos nuevos o remodelación de los existentes [18].

Además de los códigos de construcción desarrollados e implementados, estados unidos cuenta con una serie de normas de eficiencia energéticas y de certificaciones voluntarias (por ejemplo, Energy Star y LEED) con el fin de disminuir el consumo energético del país y asegurar su abastecimiento energético.

### **1.3.3. Contexto de las edificaciones en Europa (EU)**

En la Unión europea (UE) los edificios son responsables de aproximadamente el 40% del consumo de energía y el 36% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Cerca del 35% de los edificios tienen más de 50 años y el 75% del parque inmobiliario es eficiente en energía, mientras que solo el 0,4-1,2% del parque inmobiliario se renueva cada año. Una mayor renovación de los edificios existentes conduciría a importantes ahorros de energía, reduciendo potencialmente el consumo total de energía de la UE en un 5-6% y reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> en aproximadamente un 5% [19].

Mejorar la eficiencia energética de los edificios también puede generar beneficios económicos, sociales y ambientales. Los edificios de mejor rendimiento proporcionan mayores niveles de confort y bienestar para sus ocupantes, y mejoran la salud al reducir las enfermedades causadas por una mala calidad del aire interior (IAQ).

Los países europeos consumen menos energía que hace 10 años, principalmente gracias al aumento de la eficiencia energética. Europa también depende menos de los combustibles fósiles gracias al ahorro de energía y la utilización, más rápida de lo previsto, de energías renovables. En la década de 2005-2015, la proporción de energías renovables en el consumo de energía de la UE prácticamente se duplicó, pasando del 9 % a cerca del 17 %.

Algunos sectores y países están marcando la pauta por lo que se refiere a la energía limpia. Sin embargo, a pesar de que su cuota de mercado se está reduciendo, los combustibles fósiles siguen siendo la fuente de energía dominante en Europa. La figura 23., muestra la energía demandada por los países de la UE para el año 2017, donde se encuentra como mayor consumidor Alemania, seguido de Francia, Inglaterra y España.

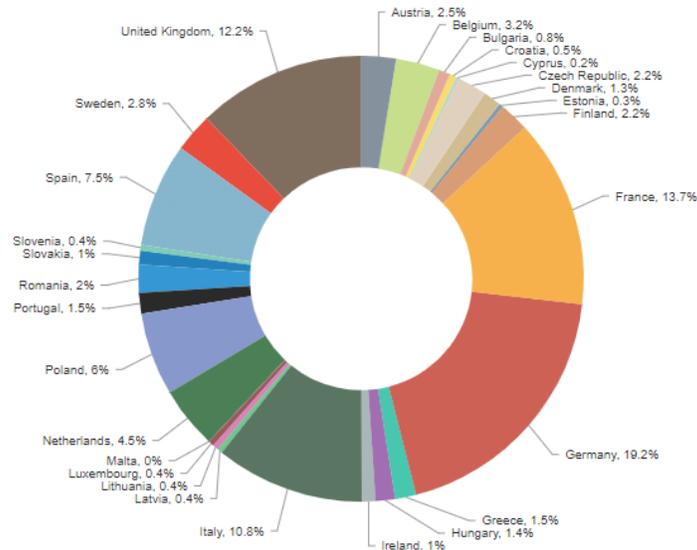


Figura 23. Energía final demandada en 2017 países de la Unión Europea  
Fuente: Comisión Europea, 2017 [19]

Dada la importancia del consumo de energía en los 28 países que conforman la UE, se ha puesto en marcha un conjunto de directivas de obligatorio cumplimiento para todos los países, entre los más significativos están la EPBD (Eficiencia energética de Edificios 2018) para crear en Europa una Unión de la Energía y así garantizar que los ciudadanos y las empresas de la UE tengan un suministro energético **seguro, asequible y respetuoso con el clima**. Otras de las estrategias importantes es la estrategia Europa 2020, una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador que propone, como uno de los cinco objetivos principales para la Unión Europea, conocido como 20-20-20:

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% respecto de 1990 con el compromiso bajo acuerdo internacional de elevar el objetivo hasta el 30%.
- Alcanzar el 20% de fuentes renovables en el consumo energético de la UE en 2020 y un 10% en el sector del transporte.
- Aumentar la eficiencia energética con el fin de ahorrar un 20% del consumo energético de la UE respecto de las proyecciones para el año 2020.

**1.3.4. Contexto de las edificaciones en Latinoamérica y el Caribe**

Las edificaciones en Latinoamérica y el Caribe en el 2017 [20], fueron responsables de aproximadamente el 21.8% del consumo energético (comercial, servicios y público 5.2%, construcción y otros 0.9% y residencial 15.7%) según datos de la Organización Latinoamericana de Energía OLADE. Además, el principal energético fue la Gasolina/Alcohol con un 19.4% de participación seguido por el Diesel Oil con un 19.0% y la electricidad con un 16.0%, como se presenta en la figura 24.

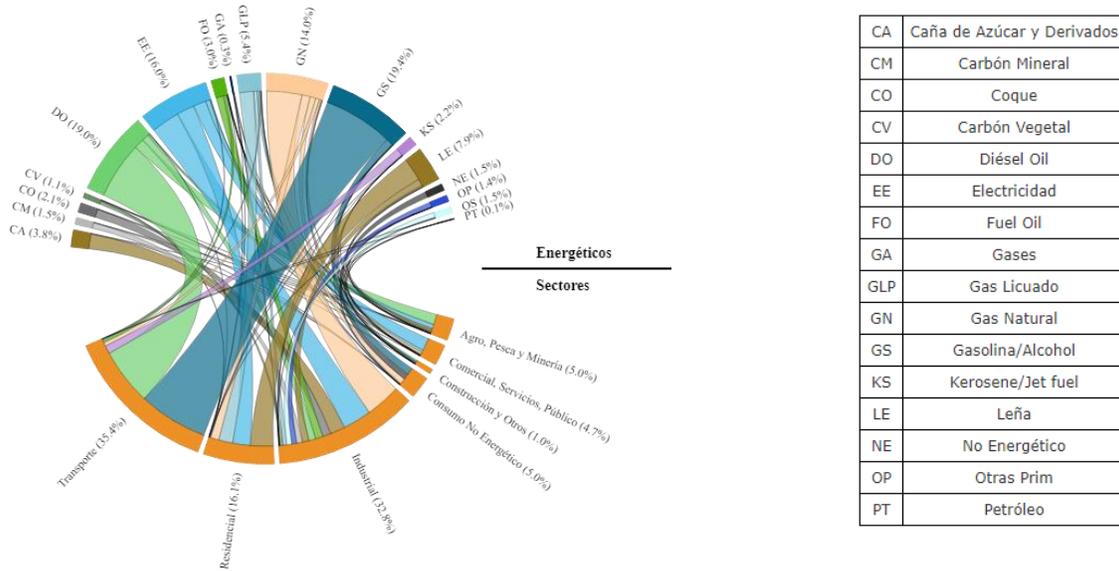


Figura 24. Participación del Consumo Final por Energético y Sectores: América Latina y El Caribe – 2017

Fuente: sieLAC-OLADE[20]

Las ciudades y edificaciones representan un gran reto (presente y futuro) para Latinoamérica y el Caribe, puesto que es la región más urbanizada del planeta, con casi el 80% de su población viviendo en las ciudades. Y, aunque las ciudades ocupan sólo el 3% de las tierras del planeta, son responsables de hasta el 80% del consumo de energía y del 75% de las emisiones de carbono [21].

Para el año 2018, los edificios en Latinoamérica [22] representaron el 24% del consumo total de energía final, y el 21% del total de emisiones de CO2 relacionadas con el proceso excluyendo las emisiones de la fabricación de materiales de construcción y productos como acero, cemento y vidrio, como se presenta en la Figura 25.



Figura 25. Porcentaje de consumo final y emisiones de GEI en las edificaciones en Latinoamérica  
Fuente: Latin America Roadmap for Buildings and Construction 2020-2050 [22]

Las emisiones de GEI generadas por los edificios crecieron más del 15% desde 2010. El contenido de carbono de la red eléctrica en América Latina es comparativamente bajo debido a la alta proporción de energía hidroeléctrica y al uso de biomasa tradicional en edificios en aproximadamente el 23% del consumo final total.

Para abordar las tendencias emergentes y hacer avanzar el sector de los edificios hacia una alta eficiencia y cero emisiones de carbono, se necesitan políticas efectivas que permitan abordar las barreras actuales del mercado y permitir la adopción de tecnologías de mejores prácticas. Sin embargo, el progreso en los códigos de energía de los edificios en la región está cambiando muy lentamente y no está alineado con la cantidad de edificios existentes o los nuevos edificios necesarios para satisfacer el crecimiento de la población.

Con políticas apropiadas en cuanto a su diseño e implementación, una gama de tecnologías rentables puede resultar en ahorros de energía y reducciones de emisiones hasta 2050. Enfocarse en el uso de sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación de alta eficiencia, técnicas de construcción adaptadas localmente y la adopción de bajo costo, eficiente la construcción de envolventes puede generar importantes ahorros de energía y reducciones de emisiones.

Los edificios juegan un papel dominante en la transición de la energía limpia, en este sentido la Agencia Internacional de Energía y la Alianza Global para los edificios y la construcción han construido una Hoja de ruta para América Latina [22] centrada en delinear los objetivos y los plazos necesarios para lograr un stock de construcción de cero emisiones, altamente eficiente y resistente desde ahora hasta 2050.

En la hoja de ruta se han establecido 8 actividades como áreas estratégicas y prioritarias para lograr el objetivo delimitado. Las actividades, el estado actual y las acciones necesarias hacia la meta a largo plazo y la meta a largo plazo son:

1. **Planeación urbana:** Utilizar políticas de planificación urbana para permitir una menor demanda de energía, aumentar la capacidad de energía renovable y mejorar la capacidad de recuperación de la infraestructura.

**Dónde está la actividad hoy**

Las decisiones y estrategias de planificación urbana no están integradas en todas las disciplinas.

**Acciones necesarias hacia la meta a largo plazo**

Mayor integración de disciplinas y partes interesadas en la planificación para incorporar energía, emisiones y equidad

**Meta a largo plazo**

Planificación integrada con planificación espacial eficiente para ciudades equitativas bajas en carbono.

2. **Nuevos edificios:** Aumentar la captación de emisiones netas de la operación de los edificios.

**Dónde está la actividad hoy**

Muchos países no cuentan con código obligatorio para requisitos mínimos de rendimiento energético de edificios nuevos

**Acciones necesarias hacia la meta a largo plazo**

NZEB operativo para 2030 para nuevos edificios.

Mayor adopción y aplicación de códigos y políticas de construcción

**Meta a largo plazo**

Todos los edificios nuevos operan con cero carbono neto

3. **Edificios existentes:** Aumentar la tasa de renovación de energía de los edificios y aumentar el nivel de eficiencia energética en los edificios existentes.

**Dónde está la actividad hoy**

Pocos edificios renovados con fines de rendimiento energético, falta de información de referencia.

**Acciones necesarias hacia la meta a largo plazo**

Aumento de la tasa y el alcance de la renovación, mayor etiquetado y divulgación

**Meta a largo plazo**

Todos los edificios operan con cero carbono neto

4. **Operaciones de edificios:** Reducir la energía operativa y las emisiones a través de herramientas mejoradas de gestión de energía y creación de capacidad operativa.

**Dónde está la actividad hoy**

Uso mínimo del rendimiento energético y gestión ambiental

**Acciones necesarias hacia la meta a largo plazo**

Adopción sostenida de herramientas, sistemas y estándares de rendimiento energético

**Meta a largo plazo**

Todos los edificios operan con cero carbono neto

5. **Electrodomésticos y sistemas:** Reducir la demanda de energía de los sistemas, electrodomésticos, iluminación y cocina.

**Dónde está la actividad hoy**

Baja penetración de iluminación, electrodomésticos y equipos eficientes

**Acciones necesarias hacia la meta a largo plazo**

Mejora en los sistemas de construcción a través de mejoras de rendimiento, estándares y una mayor conectividad

**Meta a largo plazo**

Uso generalizado y conocimiento de sistemas altamente eficientes

6. **Materiales:** Reducir el impacto ambiental de los materiales y equipos en los edificios y la cadena de valor de la construcción tomando un enfoque de ciclo de vida.

**Dónde está la actividad hoy**

Alto contenido de energía, emisiones y potencial de calentamiento global de materiales, poca concientización e información del impacto

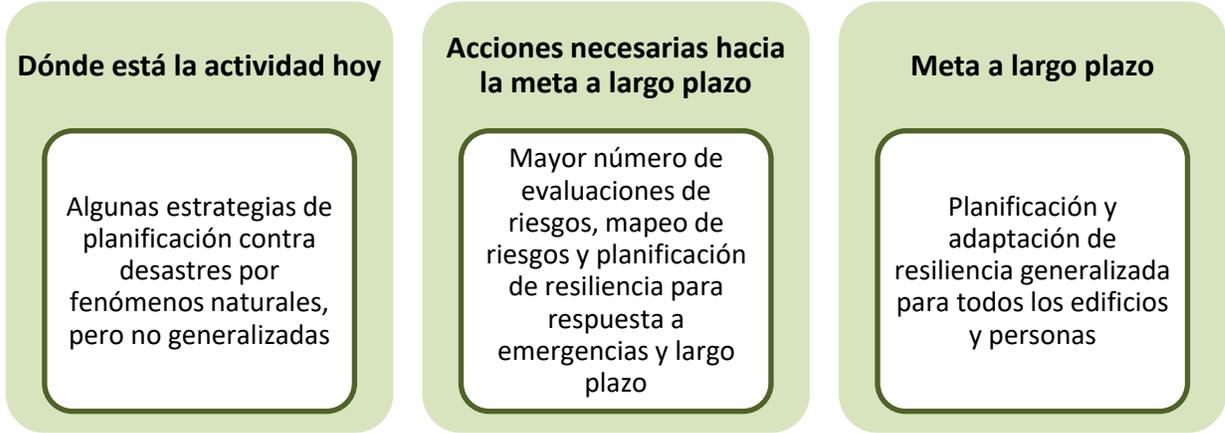
**Acciones necesarias hacia la meta a largo plazo**

Reducir la demanda de materiales con alto contenido de carbono, aumentar la eficiencia energética en la producción de materiales de construcción

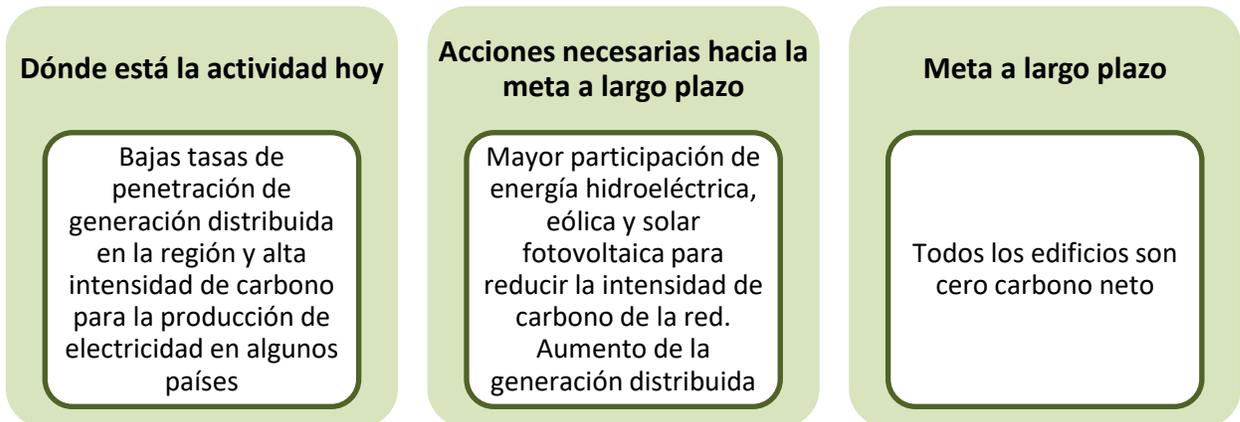
**Meta a largo plazo**

Uso generalizado de materiales bajos en carbono y divulgación del carbono incorporado

7. **Resiliencia:** Reducir los riesgos de construcción relacionados con el cambio climático adaptando el diseño del edificio y mejorando la resiliencia.



8. **Energía limpia:** Aumentar la energía segura, asequible y sostenible y reducir la huella de carbono de la demanda de energía en los edificios.



### 1.3.5. Contexto de las edificaciones en Colombia

#### ANTECEDENTES

Las edificaciones y su construcción, son considerados uno de los motores de crecimiento de la economía colombiana, para el 2017 la participación del sector en el producto interno bruto (PIB) de la economía colombiana fue de 4,9%, cifra que aumentó considerablemente si es comparada con la obtenida el en 2001, donde la participación del sector en el PIB fue de 1,8% [23].

En Colombia, el sector edificaciones según datos de la UPME (PAI PROURE, 2016) representa el 22% del consumo de energía final (16,71% sector residencial, 5,32% sector comercial y público y 0,03% en la construcción). Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

relacionados con las edificaciones residenciales representan un 10,5% de las emisiones totales. El crecimiento del sector, indica pues, que se presente un aumento en la emisión de GEI y residuos ligados a la construcción. Además, de la extracción y sobreconsumo de recursos y materia prima necesarios para la construcción.

Se estima que, para los próximos 35 años, lleguen a las ciudades colombianas aproximadamente 18 millones de nuevos habitantes, para los cuales el sector deberá tomar papel principal y generar la construcción de nuevas edificaciones, que generan impactos ambientales de suma importancia. Por tal razón es necesario la adopción de pautas que permitan minimizar los efectos negativos del sector en el país. Si bien, se han realizado y formulado lineamientos para apuntar a la sostenibilidad del sector, como lo son la *Resolución 0549 de 2015* del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, en donde se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones. La Norma Técnica Colombiana (*NTC 6112 de 2016, Sello Ambiental Colombiano*) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, por la cual se establecen criterios ambientales para el diseño y construcción de edificaciones con uso diferente a vivienda. No se cuenta con unos criterios de sostenibilidad integral a lo largo de las etapas del ciclo de vida de las edificaciones que le permita al país y al sector de la construcción enfrentar los retos que representa su crecimiento, además de considerar no solo las edificaciones futuras, sino, las edificaciones existentes.

En el *Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2014-2018* se establecieron tres objetivos para avanzar hacia el crecimiento verde en el país: (i) *avanzar hacia un crecimiento sostenible y bajo en carbono*; (ii) *proteger y asegurar el uso sostenible del capital natural y mejorar la calidad y gobernanza ambiental*; y (iii) *lograr un crecimiento resiliente y reducir la vulnerabilidad frente a los riesgos de desastres y al cambio climático*. Bajo estas iniciativas y en el mismo plan resulta la Misión de crecimiento verde, enfoque que busca un desarrollo sostenible que garantice el bienestar económico y social de la población en el largo plazo, asegurando que la base de los recursos provea los bienes y servicios ecosistémicos que el país necesita y el ambiente natural sea capaz de recuperarse ante los impactos de las actividades productivas, estrategia de Crecimiento Verde (PND 2014-2018). En este sentido y siguiendo las iniciativas anteriores, en el año 2018 se presenta el documento *Política Nacional De Edificaciones Sostenibles CONPES 3919* que busca articular las medidas anteriores en busca de un uso eficiente de los recursos del agua, la energía, el suelo, la madera y otros materiales hacia una economía circular para el sector de las edificaciones [24].

Las iniciativas que ha llevado a cabo el país relacionadas con sostenibilidad no son solo las presentadas anteriormente. En los últimos años (figura 26) se han llevado a cabo múltiples políticas, resoluciones, acuerdos y certificaciones en línea con el desarrollo sostenible principalmente en el sector de las edificaciones, tomando como referencia en algunas legislaciones locales e internacionales que tienen clara la necesidad de incorporar en las políticas nacionales parámetros de sostenibilidad en el sector.

A nivel nacional, las políticas de edificaciones sostenibles se han dividido en cinco grupos temáticos: i) políticas y programas de mitigación al cambio climático; (ii) lineamientos de sostenibilidad en el sector en las edificaciones a nivel nacional y en entidades territoriales; (iii) programas y experiencias de eficiencia energética y uso eficiente del agua; (iv) uso eficiente de materiales y residuos; (v) desarrollo urbano y suelo [24].



Figura 26. Antecedentes de la política nacional de edificaciones sostenibles

Fuente: Dirección de Desarrollo Urbano DNP

Entre los antecedentes principales se encuentra:

**i. Políticas y programas de mitigación al cambio climático**

*Estrategia Institucional para la Articulación de Políticas y Acciones en Materia de Cambio Climático en Colombia CONPES 3700 (2011)* [25], aunque no incluía dentro de su alcance acciones con respecto al sector edificaciones, contiene recomendaciones y objetivos estratégicos financieros e institucionales para incluir variables climáticas para la planificación y diseño de proyectos en desarrollo, en vía de implementar medidas de adaptación y mitigación contra cambio climático.

*La Estrategia Colombiana de Desarrollo en Bajo Carbono (ECDBC) (2011)*, es un programa del gobierno colombiano que busca equilibrar la relación del crecimiento económico nacional y las emisiones de gases de efecto invernadero, por medio de la planificación, diseño e implementación de medidas sectoriales a corto, mediano y largo plazo que mitiguen las emisiones de gases de efecto invernadero y sea mayor la eficiencia energética.

*La Política Nacional de Cambio Climático (PNCC) (2014)*, busca avanzar en el desarrollo resiliente al clima y bajo en carbono, con el fin de mitigar el cambio climático y sus riesgos. Incorporando dicha política a las decisiones que sean tomadas en los sectores públicos y privados. Además, considera la eficiencia energética en edificaciones y la necesidad de presentar incentivos para promover su inclusión, la construcción sostenible, la conservación de los paisajes verdes y diversidad ecológica. En este mismo sentido aparece la *Ley 1844 de 2017*, que aprueba y adopta el Acuerdo de Paris, por medio de compromisos nacionales que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), para lograr que la temperatura no aumente más de dos grados centígrados.

**ii. Lineamientos de sostenibilidad en el sector de las edificaciones a nivel nacional y entidades territoriales**

*Decreto 1285 (2015)*, Establece lineamientos generales de construcción sostenible para edificaciones, encaminados al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes y al ejercicio de actuaciones con responsabilidad ambiental y social.

*Resolución 0549 (2015)* [26], [27], Establece los porcentajes obligatorios de ahorro de agua y energía para el sector de las edificaciones en el país, lineamientos generales de sostenibilidad para edificaciones, conceptos asociados a la construcción sostenible, implementación de mesas interinstitucionales y reglamentación de la política. Además, de contener dos anexos: (i) *la Guía de Construcción Sostenible para el Ahorro de Agua y Energía en Edificaciones* y (ii) *el Mapa de clasificación del clima en Colombia para la identificación de los requisitos de la resolución según la característica del nivel térmico*. Esta normativa es

de cumplimiento obligatorio para edificaciones de centros educativos, oficinas, comerciales y viviendas, y aplica para licencias urbanísticas en la modalidad de obra nueva. Establece pautas como la implementación de medidas activas (inclusión de aparatos y tecnologías ahorradoras) y medidas pasivas (acondicionamiento arquitectónico).

En la actualidad se han implementado políticas de construcción sostenible en once municipios del país, entre ellos Bogotá y su *Política Pública de Ecourbanismo y Construcción Sostenible de Bogotá*, El valle de Aburrá y sus diez municipios con la *Política De Construcción Sostenible Del Valle De Aburrá* y Cali que se encuentra en etapa de construcción de su Política.

El Programa de Eficiencia Energética en Edificaciones, promovido e implementado por la alcaldía de Bogotá en alianza con el Instituto de Recursos Mundial (WRI) y el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS), promueve la eficiencia energética como oportunidad para una ciudad baja en carbono desde el sector de las edificaciones y su entorno urbano.

### **iii. Programas y experiencias de eficiencia energética y uso eficiente del agua**

#### **Eficiencia Energética**

Colombia ha desarrollado un marco político en torno a la eficiencia energética desde el año 2001 con la ley 697 (2001) que fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. Posteriormente, con el Decreto 3683 (2003) por la cual se crea una Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes no Convencionales CIURE.

En el 2010, el Ministerio de Minas y Energía, adoptó el Plan de Acción Indicativo (PAI) 2010-2015 para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PROURE), con metas y acciones de eficiencia energética por sector de consumo prioritario.

El PROURE establece e incorpora iniciativas de eficiencia energética que aplican al sector de edificaciones como: el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), Reglamento Técnico de Etiquetado (RETIQ), y Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP). Además, de proponer incentivos en vía de promover la eficiencia energética en vivienda, el diseño e implementación de planes de gestión eficiente de energía en entidades públicas y en el desarrollo de capacidades técnicas para los actores involucrados dentro del mercado de edificaciones sostenibles dentro de su plan de acción.

Ley 1715 (2014) por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, propone incentivos tributarios para la integración de energías renovables al sistema energético nacional como plan estratégico para la producción y consumo de energía.

Resolución 585 (2017) establece el procedimiento para conceptuar sobre los proyectos de eficiencia energética y gestión eficiente de la energía que se presenten para acceder al beneficio tributario.

Resolución 1988 (2017) establece que las solicitudes en materia de eficiencia energética se presentarán ante la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), para optar por la exclusión del impuesto sobre las ventas.

### **Uso Eficiente del agua**

La normativa colombiana ha sido desarrollada a partir de la *Ley 373 (1997)* por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua a través de la promoción de buenas prácticas por parte de los usuarios, la exigencia a los constructores y urbanizadores de incluir aparatos de bajo consumo de agua en los proyectos, y la obligación de los proveedores de servicios públicos de apoyar los procesos de implementación y uso de las tecnologías ahorradoras en el territorio.

Código Colombiano de Fontanería *NTC 1500 (2014)* guía para la inclusión de medidas asociadas al uso racional del agua, implementación de tecnologías ahorradoras.

*Uso eficiente de los materiales de construcción y residuos*

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec), ha establecido una serie de normas técnicas en vía de generar criterios ambientales para materiales de construcción, entre ellas se encuentran la Norma Técnica Colombiana (NTC) *6112 del 2016 del Sello Ambiental Colombiano (SAC)* para edificaciones diferentes a vivienda, las *NTC 6100, 2500 y 3489* relacionadas a materiales maderables, y la serie de guías de asistencia técnica para VIS del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial del 2011.

En 2012, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible desarrolla la guía de criterios ambientales para el diseño de la construcción de vivienda urbana en la que presenta lineamientos para el uso del agua, la energía, el suelo y los materiales para vivienda urbana. *Resolución 0472 (2017)* define los lineamientos para la gestión integral de residuos sólidos generados en las actividades de RCD.

*Documento CONPES 3874 Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos (2016)*, busca implementar medidas de prevención en la generación de recursos y reducir la disposición final a través de la promoción de la reutilización, aprovechamiento y tratamiento de los residuos.

A pesar de los esfuerzos realizados por el gobierno nacional, las normas técnicas y resoluciones no han sido lo suficientemente aplicadas dado que tienen un enfoque más orientador y voluntario en el sector de las edificaciones.

### **Desarrollo urbano y suelo**

Las edificaciones impactan su entorno inmediato según su ubicación y zona en la que se construyan por esta razón se han generado distintas iniciativas sobre los procesos de ocupación de estas construcciones.

*Ley 388 (1997)* establece un mandato para que todos los municipios del país formulen sus respectivos planes de ordenamiento territorial (POT), en esta se regula la utilización, transformación y ocupación del espacio en relación con las estrategias socioeconómicas, de medio ambiente y tradiciones históricas y culturales.

*Política de Gestión Ambiental Urbana (PGAU, 2008)* plantea entre sus objetivos principales, contribuir al mejoramiento de la calidad del hábitat urbano, asegurando la sostenibilidad ambiental de las actividades de servicios públicos, la movilidad, la protección y uso sostenible del paisaje y del espacio público, así como el de la infraestructura y la vivienda.

*Documento CONPES 3718 Política Nacional de Espacio Público (2012)* [28], busca la articulación a las políticas de adaptación al cambio climático, medio ambiente, gestión del riesgo, movilidad urbana, urbanismo y construcción sostenible, y manejo de drenajes urbanos.

Las políticas desarrolladas en aras del desarrollo sostenible, han sido enmarcadas en los escenarios internacionales como lo son: *el Acuerdo de París (COP21 - 2015)*, *los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS - 2016)* y *la Nueva Agenda Urbana (NAU – 2016)*.

El Acuerdo de París, establece el compromiso de reducir los GEI en un 20 % para 2030 y propone acciones de mitigación para evitar que la temperatura mundial supere los 2°C. Los ODS presentan acciones orientadas a solucionar las causas fundamentales de la pobreza y adoptan medidas para mejorar las condiciones sociales y ambientales de todos los países. El cumplimiento de estos objetivos está estrechamente relacionado con el aporte al acatamiento de las metas de la COP21 y se enmarca en los planteamientos de la Nueva Agenda Urbana (NAU).

La implementación de una política de edificaciones sostenibles, apunta a 9 de los 17 objetivos de desarrollo sostenible, presentados en la Figura 27.

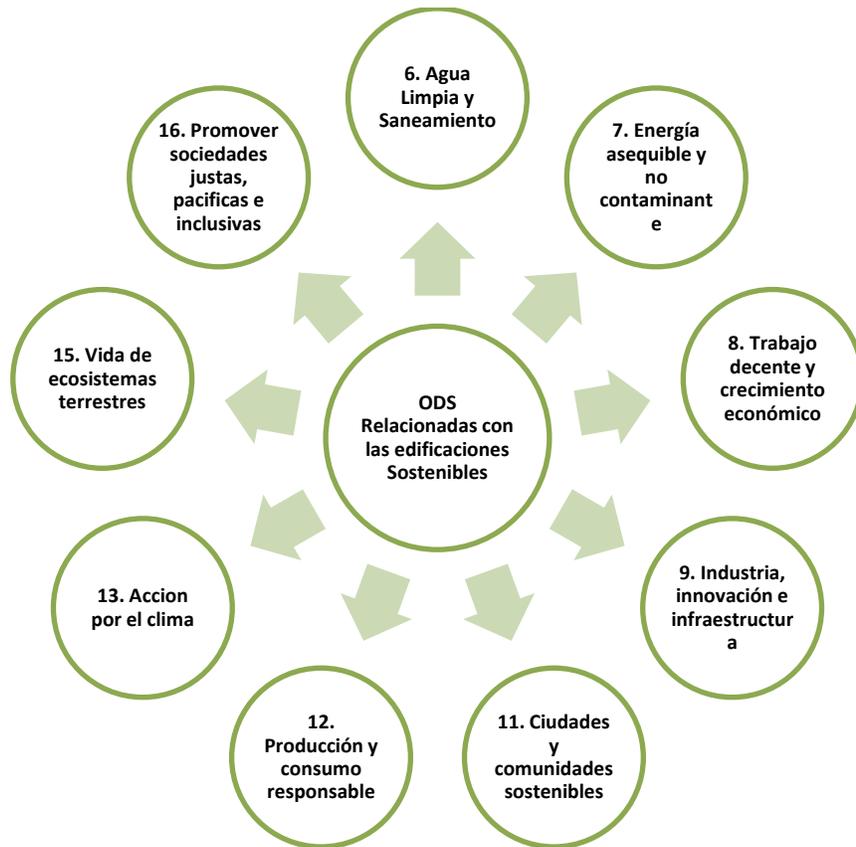


Figura 27. Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionadas con las edificaciones sostenibles  
Fuente: Dirección de Desarrollo Urbano DNP, basado en la ODS

Actualmente, Colombia no ha implementado un sistema de incentivos económicos y/o tributarios para fortalecer la sostenibilidad en edificaciones nuevas y existentes. Sin embargo, diversos proyectos de construcción (viviendas, edificios educativos, edificios de instituciones gubernamentales) han adoptado de forma voluntaria los objetivos de construcción sostenibles y buscado su certificación bajo los estándares internacionales.

Dentro de los sellos de certificación sostenibles usados en Colombia se encuentran:

- REFERENCIAL CASA COLOMBIA: Herramienta de certificación voluntaria [29], propuesta por el Centro Colombiano de Construcción Sostenible en 2016. Su objetivo es impulsar la incorporación de criterios de sostenibilidad, transformando la construcción de viviendas y edificaciones en el país alineado con las políticas nacionales de crecimiento verde. Siguiendo un concepto de sostenibilidad integral en donde se reúne el uso eficiente de los recursos, teniendo en cuenta la salud y el bienestar de los ocupantes.

- LEADERSHIP IN ENERGY AND ENVIRONMENTAL DESIGN – LEED: El sistema de certificación LEED [30], [31] fue creado para proporcionar un estándar nacional de edificaciones y de certificación voluntaria en los EE. UU por el US Green Building Council (USGBC) en el año 2000, actualmente ha ampliado su influencia a más de 160 países, considerándose uno de los estándares de calificación y certificación de construcción ecológica más usados en todo el mundo. Ha certificado más de 90 000 proyectos a nivel mundial.
- BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT ENVIRONMENTAL ASSESSMENT METHODOLOGY – BREEAM: Creado en 1990 por el Building Research Establishment (BRE) [32] del Reino Unido, fue el primer sello de certificación desarrollado después del Protocolo de Kyoto. Este sello es una herramienta que mide la sostenibilidad de distintos tipos de edificaciones, nuevas y existentes y se enfoca en los impactos de las edificaciones en su entorno.

Dentro de los proyectos certificados en Colombia, se encuentran: 520 apartamentos de viviendas social del proyecto Piamonte en Madrid, Cundinamarca [33]; edificio del Centro Administrativo Nacional en Bogotá [34]; Institución Educativa Gabriel García Márquez Sede Panorama, en Yumbo, Valle del Cauca [35]; Universidad Nacional de Colombia en Tumaco, Tumaco Pacífico Campus.

### **LAS EDIFICACIONES Y SU CONCEPCION NACIONAL**

La Ley 400 (1997) establece que una edificación es una construcción cuyo uso primordial es la ocupación por seres humanos, y su producción y consumo están determinados por las etapas dentro del ciclo de vida. Y que, su desarrollo sostenible proviene del equilibrio de *sostenibilidad económica* (asequibilidad, empleo, innovación), *sostenibilidad ambiental* (uso racional de agua, energía y materiales., generación de pocos residuos) y *sostenibilidad social* (accesibilidad, inclusión, ambientes saludables y sanos). Es entonces, que una edificación sostenible es aquella que hace uso de energía, agua y materiales de un modo eficiente, adecuada a su ubicación, y provee confort, salud y bienestar a sus usuarios.

En el crecimiento económico del país tiene gran influencia el sector edificaciones, influyendo en el PIB total del país (figura 28), con un crecimiento anual del 4,1% (2011-2017). Así mismo, el sector de la construcción es una importante fuente de empleo, ocupando un total de 1,4 millones de trabajadores, lo que representa el 6,3 % del total de la fuerza laboral del país [36].

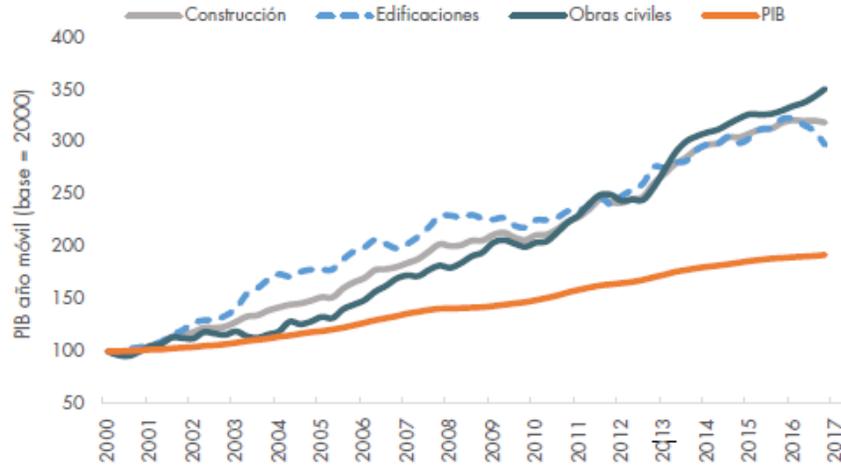


Figura 28. Índice del PIB total y construcción 2017  
Fuente: Cálculos DNP con base en cuentas trimestrales DANE

Si bien, el crecimiento del sector edificaciones representa un crecimiento en la economía nacional, también representa un incremento en el consumo de recursos (energía, agua, madera, pétreos entre otros) y a su vez aumento en las emisiones de GEI, residuos sólidos y aguas residuales. A nivel mundial entre 1970 y 2014 se incrementaron en un 70% las emisiones de GEI y las edificaciones contribuyen con más del 30% de las mismas [1].

Las emisiones directas de GEI para el año 2016 presentadas por el Ideam [37] (figura 29), deja ver que el sector de construcción presenta el 15% de las emisiones y un 4% de las mismas son producto de las actividades residenciales y comerciales.

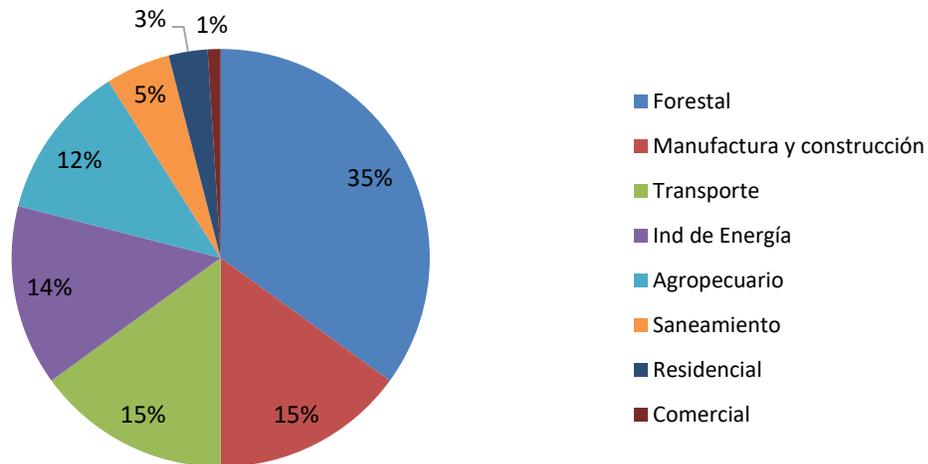


Figura 29. Emisiones directas de GEI por sector 2016  
Fuente: Inventario nacional de GEI – Colombia [37]

Por medio del Balance Energético Colombiano (BECO) para el año 2016, se estima que la energía no aprovechada representa un 6.3% del consumo nacional anual, representado en aproximadamente USD 4.700 millones. El sector edificaciones constituye un 22.04% del consumo. La figura 30 presenta la participación porcentual del consumo nacional de energía por sector [38].

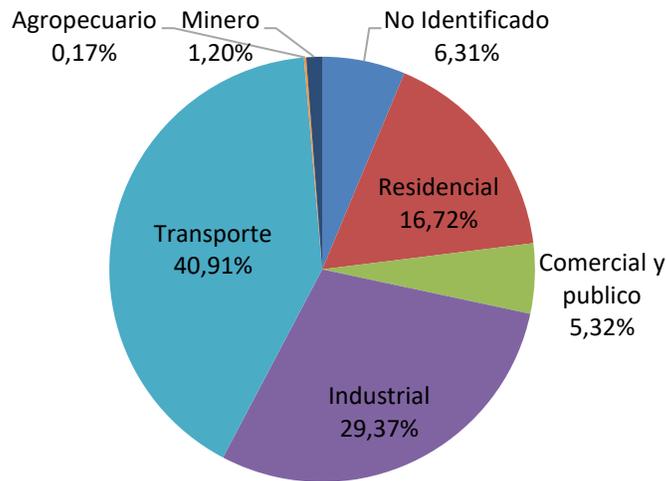


Figura 30. Consumo Nacional de Energía  
Fuente: Ministerio de Minas y energía, y UPME - PROURE 2017

El sector residencial de las principales áreas urbanas representa un consumo del 8.2% del consumo anual de agua según datos presentados por el Ideam y el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible [39].

A nivel mundial, más de diez mil tipos de materiales son usados en las diversas etapas de construcción de edificaciones, en su mayoría son de origen minero [2] lo cual representa una presión importante en la extracción de recursos naturales a escala global.

En Colombia, la demanda de materiales de construcción la componen: 19% obras civiles, 14% sector edificaciones, 61% cadena de distribución y 6% por la industria [40].

Según los datos presentados anteriormente, las edificaciones representan altos consumos de los diferentes recursos naturales. Por esta razón, el establecer políticas en vía de hacerlos cada vez más sostenible tiene la capacidad para generar ambientes más saludables y confortables, aumentar la calidad habitacional y los niveles de satisfacción y productividad en el trabajo en sus ocupantes. Las determinantes que definen las características de calidad de un inmueble están definidas además en las medidas activas (sistemas operativos) y pasivas (diseño arquitectónico), entre las que se incluye la localización, las determinantes

del sitio, así como criterios de asequibilidad, accesibilidad, seguridad jurídica de tenencia y adecuaciones culturales de ocupación, entre otros.

En términos de consumo, las edificaciones están catalogadas en el sector servicios o terciario que corresponde a edificaciones de uso comercial, educativo, hoteles, restaurantes, entre otros. Los consumos de este sector según la UPME [38] se muestran en la figura 31, donde el mayor energético consumido es energía eléctrica con un 66.24%, seguido de Gas Natural con un 28.92% y el GLP con 4.84%. Los principales usos de la electricidad son: iluminación (31%), aire acondicionado (22,8%) y refrigeración (13,9%) (Figura 32).

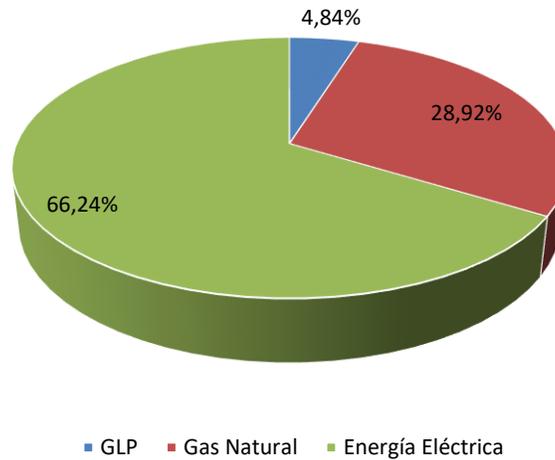


Figura 31. Consumo de energía eléctrica, gas natural y GLP en el Sector Terciario  
Fuente: UPME – PAI PROURE, 2016

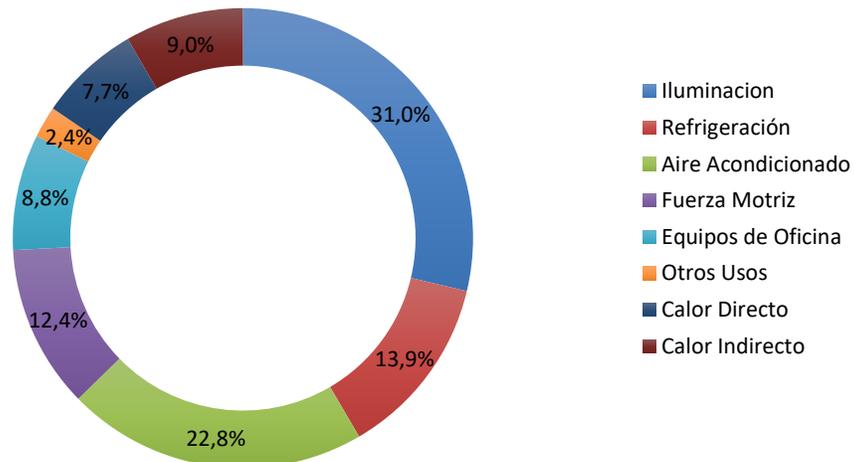


Figura 32. Usos de la electricidad en el Sector Terciario  
Fuente: UPME – PAI PROURE, 2016

Como estrategia para la implementación de la política nacional de ahorro de agua y energía en nuevas edificaciones (Resolución 0549 de 2015), el Depto. Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) de la alcaldía de Santiago de Cali buscó cooperación internacional con el programa Acelerador de Eficiencia Energética en Edificaciones (Building Efficiency Accelerator, BEA) de la iniciativa Sustainable Energy for All (SE4ALL) de la Organización de las Naciones Unidas. El programa BEA es una alianza público-privada de ciudades, empresas y organizaciones que comparten el objetivo de mejorar la eficiencia energética en edificaciones con el fin de reducir la huella urbana de la construcción al 2030., [41], [42]. Dicha cooperación dio como resultado la construcción del **Manual de construcción Sostenible para el área urbana de Santiago de Cali** que fue aprobado y adoptado bajo la Resolución 1529 del 24 de diciembre de 2019 [43], [44].

El Manual de Construcción Sostenible producto final de cooperación internacional y el aporte de diversos estamentos de la sociedad como organismos municipales, la academia, una selección de gremios asociados y de las entidades dedicadas a la construcción., presenta un instrumento dinámico y de carácter continuo que se erige como respuesta por parte del Municipio de Santiago de Cali en cabeza del DAGMA de cara a la ciudadanía para tratar, debatir, concertar y dar soluciones a los temas derivados de la gestión del medio ambiente en el sector de la construcción. En él se recogen y establecen los primeros aportes y directrices de las temáticas:

- Ahorro de energía y uso de energías alternativas.
- Ahorro de agua, reutilización de aguas, tratamiento de aguas residuales y aprovechamiento de aguas lluvias y/o aguas condensadas.
- Uso de materiales reciclables en la construcción.
- Adaptación climática.
- Protección de la biota y emplazamiento de coberturas vegetales en la construcción.

El panorama expuesto anteriormente plantea la importancia que, para un país como Colombia, significa avanzar en temas de investigación, que aporten a la disminución de consumo de energético, emisiones y que conduzcan acciones para mejorar la eficiencia energética no solo desde las políticas energéticas del sector de las edificaciones, sino también desde la normativa. De igual modo compromete el monitoreo permanente de indicadores de desempeño energético, que nos permitan una información en la gestión del consumo energético en las edificaciones sostenibles.

El objetivo de este trabajo de investigación consiste en estudiar Herramientas de gestión energética para el desarrollo sostenible en edificaciones aplicado a un campo en Colombia. a través de una metodología que permite evaluar e integrar indicadores de desempeño energético según la disponibilidad de medición y la incorporación de elementos de simulación, que puedan incorporarse a un sistemas de gestión energética brindando elementos metodológicos que permitir estimar líneas bases e indicadores energéticos

acorde a las condiciones operativas de las edificaciones y con un nivel de precisión que posibilite tener certeza de los ahorros estimados y metas energéticas proyectadas mediante la validación estadística . Siendo un aporte para quienes administran o hacen seguimiento energético en una edificación. De igual forma constituye una contribución a organismos normativos como la ISO o UNE en lo concerniente a implementación de líneas bases e indicadores energéticos elementos importante para implementar un sistema de gestión en una edificación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] PNUMA, “Building and Climate Change”, Paris, 2009.
- [2] PNUMA, “Greening the Building supply chain. Sustainable Building & Climate Initiative”, Paris, 2014.
- [3] United Nations, “World Urbanization Prospects: The 2014 Revision”, 2014.
- [4] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2017”, 2018.
- [5] BP Energy, “BP Energy Outlook | Economía energética”, 2018.
- [6] Exxon Mobil Corporation, “2017 Outlook for Energy”, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/outlook-for-energy/2017/2017-outlook-for-energy.pdf>.
- [7] I. International Energy Agency, “Energy Technology Perspectives 2012. Pathways to a Clean Energy System”, Paris, 2012.
- [8] International Energy Agency, “Global Status Report 2017 United Nation Environment and International Energy Agency: Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector”, 2017.
- [9] International Energy Agency, “Building Energy Efficiency Policies”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/beep/>. [Consultado: 16-jul-2018].
- [10] International Energy Agency, “Building Energy Efficiency Policies”. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/beep/>.
- [11] Building Energy Research Center y Tsinghua University, “China Building Energy Use 2016”, Tsinghua, 2016.
- [12] IEA; BERC, “Transforming Construction and Influencing Consumption to 2050”, Beijing, 2015.
- [13] Li, “Report on the Work of the Government 2016”, Beijing, 2016.
- [14] NBS, “China Statistical Yearbook on Construction 2015”, Beijing, 2015.
- [15] IEA, “Indicadores de Eficiencia Energética: Bases Esenciales para el Establecimiento de Políticas”, *Agencia Int. Energía*, p. 182, 2015.
- [16] State Council, “Energy Development Strategy Action Plan”, Beijing, 2014.
- [17] State Council, “National Plan on New Urbanisation for 2014 to 2020”, Beijing, 2014.
- [18] E. OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, “Estrategic goals 2016 – 2020 in US”, Washington, 2015.
- [19] Comisión Europea, “Unión Europea en Datos”, 2017.
- [20] Organización Latinoamericana de Energía, “Participación del Consumo Final por Energético y Sectores: América Central”, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://sier.olade.org/consultas/tablero-participacion-consumo-energetico-sectores.aspx?or=603&ss=2&v=3>. [Consultado: 16-jul-2018].
- [21] J. Marczak, P. Engelke, D. Bolh, y A. Saldarriaga-Jiménez, “América Latina y el Caribe 2030 : Escenarios futuros”, 2016.
- [22] IEA, “Latin America Roadmap for Buildings and Construction 2020-2050”, 2019.
- [23] DANE y Ministerio de Minas y Energía, “PIB anual en precios constantes (tercer trimestre 2017). El cálculo corresponde a la Tasa de Crecimiento Anual Compuesta

- (TCAC) entre el acumulado doce meses con corte al tercer trimestre de los años 2001 y 2017.”, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad>.
- [24] Consejo Nacional de Política Económica y Social - CONPES, *Política Nacional De Edificaciones Sostenibles CONPES 3919*. Bogotá, 2018.
- [25] República de Colombia, *Conpes 3700 - ESTRATEGIA INSTITUCIONAL PARA LA ARTICULACIÓN DE POLÍTICAS Y ACCIONES EN MATERIA DE CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA*. 2011, p. 75.
- [26] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, *Resolución 0549 de 2015*. Colombia, 2015, p. 9.
- [27] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, *Anexo 1. Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones*. Bogotá, Colombia, 2015, p. 89.
- [28] República de Colombia, *Conpes 3718 - Política Nacional de Espacio Público*. 2012, p. 41.
- [29] Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS, “Referencial CASA Colombia”. [En línea]. Disponible en: <https://www.cccs.org.co/wp/referencial-casa-colombia/>.
- [30] U.S. Green Building Council, “Projects LEED”. [En línea]. Disponible en: <https://www.usgbc.org/projects/>.
- [31] Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS), “Programa LEED® en Colombia”. [En línea]. Disponible en: <https://www.cccs.org.co/wp/capacitacion/talleres-de-preparacion-leed/>.
- [32] BREEAM, “BREEAM: el método de evaluación de sostenibilidad líder en el mundo para proyectos de planificación maestra, infraestructura y edificios - BREEAM”. [En línea]. Disponible en: <https://www.breeam.com/>.
- [33] “Noticias | PRODESA”. [En línea]. Disponible en: <http://www.prodesa.com/noticias/piamonte-prodesa-obtuvo-certificado-hqe/>. [Consultado: 16-jul-2019].
- [34] Agencia Nacional Inmobiliaria Virgilio Barco Vargas y Presidencia de la República, “Informe de Sostenibilidad del primer Edificio del Centro Administrativo Nacional”, 2017.
- [35] Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS, “Primer Colegio con Estandares LEED en Yumbo”, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.cccs.org.co/wp/2016/06/07/en-yumbo-se-construye-el-primer-colegio-publico-con-estandares-leed/>.
- [36] DANE, “Gran Encuesta Integrada de Hogares (serie trimestre móvil 01-17 con corte a diciembre). Incluye obras civiles.”, 2017.
- [37] Ideam y UPME, “Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero - Colombia”, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>.
- [38] Ministerio de Minas y Energía y Unidad de Planeación Minero Energética, “Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética PAI-PROURE 2017 - 2022”, Bogotá,

- Colombia, 2016.
- [39] Ideam, “Estudio Nacional del Agua 2014”, Bogotá, 2014.
- [40] UPME, “Evaluación de la situación actual y futura del mercado de los materiales de construcción y arcillas en las ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta y eje cafetero”, Bogotá, 2014.
- [41] Alcaldía Santiago de Cali, “Cali recibirá cooperación internacional para el Manual de Construcción Sostenible”, *30 Mayo 2019*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.cali.gov.co/gobierno/publicaciones/147691/cali-recibira-cooperacion-internacional-para-el-manual-de-construccion-sostenible/>. [Consultado: 21-may-2020].
- [42] Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS, “Lanzamiento de las estrategias nacional y sub-nacional de eficiencia energética en edificaciones para ciudades BEA en Colombia – Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS”, *Mayo 27 de 2019*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.cccs.org.co/wp/2019/05/27/lanzamiento-de-las-estrategias-nacional-y-sub-nacional-de-eficiencia-energetica-en-edificaciones-para-ciudades-bea-en-colombia/>. [Consultado: 21-may-2020].
- [43] DAGMA y Alcaldía Santiago de Cali, “Manual de Construcción Sostenible para el área urbana de Santiago de Cali”, Cali, 2019.
- [44] Alcaldía Santiago de Cali, *Resolución 1529 del 24 de diciembre de 2019*. Colombia, 2019, p. 7.
- [45] J. H. Wilson y B. Keating, *Pronósticos para los negocios con ForecastX basado en inglés*, 5a ed. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [46] Ministerio de Fomento, *Documento de bases para la actualización del Documento Básico DB-HE*. España, 2016, p. 13.
- [47] UPME, “BALANCE ENERGETICO COLOMBIANO - BECO”. [En línea]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/BalanceEnergetico.aspx>. [Consultado: 07-may-2020].

## **CAPÍTULO 2: SISTEMA DE GESTIÓN ENERGÉTICA. HERRAMIENTAS DE LA PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA**

En este capítulo se describe la importancia de un sistema de gestión energética SGEN y la relación que se tiene con aspectos normativos. De igual forma se describen las herramientas y técnicas utilizadas para el desarrollo de los procesos de planificación energética y algunos de los componentes más significativos, como es el caso de la revisión energética y aspectos descriptivos en lo que se refiere a los conceptos de líneas de base e indicadores energéticos y su aporte en el mejoramiento de la eficiencia energética en edificaciones.

Algunos antecedentes de aplicación de la norma en distintos sectores señalan que las Investigaciones actuales se centran en estudios relacionados al desempeño y la gestión energética, basados en la norma ISO 50001. Se estima que la norma ISO 50001, aplicada a los distintos sectores económicos, podría influir en un ahorro de hasta un 60% en el consumo de energía del mundo [1]. La reducción de este consumo de energía es fundamental para que los países logren sus compromisos nacionales e internacionales de reducción de gases de efecto invernadero [2].

La gestión energética se ha convertido en pieza clave para el desarrollo del sector industrial como un enfoque estructurado para reducir el costo de producción y reducir la huella de carbono. Con el desarrollo del estándar ISO 50001, la gestión de la energía ha atraído la atención del nivel superior de gestión en términos de mejora continua, como lo establece Kanneganti et al. [3]. En cuanto a la implementación de los lineamientos de la norma, Gopalakrishnan et al. [4] desarrolló una herramienta de software que facilita el desarrollo de un sistema de gestión de energía compatible con ISO 50001. El software está diseñado para ser una guía de referencia para consultores de gestión de energía para ayudar a las plantas de fabricación a comprender y cumplir con los requisitos de la norma ISO 50001.

McKane et al. [2] presenta una metodología para establecer los impactos de la implementación de la norma ISO 50001, para ello ,se estudió un caso proyectado a 2030 bajo un escenario del 50% del consumo mundial de energía para el sector industrial y de servicios con gestión de la norma ISO 50001, generaría ahorros de energía primarios acumulados de aproximadamente 105 EJ, ahorros de costos económicos de casi US \$ 700 mil millones, y la reducción de 6500 millones de toneladas métricas (Mt) de emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas. Casos de desarrollos y estudios aplicados presentan información valiosa de la implementación de la norma en distintas partes del mundo, Benedetti et al. [5] presenta una metodología para gestionar el rendimiento energético mediante el desarrollo, análisis y mantenimiento de indicadores de rendimiento energético en plantas de fabricación ,teniendo en cuenta los requisitos de ISO 50001: 2011 e ISO 50006: 2014, la metodología propuesta permite una identificación inmediata de las desviaciones de rendimiento energético de la planta de fabricación a través del monitoreo de los Indicadores de

rendimiento energético a lo largo del tiempo y la identificación de posibles causas y responsabilidades de dichas desviaciones. Pelser et al. [6] desarrolló e implementó un informe de rendimiento energético automatizado que abarca la verificación de la planificación de la norma ISO 50001 en una planta sudafricana, donde el costo de energía eléctrica se redujo en un 25%. Las consultas cualitativas confirmaron que el sistema promueve la implementación de las prácticas de gestión ISO 50001, permite monitorear el rendimiento energético de los equipos y mejorar continuamente las operaciones. Bonacina et al. [7] ilustró el estado de implementación de las certificaciones ISO 50001 en Italia, el panorama general muestra que Italia, uno de los países líderes en políticas de eficiencia energética, sufre una demora significativa en la implementación de los EnMS en la industria.

La definición de indicadores de rendimiento energético, el establecimiento de líneas de base energética y un plan de monitoreo constituyen los requisitos más críticos para el cumplimiento de las empresas. Aproximadamente el 35% de las empresas certificadas en ISO 50001 han recibido beneficios en términos de ahorro de energía por encima del 5%, lo que aumenta la competitividad de la empresa. Jovanović et al. [8] estudió la implementación de la norma ISO 50001 en 52 empresas de los sectores industriales prioritarios en Serbia y establecido el nivel de cumplimiento de las empresas para cada etapa de la norma. En general el cumplimiento es del 59,05%, los resultados del estudio ofrecieron datos científicos para mejorar la política nacional y la educación sobre la gestión de la energía en Serbia.

Además de la implementación de la norma y sus casos exitosos en cuanto a los sistemas de gestión y ahorros energéticos, es importante conocer los estudios realizados sobre los factores. Da Silva y Mil-Homens [9] realizan una evaluación sobre la efectividad al implementar la norma ISO 50001 desde el punto de vista del desarrollo sostenible, las brechas encontradas y las mejoras capaces de satisfacer dichas brechas. Posteriormente los resultados encontrados fueron propuestos a 146 expertos en SGen quienes por medio de encuestas opinaron y validaron el estudio llevado a cabo con una concordancia positiva del 64,4%. Cooremans y Schonenberger [10], presentan el proyecto de investigación "La gestión como motor clave del rendimiento energético" donde se buscaba comprender cómo las empresas de consumo de energía a gran escala en Suiza toman decisiones de inversión en eficiencia energética. Se encontró que cuando la eficiencia energética se percibe como estratégica, las empresas tienden a tener un alto nivel de gestión energética. Cuanto mejor sea el sistema de gestión de energía, mayores serán las posibilidades de una decisión positiva sobre la inversión en eficiencia energética. La investigación desarrollada por Sousa et al. [11] caracterizó el proceso de difusión de la norma ISO 50001 en todo el mundo y estableció los principales factores que determinan la adopción de EnMS en las diferentes regiones del planeta, teniendo en cuenta el número de certificaciones e indicadores ambientales, energéticos, sociales, económicos, y cambio climático. Se observó que Europa tiene el mayor número de certificaciones ISO 50001 y Asia es la región de más

rápido crecimiento. Alemania y el Reino Unido son los países con mayor difusión de ISO 50001.

## **2.1. IMPORTANCIA DE UN SISTEMA DE GESTIÓN ENERGÉTICA SGen**

La mayor importancia de un SGen consiste en lograr el uso eficiente y eficaz de la energía, consiguiendo reducir los costes de producción en la industria y de servicios en las edificaciones, aumentando las ganancias y alcanza una mejora la posición competitiva de las empresas.

La Gestión Energética ha ido obteniendo cada vez más importancia a nivel mundial, pues además de aumentar las utilidades de la empresa, permite reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, contribuyendo a evitar el cambio climático; así, actualmente se constituye en una parte imprescindible de la gestión empresarial. La importancia estratégica de la gestión energética es reconocida por la Norma ISO 50001 Energy Management Systems, que declara que su implementación es un tema estratégico y debe ser tratado por los niveles más altos de la organización. Esto significa que un SGen es un subsistema que debe de integrarse a los otros Sistemas de Gestión Empresarial (Sistema de Gestión de Calidad, Sistema de Gestión ambiental, Sistema de Higiene y Seguridad Industrial, etc.). Así, cuando el SGE es una parte del Sistema Integrado de Gestión de la empresa, la organización concibe a la eficiencia energética como el logro de los requisitos establecidos por el cliente con el menor gasto energético posible y la mínima contaminación ambiental.

Son muchos los beneficios que la implementación de un SGE aporta a la empresa, entre ellos están:

- ✓ Organizar las áreas de la empresa con el objetivo de medir, controlar y reducir el gasto energético.
- ✓ Conocer los procesos y puntos claves de ahorro y gasto.
- ✓ Establecer la Línea de Base Energética de cada proceso, para planificar y fijar metas reales en la reducción del consumo energético.
- ✓ Identificar las variables que afectan la eficiencia del proceso, y generar procedimientos de actuación sobre las mismas.
- ✓ Establecer y monitorear los indicadores de desempeño energético de los procesos.
- ✓ Identificar las mejores prácticas operacionales y convertirlas en hábitos.
- ✓ Asegurar la conformidad del SGE con la política de la empresa.
- ✓ Reducir la contaminación ambiental (al disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>), lo que además mejora la imagen de la compañía.

- ✓ Cultivar buenas comunicaciones sobre el tema de la energía, desarrollando interés y dedicación en todos los empleados hacia el programa de gestión de la energía.
- ✓ Posibilidad de obtener la certificación de la ISO 50001, la ISO 14001 y el reconocimiento asociado.
- ✓ Identificar y aplicar medidas de cambios tecnológicos de baja, media y alta inversión.
- ✓ Tener procedimientos de planeación y coordinación operacional de la producción para minimizar el consumo energético.
- ✓ Tener herramientas para hacer benchmarking del índice de consumo y costo de la energía.
- ✓ Reducir el impacto de reducciones totales o parciales, o cualquier interrupción en el suministro de energía.
- ✓ Aprovechar las oportunidades de exoneración tributaria por participación en programas de Investigación, Desarrollo e Innovación, I+D+i, sobre eficiencia energética.

## **2.2. DESARROLLO DE UN SGEN Y DE LA NORMA ISO 50001**

La tendencia que se impuso a nivel mundial con el objetivo de avanzar hacia la eficiencia energética en el sector industrial y de servicios en edificios, fue la implementación de los SGEN. Así, desde el año 1982, muchos países habían adoptado normas nacionales de gestión energética. Entre los países pioneros en esta tendencia, tenemos a Japón, Corea, Australia, Canadá, China, USA (con la MSE 2000), Dinamarca, Suecia, Holanda, etc. En Colombia, en el 2007 se propuso el Sistema de Gestión Integral de la Energía -SGIE- y una norma de gestión energética, y en el 2009 se formó el Comité Técnico 228 Gestión Energética de Icontec. El resultado más destacado, en este proceso global, se logró cuando representantes de procesos de normalización y expertos en políticas energéticas de los cinco continentes, acordaron la formulación de una norma internacional, la ISO 50001 (Energy Management Systems), publicada oficialmente en el 2011. Reconociendo la necesidad de adaptarla a los contextos tecnológicos, socioculturales y económicos de cada país, esta Norma se constituye en el marco definitivo para la aplicación de los SGEN. Actualmente Desde el pasado 20 de agosto de 2018 se publicó la nueva versión de la ISO 50001, sistema de gestión energética. Esta versión que suple a la anterior de 2011, presenta cambios orientados a ayudar a desarrollar e implementar prácticas con el fin de conseguir una mejora en el desempeño energético y un aumento de la eficiencia energética, puesto que presenta un mayor énfasis en la responsabilidad del liderazgo, aclara conceptos clave relacionados con el rendimiento energético, y favorece la compatibilidad con ISO 14001, ISO 9001, y otros estándares del sistema de gestión ISO [12].

En la Figura 33 se presenta el desarrollo de las normas de sistemas de gestión a nivel mundial.

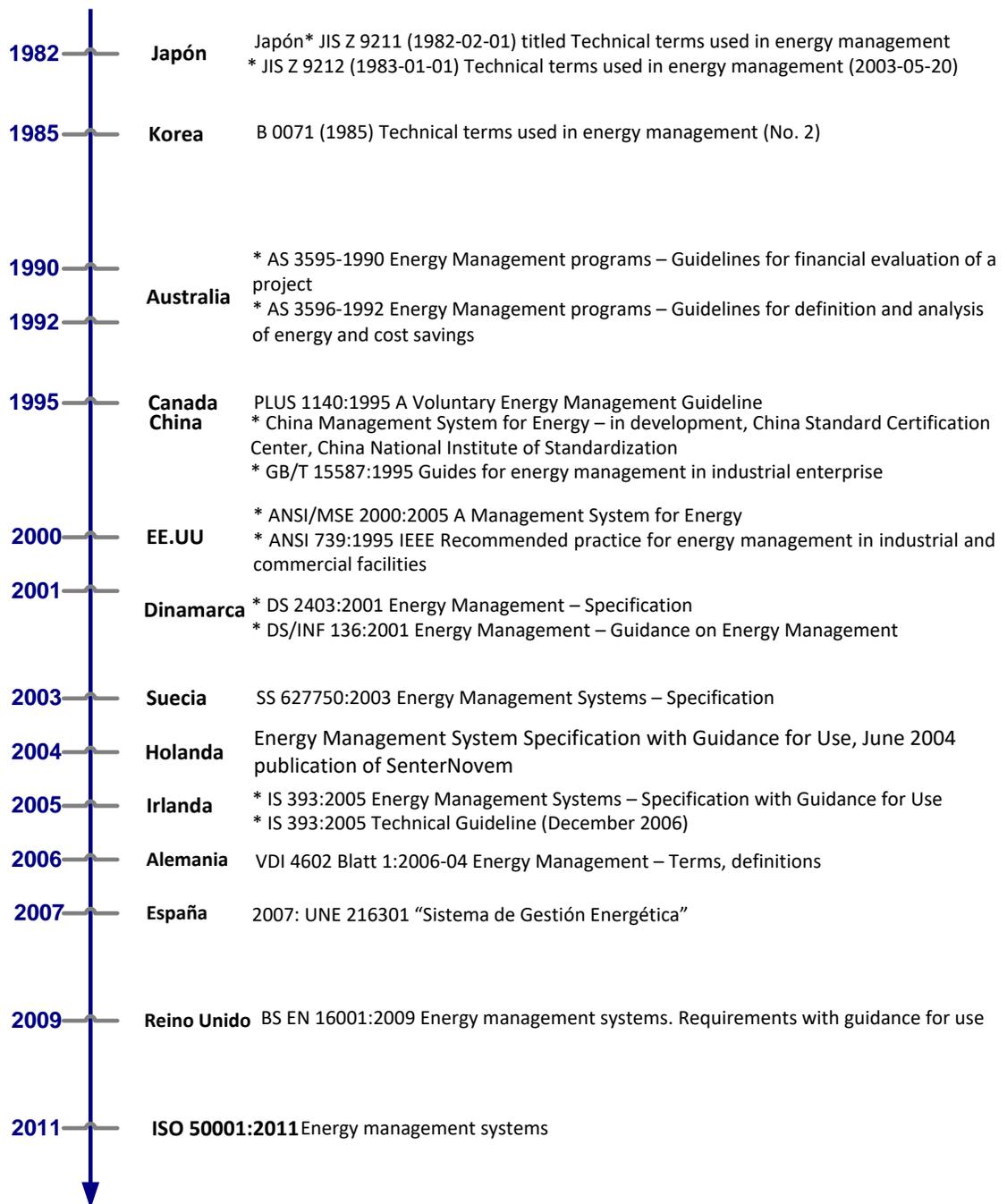


Figura 33. Desarrollo de las normas de un SGen a nivel mundial

Fuente: ISO 50001: avanzando hacia la implementación de la norma internacional

A continuación, se presenta en la Tabla 2 el impacto que ha tenido la implementación de la norma ISO 50001 desde su publicación en 2011, así como también el crecimiento en relación con otros sistemas de gestión. De igual forma se presenta un gráfico donde evidencia la participación de 84,60% de Europa en estas certificaciones, seguido de Asia

Oriental y el Pacífico, Centro y sur de Asia, Medio Oriente, Centro y sur América, Norte América y África.

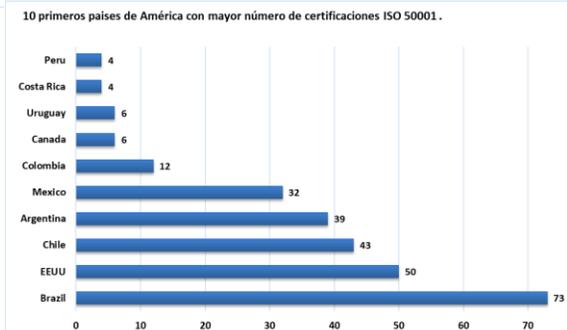
Se identifican los 10 primeros países a nivel mundial que más han crecido en certificaciones (SGEn).

Tabla 2. Evolución de la aplicación de la norma ISO50001 desde su publicación en 2011

Estandar ISO	2.016	2017	2018	2019
ISO 9001:2015	1.105.937	1.058.504	878.664	883.521
ISO 14001:2015	346.147	362.610	307.059	312.580
<b>ISO 50001:2011&amp;2018</b>	<b>20.216</b>	<b>21.501</b>	<b>18.059</b>	<b>18.227</b>
ISO 27001:2013	33.290	39.501	31.910	36.362
ISO 22000: 2005&2018	32.139	32.722	32.120	33.502
ISO 13485:2003&2016	29.585	31.520	19.472	23.045
ISO 22301:2012	3.853	4.281	1.506	1.693
ISO 20000-1:2011	4.537	5.005	5.308	6.047
ISO 28000:2007	356	494	617	1.874
ISO39001:2012	478	620	547	864
ISO 37001: 2016	0	0	389	872
ISO 45001:2018	0	0	11.952	38.654
<b>Total</b>	<b>1.576.538</b>	<b>1.556.758</b>	<b>1.307.603</b>	<b>1.357.241</b>

Fuente: The ISO Survey of Management System Standard Certifications – Explanatory Note- 2016 to 2019

Certificados ISO 50001		
Año	Sitios	Certificaciones
2011	634	459
2012	2.120	2236
2013	3.471	4826
2014	6.914	6765
2015	20.562	11985
2016	23.377	20.216
2017	22.870	21.501
2018	46.769	18.059
2019	42.215	18.227





Fuente: The ISO Survey of Management System Standard Certifications – Explanatory Note- 2016 to 2019

### 2.3. ESTRUCTURA DE LOS SGEN SEGÚN LA NORMA ISO 50001

La norma internacional ISO 50001 [13] define los requisitos generales para la estructura operativa y organizativa de un SGen, lo cual parte de la identificación de la situación actual del consumo energético de los equipos, sistemas o procesos de una organización, en relación con la producción o los servicios realizados. Ello se obtiene mediante la implementación de una línea de base energética e indicadores de desempeño energético en los usos significativos de la energía, así como el análisis de las variables de control que deben ser monitoreadas para lograr la mejora en la eficiencia energética.

Esta norma ha sido desarrollada sobre la base de los elementos comunes que se encuentran en todas las normas de gestión ISO, tales como la gestión de la calidad (ISO 9001), o la gestión ambiental (ISO 14001); por tanto, es posible implementarla en cualquier tipo de organización, independientemente de su tamaño, su función o la ubicación geográfica.

La ISO 50001 requiere de la definición de políticas y planes de acción; la introducción de requisitos de eficiencia energética, en cuanto al diseño, la compra y la instalación de equipos; el conocimiento y monitoreo del marco legal y regulatorio energético vigente aplicable a la organización, además del control operacional de la eficiencia energética y la incorporación de todos estos elementos en el modelo de gestión empresarial.

La estructura misma de la norma se complementa e integra a todos los procesos y sistemas de gestión de la organización, para obtener una mejora continua en el uso de la energía, un consumo eficiente y una reducción en los costos financiero-asociados. Lo anterior, con el fin de lograr las metas de incremento de productividad y reducción del impacto ambiental de la organización.

La Norma ISO 50001:2018 se basa en el ciclo de mejoramiento continuo, Planear-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA), e incorpora la gestión energética a las prácticas habituales tal como lo enseña la Figura 34.

El enfoque del modelo de la norma se puede describir de la siguiente manera:

**Planificar :** Entender el contexto de la organización, establecer una política energética y un equipo de gestión de energía, considerar las acciones para hacer frente a los riesgos y oportunidades, realizar una revisión energética, identificar los usos significativos de la energía (USE) y establecer los indicadores de desempeño energético (IDEn), las líneas de base energéticas (LBE), los objetivos, las metas energéticas y los planes de acción necesarios para lograr los resultados que mejorarán el desempeño energético de acuerdo con la política energética de la organización.

**Hacer:** implementar planes de acción, controles operacionales y de mantenimiento y comunicaciones, garantizar la competencia y considerar el desempeño energético en el diseño y las adquisiciones.

**Verificar:** realizar las acciones de seguimiento, medición, análisis, evaluación, auditoría y revisión(es) por la dirección del desempeño energético y del SGE.

**Actuar:** tomar medidas para solucionar las no conformidades y mejorar en forma continua el desempeño energético y el SGE.

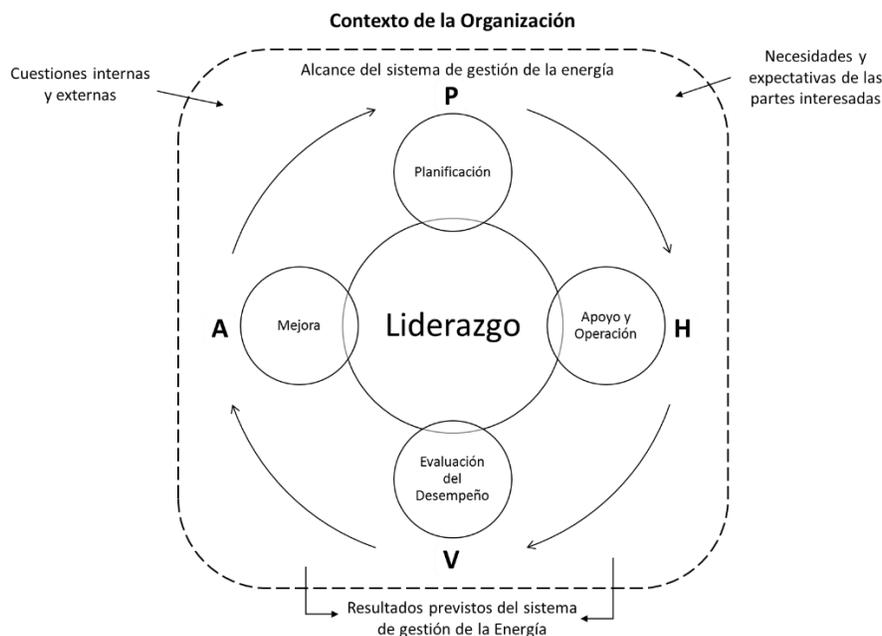


Figura 34. Ciclo de Mejora Continua PHVA norma ISO 50001:2018

Fuente: ISO 50001:2018

La Figura 35 presenta algunas de las consideraciones y cambios más importantes que tuvo la norma ISO 50001 versión 2018 con respecto a la primera edición del año 2011.

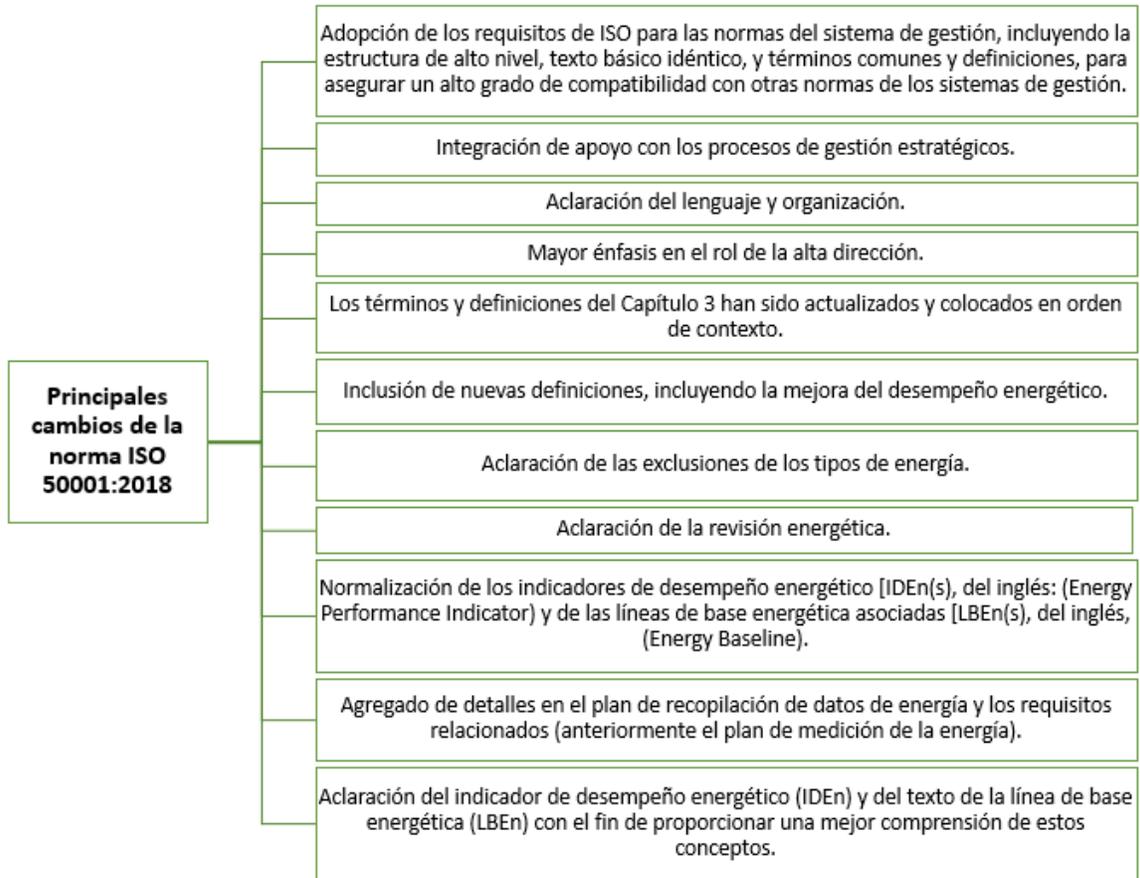


Figura 35. Cambios principales norma ISO 50001:2018 con respecto a la ISO 50001:2011

Fuente: ISO 50001:2018

En cuanto a los términos y definiciones

La versión nueva de la ISO 50001 2019 incluyó 5 subcapítulos donde se agrupan los términos y definiciones según se muestran en la Figura 36.

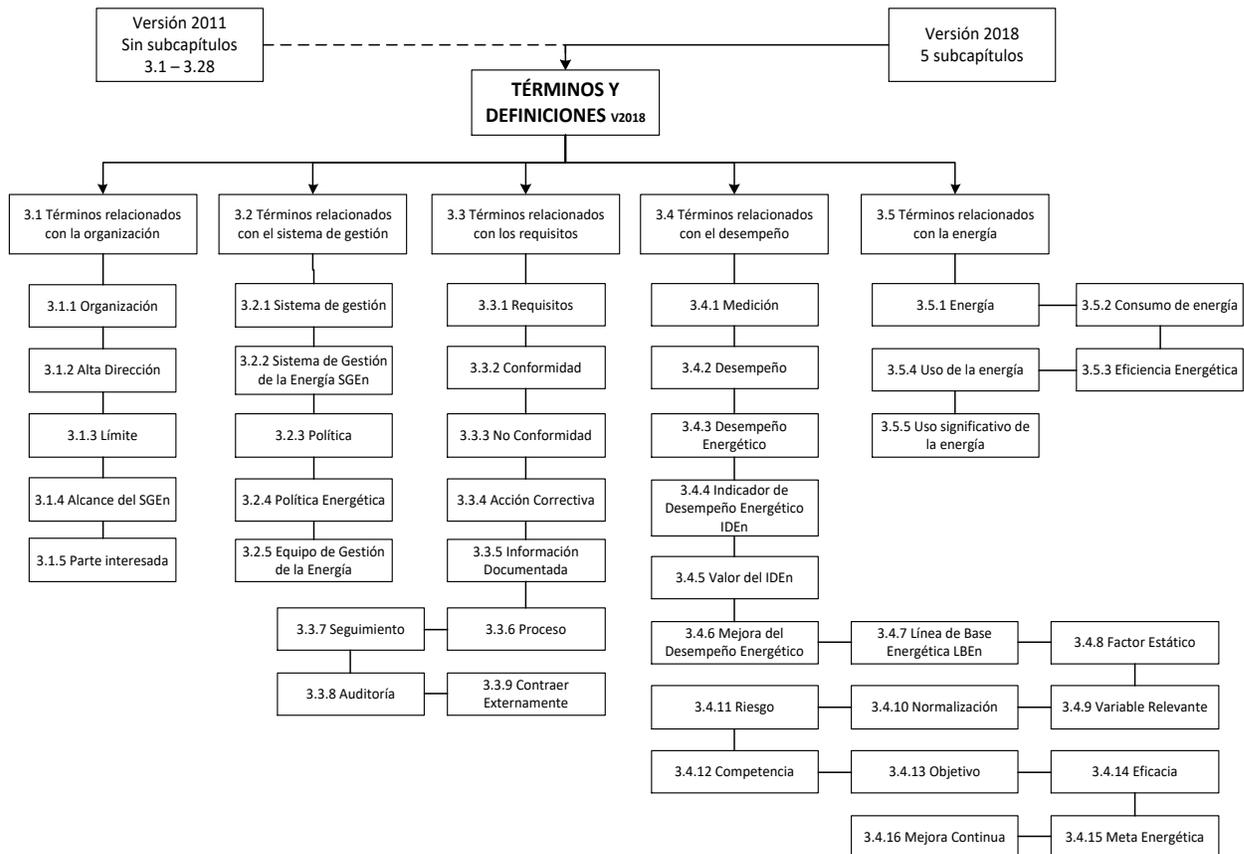


Figura 36. Términos y definiciones de la nueva versión de la ISO 50001 :2018

**La estructura genérica considerada por la ISO contempla los siguientes aspectos:**

- Objeto y campo de aplicación.
- Referencias normativas.
- Términos y definiciones.
- Entender el contexto de la organización, su SG y sus procesos.
- Liderazgo, política y responsabilidades.
- Procesos para la planificación y consideración de riesgos y oportunidades.
- Procesos para el apoyo, incluyendo recursos, a las personas y la información.
- Procesos operativos relativos a los clientes y a los productos y servicios.
- Procesos para la evaluación del desempeño.
- Procesos para la mejora.

### **Aspectos de Riesgos y Liderazgo**

Uno de los aspectos más importantes para la implementación de un sistema de Gestión de la energía, es el compromiso y liderazgo que debe garantizar la alta dirección para la implementación, mantenimiento y mejora continua. Cuando se decide implementar un SGE, la alta dirección adquiere un conjunto de compromisos que se relacionan con requisitos independientes de la norma ISO 50001. Estos aspectos deben ser de dominio de la alta dirección, quien debe aprobar y realizar revisiones de cada uno de ellos. Para dar cumplimiento a estos compromisos la alta dirección debe designar las responsabilidades necesarias dentro de las cuales resulta importante la asignación de un gestor energético para liderar el proceso de implementación, así como un equipo de gestión de la energía.

El compromiso de la alta dirección se sintetiza en una política energética y se refleja en la designación de roles, responsabilidades y autoridades en la organización. La alta dirección debe tener en cuenta que con el compromiso de implementar el SGE también adquiere el compromiso de asignación de recursos materiales y humanos. En este sentido, un sistema de gestión debe integrar armoniosamente procesos, personas, recursos y métodos de manera coherente, para lograr los propósitos fundamentales y los objetivos estratégicos del éxito sostenible.

No obstante, las normas ISO que establecen requisitos y recomendaciones para los componentes de un sistema de gestión están justificadas, puesto que permiten la transferencia de tecnología, mediante la cual se pueden promover, difundir y exigir buenas prácticas en las organizaciones, tanto a nivel estratégico como operativo de los procesos y proyectos. De esta manera, la tecnología ayuda a reducir la vulnerabilidad y mejorar el rendimiento de la organización.

Las buenas prácticas se centran principalmente en la creación y protección de valor, basadas en la gestión de planificación y control en los niveles estratégicos y operativos de la organización. Las buenas prácticas que respaldan las normas ISO sobre sistemas de gestión se basan en riesgos; en este contexto, la gestión de riesgos significa la anticipación y el control de lo que puede y debe ocurrir en los procesos y la práctica empresarial.

La gestión de riesgos debe esforzarse por cumplir con los objetivos, propósitos y compromisos estratégicos asociados con los proyectos, procesos, productos y servicios.

La gestión de riesgos implica la toma de decisiones estratégicas sobre la dirección de negocios e instituciones, decisiones en la planificación y desarrollo de proyectos, decisiones en la gestión de procesos, productos y servicios, y decisiones en la interacción de las personas con su entorno y partes interesadas

El ciclo del proceso de gestión de riesgos es similar al de las oportunidades y debe implementarse de forma regular y sistemática. Dependiendo de su tema o naturaleza, cada riesgo se gestiona en diferentes niveles. Especialmente, cada riesgo requiere tiempo para

recopilar y analizar la información, para tomar decisiones y para planificar, ejecutar, retroalimentar y completar con éxito las acciones requeridas para la gestión efectiva del riesgo u oportunidad. [14]

Otros elementos incluidos en esta nueva versión se relacionan con los términos variables relevantes y factores estáticos como elementos que contribuyen a identificar aspectos que pueden afectar el desempeño energético de una organización.

### **Variables relevantes y factores estáticos**

La identificación de variables relevantes es una tarea necesaria en la revisión energética para posteriormente el desarrollo de indicadores de desempeño energético, líneas de base energética y para el seguimiento al desempeño energético del SGEN. Por su parte los factores estáticos representan un concepto esencial y oportuno para entender cuándo deben realizarse actualizaciones de las líneas de base energética y abordar otras decisiones del SGEN [13].

### **Variables relevantes**

Las variables relevantes son aquellas que impactan significativamente en el desempeño energético y cambian de forma rutinaria. Las mismas se refieren a parámetros operacionales, actividades de mantenimiento, eventos o actividades de planeación de la producción, que cambian en la operación cotidiana de la organización y cuya su variación produce cambios significativos en el consumo de energía.

Las fuentes de identificación de estas variables pueden ser: los instructivos de operación; los instructivos de mantenimiento; los procedimientos operacionales y de mantenimiento; los manuales de operación de equipos; los programas de mantenimiento de los equipos; los programas de producción; la experiencia de los operadores, mantenedores y planeadores de la producción.

Pueden ser variables relevantes para un USE: la producción; ocupación; condiciones operacionales (tipos de agrupamiento de equipos, presión, temperatura, velocidad, viscosidad, rpm, relación aire/combustible, tiempos de cambio de producto, tiempos de arranque, paradas, reprocesos, regímenes de operación, cantidad de purgas al día, planeación de la producción, etc.); condiciones climáticas (grados día de temperatura, humedad relativa, presión ambiente, polución, densidad); condiciones de mantenimiento (frecuencia de limpieza, lubricación, frecuencia de inspecciones, ajustes, tiempos de cambio de partes y piezas, confiabilidad, disponibilidad) [15].

Pueden existir muchas variables que al cambiar produzcan cambios en el consumo de energía, para se trata de reducir el análisis a solo aquellas que produzcan cambios relevantes en el consumo de energía.

El conocimiento de estas variables y de su influencia cuantitativa sobre el desempeño energético permite identificar las oportunidades de mejora en el USE. Generalmente estas oportunidades de mejora van dirigidas a reducir la variabilidad no deseada de estas variables o a controlar la misma para reducir el consumo de energía.

Para la validación cuantitativa de la influencia de cada variable sobre el consumo de energía es indispensable disponer de la información suficiente y representativa de la misma y del consumo de energía asociado, en un periodo significativo de tiempo.

No todas las variables relevantes pueden ser controladas para mejorar el desempeño energético, mediante un sistema de control operacional, tal como establece la ISO 50001. Existen variables climáticas o de otro tipo, no controlables, que pueden impactar de forma relevante el consumo de energía.

Por ejemplo, los grados días de temperatura impactan relevantemente el consumo de energía en los sistemas de climatización o de producción de frío industrial. También la cantidad de producto realizado en cualquier línea de producción es una variable relevante que influye en el consumo de energía de la línea, sin embargo, no es una variable que puede ser controlada para reducir el consumo ya que no podemos producir menos para ahorrar energía.

Aquellas variables relevantes que no pueden ser controladas por ninguna de las actividades operacionales, de la gestión del mantenimiento o de la gestión de la producción, para mejorar el desempeño energético del USE, deben ser utilizadas para normalizar la evaluación del desempeño energético del USE en cuestión, evitando así la influencia de la variación de la misma en la evaluación del desempeño energético. Esta normalización se realiza al establecer la línea base del USE para la evaluación de su desempeño energético. En conclusión, la determinación de las variables relevantes de los USE sirve para establecer el control operacional del desempeño energético, para identificar posibles oportunidades de mejora del desempeño y además para lograr la normalización de la evaluación del desempeño.

### **Factores estáticos**

Son aquellos que impactan significativamente en el desempeño energético y no cambian de forma rutinaria. Generalmente son factores fijos inherentes a la tecnología existente y que determinan la eficiencia energética de la tecnología en uso [13], [28].

Cuando hay cambios importantes en los factores estáticos, es porque existen cambios en la tecnología y la organización deberá revisar las líneas de base energética que fueron elaboradas antes de esos cambios.

Ejemplo de **factores estáticos**: tipo de equipo instalado (motor eléctrico de baja, media o alta eficiencia), capacidad instalada (equipo sobredimensionado que trabaja subcargado), área de un edificio, tipo de luminarias (de alta eficiencia o de baja eficiencia); tipo de sistema

de control que impacta relevantemente el consumo de energía (un control manual de flujo que puede ser modificado a un control por variador de frecuencia del motor eléctrico) etc. La identificación y registro de los factores estáticos es importante porque estos deben ir a la ficha de la línea base elaborada. En caso de que cambien los factores estáticos, que son factores relevantes que impactan el desempeño energético de un USE, se debe cambiar también la línea base elaborada, ya que la que existe antes del cambio no representa el comportamiento energético de ese USE.

Otro elemento importante de la identificación de los factores estáticos es que estos son fuentes de oportunidades de mejoras tecnológicas de los USE para la mejora del desempeño energético.

### 2.3.1. Normas relacionadas con la familia de normas de la ISO 50001

En el diagrama de la Figura 37, se agrupan las normas de la familia ISO 50000 trabajadas en el comité 301, Gestión de la Energía y Ahorros Energéticos de la entidad internacional ISO.

## FAMILIA ISO 50000

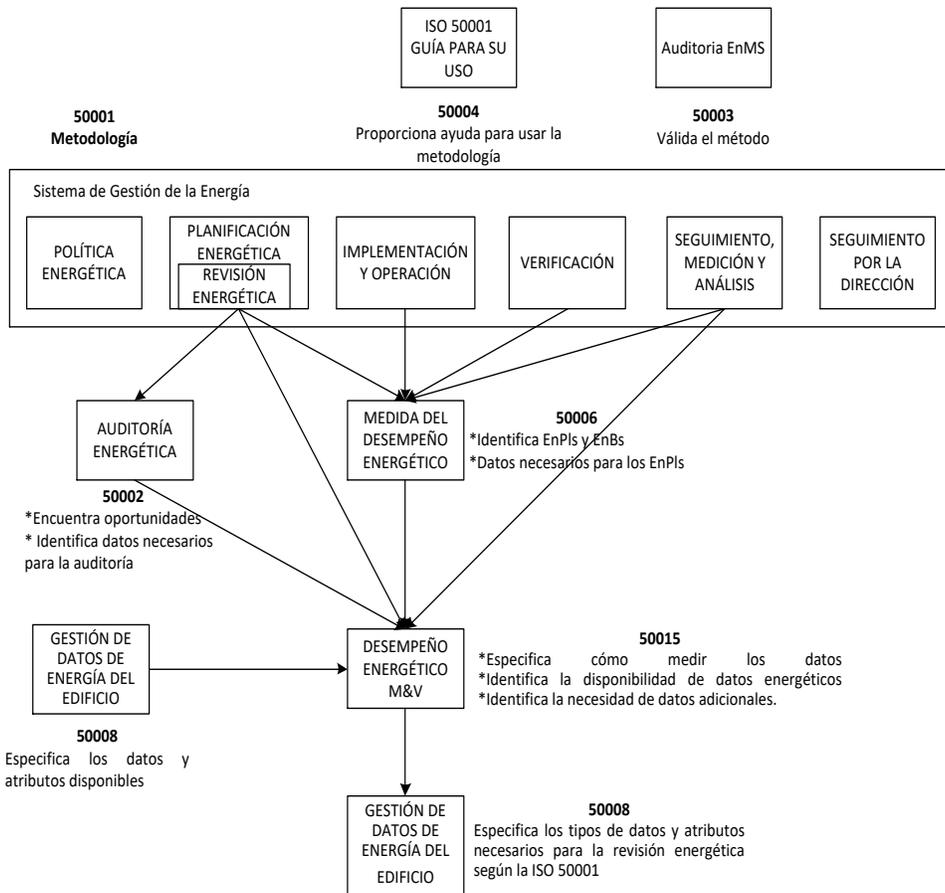


Figura 37. Familia de normas de ISO50000 que aportan a la implementación de los SGEN

### **2.3.2. Planificación Energética**

Dentro de la estructura de la norma ISO 50001, la planificación y sus elementos son considerados el núcleo de un SGEN, puesto que proporcionan la base para el desarrollo de una estrategia de mejora del desempeño energético, con objetivos específicos y actividades para la organización. En la versión ISO 50001:2018 se han incorporados aspectos importantes en cuanto a las consideraciones sobre los riesgos y las oportunidades como parte de la toma de decisiones estratégicas de alto nivel en la organización. Al identificar los riesgos y las oportunidades cuando se planifica el SGEN, la organización es capaz de anticipar los escenarios potenciales y las consecuencias, de manera de que los efectos no deseados se pueden abordar antes de que ocurran. En este sentido para la definición de acciones concretas dentro de esta etapa, es necesario realizar la identificación y evaluación de los aspectos energéticos, a través de objetivos, metas energéticas que pueden incluir tanto las mejoras generales al SGEN, como las metas de mejora del desempeño energético, específicas y medibles.

Otro aspecto importante es la revisión energética, entendida como el proceso de identificación de los tipos de energía y de evaluación del uso y consumo energético, con el propósito de que la organización determine las áreas de uso significativo de energía y que identifique las oportunidades de mejora del desempeño energético. De igual forma están incluidos dentro de la etapa de planificación, establecer indicadores del desempeño energético con resultados medibles para comparar el desempeño energético antes (valor de referencia del IDEn) y después (valor resultante o real del IDEn) de la implementación de planes de acción y de otras acciones. En la misma dirección está el establecimiento de la línea de base energética, en el período de tiempo apropiado significa que la organización da cuenta de los ciclos operativos, los requisitos reglamentarios o las variables que afectan el consumo de energía y la eficiencia energética, de manera de que el período de datos demuestre adecuadamente la gama completa del desempeño. Finalmente se incorpora al proceso de la planificación para recopilación de datos energéticos, los cuales tienen importancia crítica para el seguimiento y la mejora del desempeño energético. La planificación de qué datos recopilar, cómo hacerlo y con qué frecuencia a menudo ayuda a asegurar la disponibilidad de los datos necesarios para mantener la revisión energética y los procesos de seguimiento, medición, análisis y evaluación. Los datos pueden variar desde una simple cuenta numérica progresiva, hasta sistemas completos de seguimiento y medición, conectados a una aplicación de software capaz de consolidar los datos y entregar un análisis automático. En este sentido la organización debe planificar la manera de obtener la información necesaria para el seguimiento a sus metas energéticas y al desempeño energético. La planificación deberá incluir tanto planes de medición de las variables relevantes y consumos energéticos, como la recopilación de información adicional requerida para el desempeño energético (p. ej. cambios en los usos significativos de la energía, criterios operacionales asociados a los USE).

Para la ISO 50001 la medición se define como el proceso realizado para obtener un valor. En este sentido, la medición de variables claves del SGE representa actividades que pueden incluir desde la lectura (manual o automática) de medidores de energía hasta la revisión de registros de producción.

Para poder realizar el seguimiento, medición y análisis se requiere establecer un plan de medición apropiado al tamaño, complejidad y equipos de medición de la organización. Un plan de medición debe incluir: dónde se mide, en qué unidades físicas se mide, con qué frecuencia se mide, quién mide, dónde se registra la información quién tiene acceso a la misma, quién la procesa, quién registra los resultados del proceso, quién la analiza, a quién se comunica los resultados del análisis y otros aspectos que la organización considere.

La organización debe definir y revisar periódicamente sus necesidades de medición (áreas y equipos que requieren ser medidos).

La organización debe asegurar que el equipo usado en el seguimiento y medición de las características clave proporcione información exacta y repetible. Esto significa que estos equipos deben incorporarse al plan de calibración y verificación de instrumentos de medición de la empresa y que deben mantenerse los registros de las calibraciones y de las actividades establecidas por la empresa para verificar la exactitud y repetibilidad en estos equipos.

A continuación, se presenta la Figura 38 que resumen los aspectos más importantes a considerar para realizar una adecuada planificación energética tanto en una industria como en una edificación.

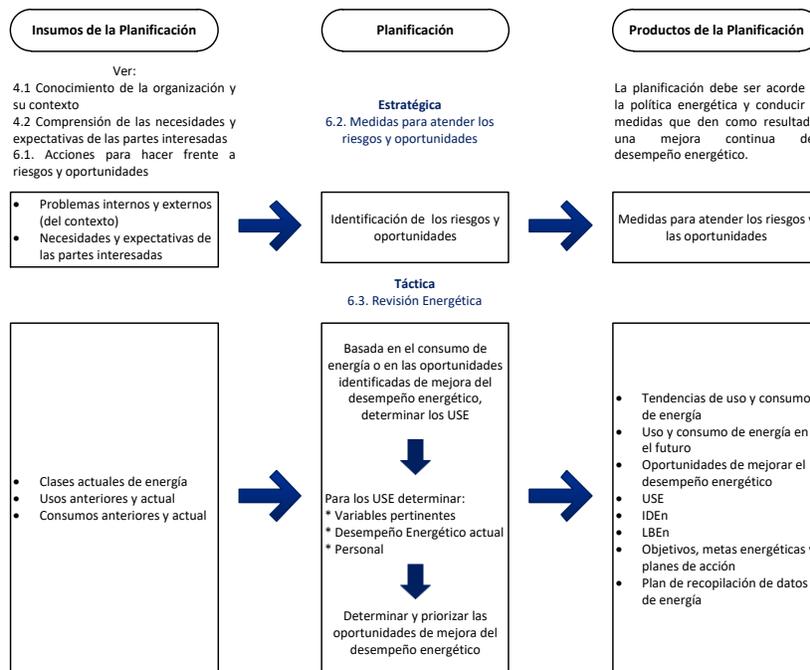


Figura 38. Proceso de planificación Energética

Fuente: ISO50001 2018

## 2.4. HERRAMIENTAS USADAS PARA LA GESTIÓN ENERGÉTICA

Las herramientas presentadas a continuación corresponden a elementos que posibilitan el análisis y elaboración de procedimientos para facilitar la ejecución de una revisión energética que provee una visión sobre cómo mejorar su desempeño en una organización, es decir, optimizar los usos, los consumos y la eficiencia energética. Como resultado de dicho proceso es posible establecer un plan de acción que permita la implementación de un Sistema de Gestión Energética (SGEn) acorde con los requisitos de la norma y, como consecuencia, se reduzcan costos, emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales.

La revisión energética se desarrolla en tres etapas principales:

- a. Análisis de los usos de energía.
- b. Identificación de usos significativos de energía.
- c. Identificación de oportunidades de mejoramiento.

Para este análisis, se sugiere el uso de una serie de herramientas que facilitan el cumplimiento de los objetivos de cada una de las etapas por desarrollar, según se describen en la Figura 39.

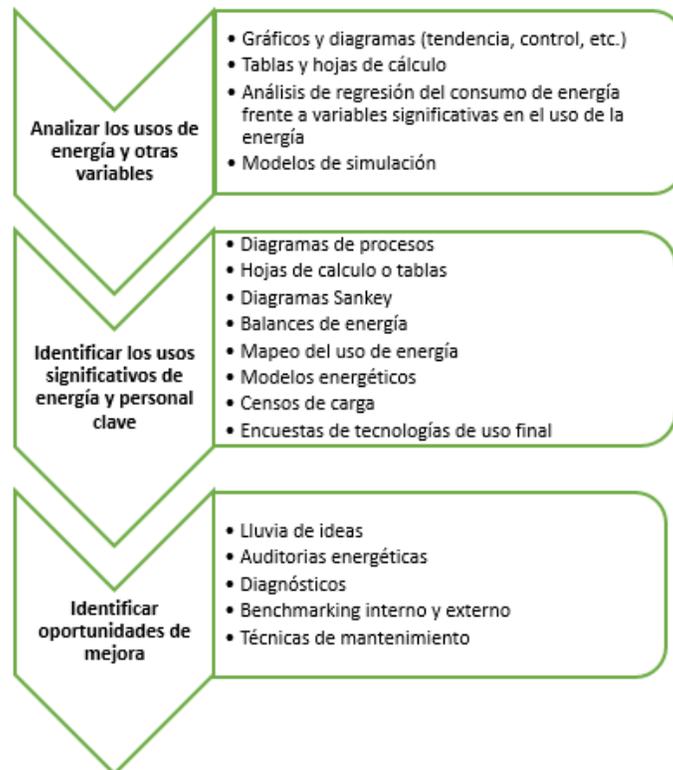


Figura 39. Herramientas usadas para la revisión energética

Fuente: Metodología Para la Planificación Energética a Partir de la Norma ISO 50001 [15]

**2.4.1. Herramientas usadas para el análisis de los usos y consumos de energía**

Esta etapa de la revisión energética tiene como objeto establecer tendencias generales en el uso y consumo de energía. Dicho análisis se realiza a partir de mediciones y otro tipo de datos, como facturas o estimativos; no obstante, la información suministrada debe ser clara y precisa para obtener resultados confiables. La frecuencia de los datos debe ser suficiente para evaluar la variabilidad del desempeño energético y detectar anomalías entre el consumo de energía y el producto realizado o los servicios prestados. Algunas posibles técnicas que se plantean para presentar la información de análisis y los usos y consumos de energía son: los gráficos de barras, lineales, áreas, gráficos de control, tablas y matrices. Lo anterior es presentado y explicado en la Tabla 3.

Tabla 3. Herramientas usadas para el análisis de uso y consumo de energía

Análisis de los usos y consumos de energía																																																					
<p><b>Gráficos de Tendencia</b></p> <p>Muestran el comportamiento de los consumos energéticos en el tiempo (incrementos, decrementos o tendencias sin variación) [15]. Dejan visualizar cambios que sufren los procesos en un período de tiempo, o comparar el desempeño energético obtenido después de implementar una acción correctiva.</p> <p>A continuación, se presentan algunos gráficos para analizar la información.</p>	<table border="1"> <caption>Approximate data from the energy consumption trend graph</caption> <thead> <tr> <th>Mes</th> <th>2010 (kWh)</th> <th>2011 (kWh)</th> <th>2012 (kWh)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>enero</td><td>250,000</td><td>250,000</td><td>250,000</td></tr> <tr><td>febrero</td><td>340,000</td><td>330,000</td><td>330,000</td></tr> <tr><td>marzo</td><td>370,000</td><td>370,000</td><td>370,000</td></tr> <tr><td>abril</td><td>340,000</td><td>300,000</td><td>290,000</td></tr> <tr><td>mayo</td><td>370,000</td><td>370,000</td><td>370,000</td></tr> <tr><td>junio</td><td>280,000</td><td>260,000</td><td>260,000</td></tr> <tr><td>julio</td><td>280,000</td><td>270,000</td><td>270,000</td></tr> <tr><td>agosto</td><td>360,000</td><td>370,000</td><td>370,000</td></tr> <tr><td>septiembre</td><td>360,000</td><td>370,000</td><td>370,000</td></tr> <tr><td>octubre</td><td>340,000</td><td>330,000</td><td>340,000</td></tr> <tr><td>noviembre</td><td>330,000</td><td>330,000</td><td>330,000</td></tr> <tr><td>diciembre</td><td>220,000</td><td>220,000</td><td>220,000</td></tr> </tbody> </table>	Mes	2010 (kWh)	2011 (kWh)	2012 (kWh)	enero	250,000	250,000	250,000	febrero	340,000	330,000	330,000	marzo	370,000	370,000	370,000	abril	340,000	300,000	290,000	mayo	370,000	370,000	370,000	junio	280,000	260,000	260,000	julio	280,000	270,000	270,000	agosto	360,000	370,000	370,000	septiembre	360,000	370,000	370,000	octubre	340,000	330,000	340,000	noviembre	330,000	330,000	330,000	diciembre	220,000	220,000	220,000
Mes	2010 (kWh)	2011 (kWh)	2012 (kWh)																																																		
enero	250,000	250,000	250,000																																																		
febrero	340,000	330,000	330,000																																																		
marzo	370,000	370,000	370,000																																																		
abril	340,000	300,000	290,000																																																		
mayo	370,000	370,000	370,000																																																		
junio	280,000	260,000	260,000																																																		
julio	280,000	270,000	270,000																																																		
agosto	360,000	370,000	370,000																																																		
septiembre	360,000	370,000	370,000																																																		
octubre	340,000	330,000	340,000																																																		
noviembre	330,000	330,000	330,000																																																		
diciembre	220,000	220,000	220,000																																																		
<p>De estos gráficos se puede analizar los siguientes comportamientos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Carga base de la demanda; es el menor valor del gráfico del consumo de energía.</li> <li>Carga máxima de la demanda; el mayor valor del gráfico del consumo de energía.</li> <li>Demanda promedio de energía.</li> <li>Períodos de mayores y menores consumos de energía.</li> </ul>																																																					

Posibles causas de las variaciones del consumo de energía (disminución o aumento de la producción, la ocupación en una edificación, cambio estacional, cambio de equipos o procesos, etc.)

Es conveniente también realizar un gráfico en el que se muestre de manera conjunta la evolución de los consumos energéticos y la cantidad de producción y / ocupación en el tiempo. De esta manera, se identificará si las variables tienen tendencias similares y posibles comportamientos atípicos que puedan ser objeto de analizar [15].

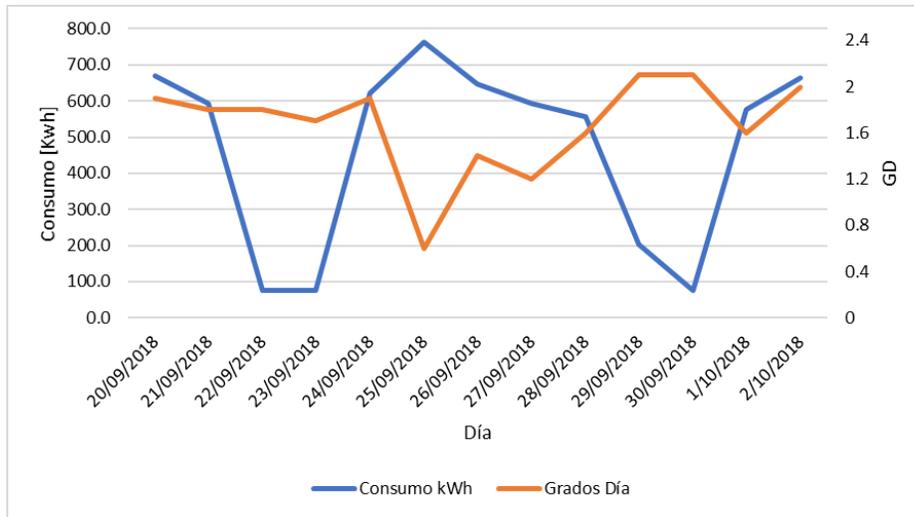
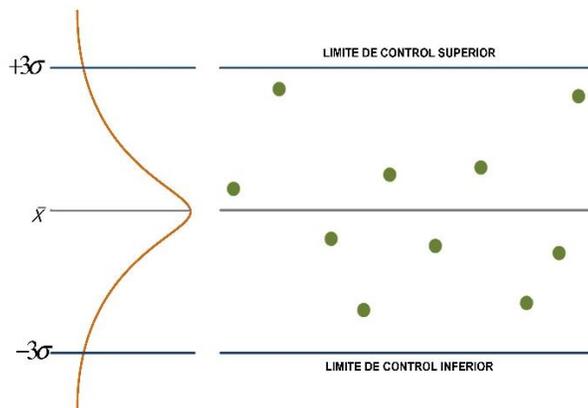


Gráfico de tendencia Consumo de Energía Eléctrica vs Grados Día

### Gráficos de Control

Son herramientas estadísticas utilizadas para entender la variabilidad de los procesos, determinar capacidades de proceso, y hacer un seguimiento de los efectos de las variables sobre la diferencia entre las metas y el desempeño real. Indican los límites de control superior (LCS) e inferior (LCI) y, con frecuencia, incluyen una línea central (promedio), para ayudar a detectar la tendencia de los valores representados [17].



Fuente: Anderson D., Sweeney D. "Estadística para administración y economía [17]

En ese sentido, el objetivo del uso de este gráfico es determinar si los consumos y costos energéticos tienen un comportamiento estable o anómalo, de tal forma que se pueda conocer si las variables evaluadas están bajo control, identificando cuáles son sus límites. Igualmente, reconocer los comportamientos que requieren explicación; identificar las causas no aleatorias que influyen en el comportamiento de los consumos, y conocer la influencia de las acciones correctivas sobre los mismos y los costos energéticos asociados [18].

En la elaboración de un gráfico de control de medias para la evaluación de los consumos energéticos, se requiere:

Realizar una tabla de datos de consumos de energía para un período de tiempo determinado.

Calcular la media de los datos a partir de la ecuación, la cual determina el valor medio para evaluar el consumo de energía observado:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Calcular los límites de control:

Los límites de control se calculan a partir de la desviación estándar de los datos y la media de los mismos.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{LCS} = \bar{x} + 3\sigma \quad \text{LCI} = \bar{x} - 3\sigma$$

Dibujar las líneas rectas paralelas al eje x de  $\bar{x}$ , LCS, LCI y los puntos de las muestras  $x_i$ .

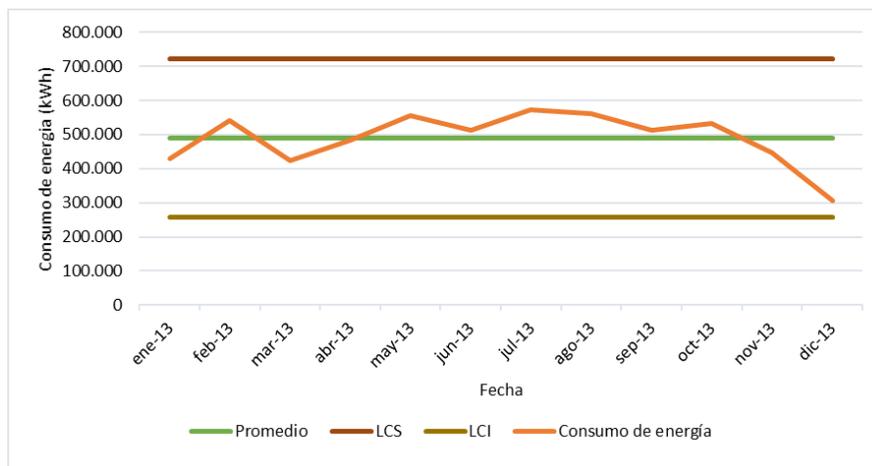


Gráfico de control de consumo de energía

### Matriz Energética

Es un instrumento [15] que facilita la identificación y el análisis de las diferentes fuentes de energía disponibles en una organización, indicando la importancia de cada una de ellas y el modo en el cual se utilizan.

En la matriz energética se debe especificar la fuente del energético, ya sean energías primarias (la hidroenergía, el petróleo crudo, el gas natural, el carbón mineral, la biomasa, energía solar y eólica); o secundarias, como la energía eléctrica de las centrales de generación o el diésel de las refinerías de combustibles. De igual forma, se deben incluir los distintos usos o consumos de todas y cada una de las fuentes de energía en los equipos de uso final (equipos de iluminación, aparatos eléctricos, sistemas de climatización, producción de agua caliente sanitaria, entre otros).

Fuente del energético	Tipo de energético	Consumo anual	PCS	Consumo anual equivalente	% Representación en la matriz
Energía Primaria	No Renovable	Carbón			
		Petróleo			
		Gas Natural			
		Otro:			
	Renovable	Solar			
		Eólica			
		Biomasa			
		Otros renovables			
<b>Total consumo energía primaria</b>					
Energía Secundaria		Energía Eléctrica			
		Vapor			
		Diésel			
		Gasolina			
		Biogás			
		Otro:			
<b>Total consumo energía secundaria</b>					

**Fuente del energético:** Se distinguen dos fuentes: primaria, si el energético proviene de un recurso natural; y, secundario, si el energético es resultado de la transformación de otro energético ya procesado.

**Tipo de energético:** Se refiere a la clasificación de la fuente de los energéticos; por ejemplo, las energías primarias se clasifican en renovables, si es que son fuentes energéticas de uso sustentable en el tiempo; y, en no renovables, si hace referencia a fuentes energéticas de uso limitado.

Es conveniente que además de construir la matriz energética, se realice una matriz de costos energéticos en la que se compare el peso que tiene el costo de cada tipo de energía sobre el costo total de todos los tipos de energía. Esto permitirá tener dos dimensiones de la matriz: su desempeño energético y su impacto económico.

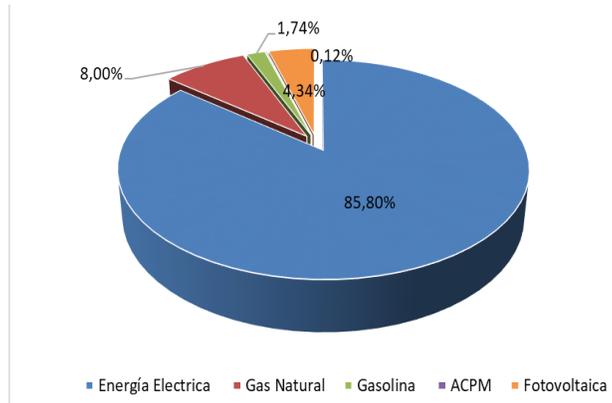


Gráfico Matriz de energéticos de una edificación.

#### **2.4.2. Herramientas usadas para identificar las áreas de uso significativo de la energía (USE)**

Uso de la energía (Electricidad, combustible, vapor, calor, aire comprimido y otros medios similares; es decir diferentes tipos de energía que se pueden comprar, almacenar, tratar utilizar en equipos o en un proceso o recuperar, incluyendo la renovable. Que representa consumo de energía, cantidad utilizada sustancial y /o que ofrece un potencial considerable para la mejora del desempeño energético [13].

Los usos significativos de la energía (USE) son aquellos donde la organización centrará los esfuerzos para la mejora del desempeño energético. Algunos elementos del SGE en las etapas de operación y apoyo se centran en los USE por lo que una buena identificación reviste de alta importancia para el sistema.

El criterio principal para seleccionar los USE es identificar aquellos usos de la energía que agrupen los mayores consumos de la organización. No obstante, la organización podría identificar que los usos con mayores consumos no tienen potenciales de ahorro representativos o, por el contrario, que algún uso de la energía con consumos menores tiene altos potenciales de ahorro. En este caso, la organización podría determinar un USE basado en los potenciales de ahorro asociados [16].

Una vez identificados los usos significativos de la energía, es necesario levantar datos e información relevante que permita su gestión a través de los diferentes elementos del SGE.

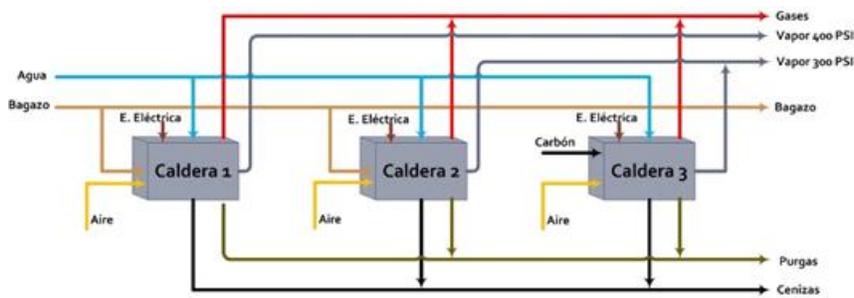
Algunas de las herramientas utilizadas para identificar áreas de uso significativo son presentadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Herramientas usadas para la identificación de USE's

**Herramientas utilizadas para la identificación de las áreas de uso significativo de la energía (USE)**

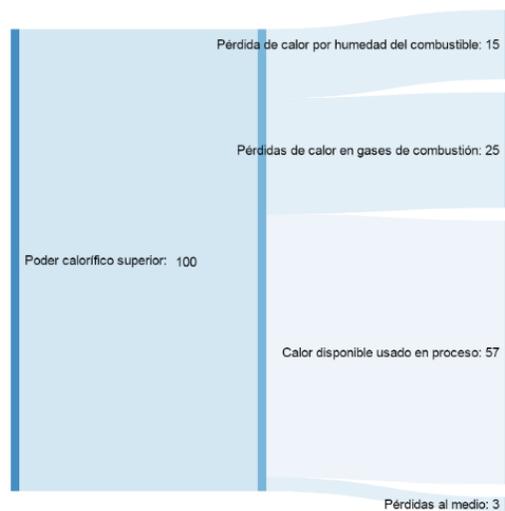
**Diagrama Energético-Productivo**

El diagrama energético-productivo es un esquema de procesos en donde se identifican las operaciones básicas en forma de bloques, las corrientes de flujos másicos principales, la información crítica para definir el proceso, así como los tipos y cantidades aproximadas de energía que entran y salen en cada etapa u operación básica del proceso [19].



**Diagrama Sankey**

Es una ilustración gráfica que permite visualizar los flujos energéticos de materiales o de dinero, a través de un proceso o sistema con más facilidad que una tabla de datos numéricos. Por lo general, los flujos se ilustran como flechas y su ancho es proporcional a la magnitud que representan. Para el caso de un análisis energético, cuanto más gruesa es la línea o flecha, mayor será la transferencia de energía involucrada.



### Censo de Carga

Esta herramienta consiste en un inventario de equipos o de instalaciones energéticas, localizados en los diferentes departamentos o áreas de una organización. La información obtenida permite visualizar la situación real de su consumo de energía.

Los resultados de un censo de carga sirven para la identificación de áreas o equipos críticos en el consumo energético, así como para el establecimiento de acciones para la reducción de consumos, el balanceo de cargas, la detección de fugas, entre otros [20].

Formato de censo de carga						Formato no.
						Fecha:
						Responsable:
Área	Equipo/ instalación	Cantidad	Potencia de placa [kW]	Potencia de operación [kW]	Tiempo de uso mes [h]	Energía consumida [kWh/mes]

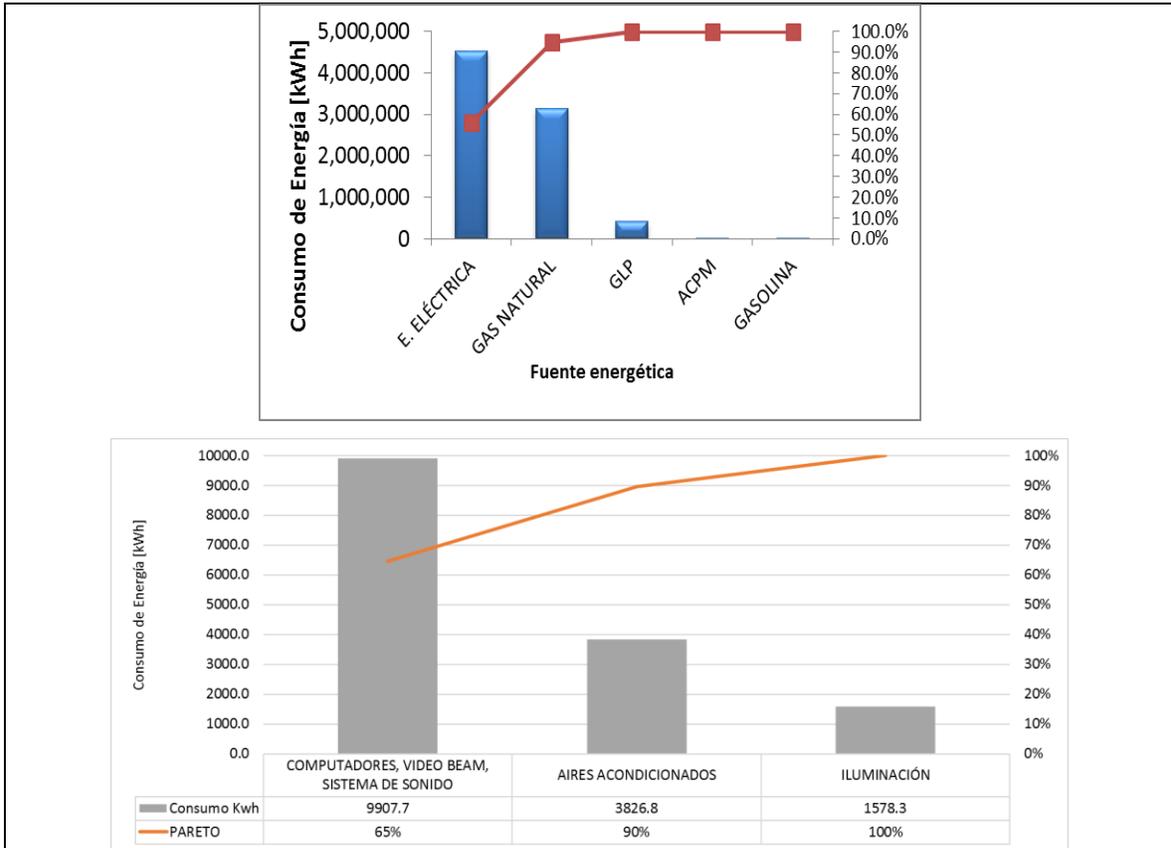
### Diagrama de Pareto

El propósito de esta etapa es establecer prioridades para la gestión energética y el mejoramiento del desempeño energético. El diagrama de Pareto como herramienta de gestión energética, permite identificar y concentrar esfuerzos en los puntos claves de un problema o fenómeno, como pueden ser: los mayores sistemas, áreas, equipos consumidores de energía de la empresa, las mayores pérdidas energéticas. De igual forma facilita predecir la efectividad de una mejora al conocer la influencia de la disminución de un efecto, cuando reduce la barra de la causa principal que lo produce [15], [21].

El uso del diagrama de Pareto es un instrumento clave para la gestión energética, y la información resultado de éste, sirve como criterio de selección para el direccionamiento de acciones en la mejora de la eficiencia energética de una organización.

Resume y muestra la importancia relativa de las diferencias entre grupos de datos; y muestra dónde se deben enfocar esfuerzos para la resolución de problemas.

Es vital tener en cuenta que, tanto la distribución de los efectos como sus posibles causas, no son un proceso lineal, sino que el 20 % de las causas totales hace que sean originados el 80 % de los efectos.



### Personal que afecta el consumo de energía

Algunos empleados pueden y afectan significativamente los usos y consumos de energía a través de sus actividades laborales. Éstos pueden ser particularmente el personal responsable para la operación y mantenimiento de las instalaciones, equipos, sistemas o procesos que han sido identificados como usos significativos de energía. Es importante designar como significativo al personal crítico asociado a los USE.

### 2.4.3. Herramientas usadas para la identificación y priorización de oportunidades para el mejoramiento del desempeño energético

La identificación de oportunidades de mejoramiento es el primer paso para el establecimiento de proyectos y planes para el incremento del desempeño energético de la organización.

Existen diversos métodos que facilitan la identificación de aspectos mejorables, algunos cualitativos, entre los cuales se destacan los grupales focales, la lluvia de ideas, las entrevistas semiestructuradas y la opinión del personal experto; así como otros métodos cuantitativos, como lo son las encuestas, los diagnósticos o auditorías energéticas.

Las oportunidades comienzan con las ideas de mejora. Estas pueden ser generadas a partir del análisis de uso y consumo de energía, la determinación de los usos significativos de energía y el análisis de su desempeño energético o de una variedad de otras fuentes. Dichas ideas se convierten en oportunidades, a través del examen y el perfeccionamiento utilizando el análisis de datos, para determinar el potencial de mejora del desempeño energético. La Tabla 5 presenta algunas de estas herramientas.

Tabla 5. Herramientas para la identificación y priorización de oportunidades para el mejoramiento del desempeño energético

<b>Herramientas utilizadas para la identificación y priorización de oportunidades para el mejoramiento del desempeño energético</b>
<p><b>Brainstorming o Lluvia de Ideas</b></p> <p>Es una de las técnicas más utilizadas para la obtención de información [24]. Se trata de una herramienta grupal, cuya clave está en la elección de las personas que conforman el grupo, el cual debe estar formado por profesionales conocedores del tema en un número no superior a 10 [25]. Para la gestión energética, dicho grupo puede estar conformado por el líder o gestor energético, quien será el moderador o responsable del conjunto, exponiendo la situación; mientras que el resto del personal debe incluir el comité energético, jefes de áreas y personal de uso significativo de energía identificado.</p> <p>Al llevar a cabo una sesión de lluvia de ideas, el objetivo final es la identificación de oportunidades de mejoramiento del desempeño energético.</p>
<p><b>Benchmarking Energético</b></p> <p>El benchmarking tiene como objetivo la generación de información para la empresa que le permita tener ideas sobre cómo planificar y adoptar prácticas basadas en la experiencia y el éxito ya alcanzados por otras organizaciones. El benchmarking energético es la parte del benchmarking dedicada a la eficiencia energética en los procesos que tienen lugar en la industria o una edificación. Puede ser una herramienta analítica muy útil, puesto que, proporciona información valiosa sobre la distribución del consumo de energía a través de la capacidad de producción de un sector , en el caso de los edificios es usado para describir el proceso de comparar el consumo de energía de un edificio con una base de datos de edificios similares, con el objetivo de evaluar el desempeño, la eficiencia operacional y los potenciales de mejora, así como para priorizar la selección de edificios para diagnósticos energéticos y retrofits [26].</p> <p>Aunque todos los sistemas de benchmarking energético buscan alcanzar la mayor eficiencia energética posible, existen muchos tipos de benchmarking en función de la finalidad concreta que se tenga, de los datos de los que se dispongan y de otros factores.</p>

En este caso resulta importante que la comparación se realice basado en indicadores energéticos e identificando las variables que pueden alterar los resultados al compararse entre empresas. En este caso resulta importante que la comparación se realice basado en indicadores energéticos e identificando las variables que pueden alterar los resultados al compararse entre empresas. En ese sentido, resulta difícil adquirir los datos de energía pertinente y suficiente para caracterizar los distintos procesos. Por otro, la medición del rendimiento energético y la verificación es a veces una tarea difícil. Además, la información detallada de la energía es una materia sensible debido a las preocupaciones sobre aspectos como competitividad, datos de propiedad o confidencialidad [27].

### Auditoría Energética

Conocida también como diagnóstico, este proceso consiste en una inspección y análisis sistemático del uso y el consumo de energía, con el propósito de identificar los flujos de energía y las oportunidades potenciales para mejorar el desempeño energético en una organización. La auditoría energética es una de las herramientas disponibles en apoyo de una revisión energética. Como proceso se describe en la norma ISO 50002 y proporciona el conocimiento sobre el consumo de energía que conduce a mejoras en el desempeño energético [22].

La Figura 40 presenta un diagrama de flujo del proceso de auditoría energética adaptado a los requisitos de la norma ISO 50002.

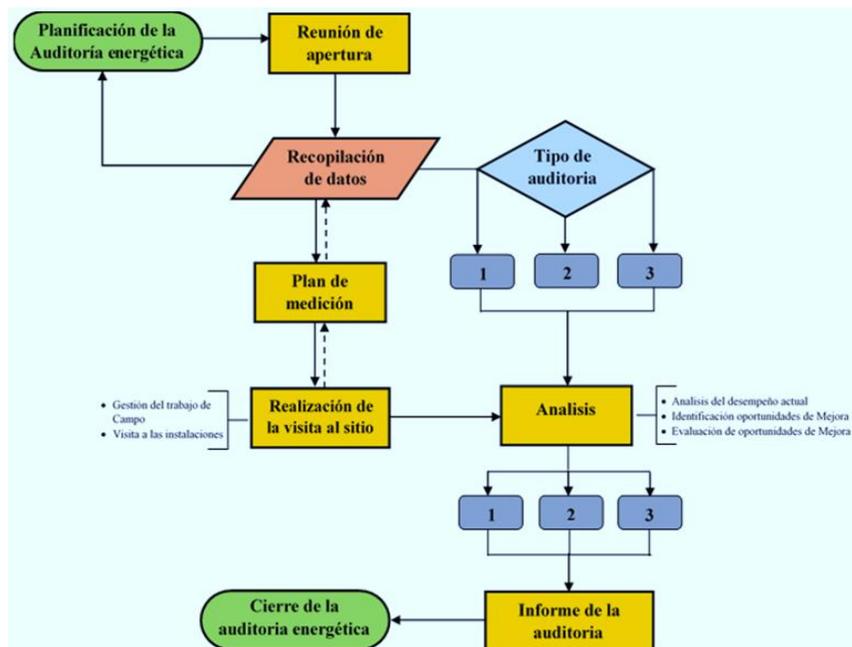


Figura 40. Proceso de auditoría energética adaptado según requisitos ISO50002

Una auditoría energética puede arrojar información sobre una o más partes de la revisión energética. El alcance de una auditoría energética puede comprender una revisión detallada del desempeño energético de una organización, los USE, los sistemas, los procesos que usan energía o los equipos. Por lo general, se basa en una medición y observación adecuadas del desempeño energético actual según el alcance definido de la auditoría energética. Los elementos de salida de la auditoría energética, por lo común, incluyen información sobre el consumo actual de energía y el desempeño energético y pueden venir acompañados por una serie de recomendaciones específicas clasificadas por mejora del desempeño energético o retorno financiero sobre la inversión, con base en el análisis de los datos específicos y las condiciones operativas del emplazamiento [20],[22],[23].

Una auditoría energética puede desarrollarse en siete etapas principales, las cuales involucran una serie de actividades como las que se describen en la Tabla 6.

Tabla 6. Etapas principales de una auditoría energética

<b>Contacto preliminar</b>	Definir alcances, límites y objetivos de la auditoría energética. Identificar intenciones, necesidades y expectativas de la auditoría energética. Definir cronogramas, compromisos y recursos. Solicitar información necesaria requerida antes de iniciar la auditoría y verificar la disponibilidad, validez y el formato de datos de energía y datos de producción, entre otros. Informar a la organización de los equipos o instalaciones necesarias, para llevar a cabo la auditoría energética.
<b>Reunión de apertura</b>	Informar a todas las partes interesadas e involucradas acerca de los objetivos de auditoría energética, así como el alcance, los límites, los objetivos y el nivel de detalle. Definir responsables de la auditoría dentro de la organización. Hacer acuerdos entre las partes.
<b>Recolección de datos</b>	Recopilar información sobre: Datos disponibles sobre procesos, sistemas y/o equipos consumidores, inventarios, características detalladas de los equipos auditados (incluyendo variables relevantes conocidas). Datos históricos de consumos de energía, variables relevantes (producción, temperatura, ocupación, entre otras). Planes futuros que afecten el uso de la energía. Documentos de diseño, operación y mantenimiento. Auditorías o estudios previos relacionados con el uso de energía y el desempeño energético. Tarifas energéticas y otros datos económicos relevantes. Estado del sistema de gestión de la energía.

<b>Trabajo en campo</b>	<p>Evaluar el uso de la energía, de acuerdo con los alcances, límites y el nivel de la auditoría acordados entre las partes.</p> <p>Comprender la operación.</p> <p>Generar ideas.</p> <p>Realizar mediciones y observaciones de una manera confiable, en condiciones normales de operación y bajo condiciones climáticas adecuadas. También resulta beneficioso realizar este procedimiento durante las horas no laborales, períodos de parada, o cuando no se esperan cargas debido a condiciones climáticas.</p> <p>Identificar personal responsable de planta que facilite la instalación de medidores o equipos de monitoreo de energía.</p>
<b>Análisis</b>	<p>Determinar el rendimiento energético actual, según los límites establecidos.</p> <p>Evaluar el impacto de las oportunidades identificadas sobre el desempeño energético.</p> <p>Clasificar y priorizar las oportunidades de mejora identificadas.</p>
<b>Reporte</b>	<p>Asegurar que los requisitos de la auditoría energética acordados con la organización.</p> <p>Resumir las mediciones pertinentes realizadas durante la auditoría energética.</p> <p>Indicar si los resultados del análisis están basados en cálculos, simulaciones o valores asumidos/proyecciones.</p> <p>Resumir el análisis detallando las suposiciones.</p>
<b>Reunión de cierre</b>	<p>Presentar el informe final sobre la auditoría energética, mostrando los resultados de una manera que facilite la toma de decisiones por parte de la organización.</p>

## 2.5. LÍNEA DE BASE ENERGÉTICA

Una Línea de Base Energética (LBE) es una referencia cuantitativa que proporciona la base de comparación del desempeño energético. Esta permite evaluar el consumo, el uso y la eficiencia energética de un equipo, área, departamento, instalación o planta dentro de los límites seleccionados para la instalación del SGE.

De manera que, una LBE es una herramienta esencial para evaluar el progreso de la implementación de un sistema de gestión de la energía, pues permite la comparación del desempeño energético entre el período de tiempo para el cual fue construida y el evaluado por el indicador de desempeño, en donde se han implementado medidas de mejora, jornadas de sensibilización y/o buenas prácticas de operación y mantenimiento, para alcanzar los objetivos y metas establecidas en relación con la política energética.

La selección de una línea de base energética está ligada a retos que puede afrontar la organización, abordando aspectos tales como el tamaño de las instalaciones, el perfil de producción, la cultura organizacional, entre otros. Algunos desafíos frecuentes son el requerimiento de mezclas de productos, o la justificación de múltiples fuentes de energía; otras variables complejas corresponden a retrasos en el tiempo entre los datos de producción y los medidores de energía, la identificación de múltiples variables que pueden afectar el consumo energético en una edificación [13], [23].

Por otra parte, el establecimiento de una LBE debe contar con la participación de diversas personas en su planeación, quienes deben ser capaces de hablar más allá de la simple perspectiva del uso de la energía, e involucrar factores tales como ciclos recurrentes del proceso, eventos que ocurrieron una sola vez en el pasado, y otros que se espera ocurran en los siguientes meses del año. De modo que, al tener en cuenta dichos aspectos, se defina una LBE apropiada para la organización, y se seleccione un método adecuado para su cuantificación como lo presenta la Figura 41.

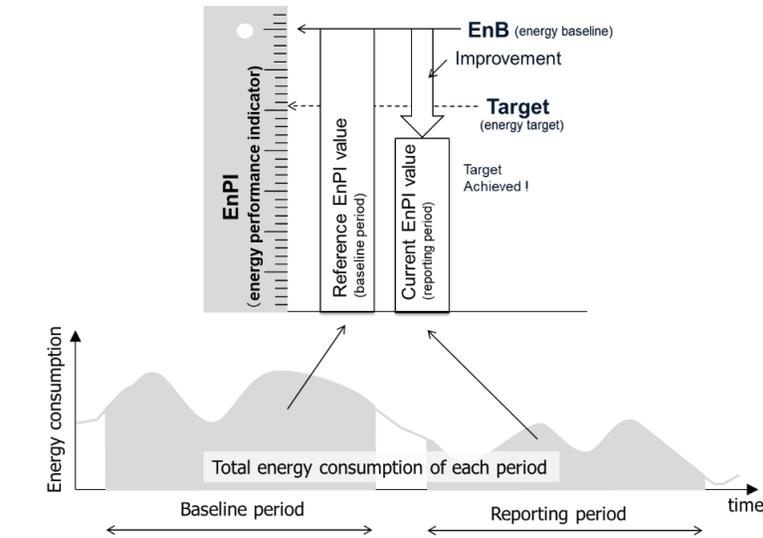


Figura 41. Concepto de periodo base y periodo de reporte para IDE

Fuente: ISO 50006:2014 [29]

Considerando ahora que una línea puede ser establecida como un valor medido hasta un modelo basado en simulaciones, se muestra a continuación la propuesta que realiza la norma ISO 50006 – *Línea de base energética e indicadores de desempeño energético* [29], como ayuda para la selección de una LBE exponiendo utilidad y desventajas del tipo o método escogido.

La Tabla 7 presenta el tipo de líneas de base energéticas (LBE) que las organizaciones pueden utilizar según la norma ISO 50006.

Tabla 7. Tipo de LBE

Tipo de LBE
Consumo Absoluto
Consumo de Energía Específico
Modelo Estadístico
Modelo de Ingeniería o simulación basada en principios científicos

Fuente: ISO 50006:2014 [29]

El tipo de LBE o el método para establecerla, varía dependiendo de la complejidad de la organización, así como de otros factores mencionados. Por ejemplo, con instalaciones pequeñas con un uso sencillo de la energía y variables significativas sencillas de entender, la LBE puede establecerse rápidamente gracias a un método simple.

Sin embargo, en una organización grande, con varias fuentes energéticas, con usos complejos de energía aplicados a varios productos en tiempos variables a lo largo del año; seleccionar y establecer un tipo de línea de base energética adecuada, puede tomar tiempo y requerir esfuerzos basados en el análisis, a través del establecimiento de modelos estadísticos o matemáticos.

### 2.5.1. *Etapas para el establecimiento de una línea de base energética*

A continuación, se presenta en cinco pasos las etapas necesarias para establecer una línea base energética LBE. Esta involucra las etapas mostradas en la Figura 42, partiendo de la definición de límites físicos y/u organizaciones en donde se desea establecer la línea; seguidamente, la identificación de fuentes energéticas primarias o secundarias; la detección de variables significativas de mayor impacto en el consumo de energía dentro de los límites establecidos; y, la recolección de información necesaria en el período de base seleccionado; todo ello, para finalmente cuantificar la LBE a partir del método elegido [15].

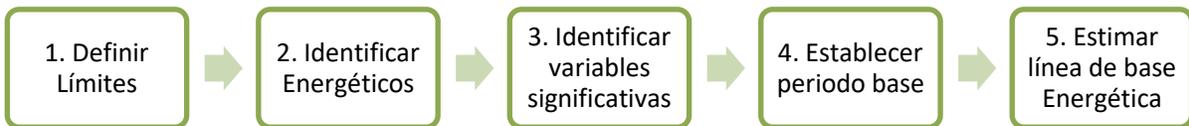


Figura 42. Pasos para el establecimiento de una línea de base energética

#### 2.5.1.1. *Definir los límites de la línea de base energética*

Los límites pueden ser físicos o de lugar y/u organizacionales, tal como los define la organización. Esta primera etapa consiste en identificar todas las instalaciones y operaciones que se hallen incluidas dentro del SGE.

**Límites Físicos:** Conciernen a un proceso, un grupo de procesos, unas instalaciones, una organización completa o múltiples lugares bajo el control de una organización. Ejemplo: una caldera, un edificio.

**Límites organizacionales:** Se refiere a los puestos, divisiones, departamentos o unidades de negocio de una organización, a los cuales se establecen metas de desempeño energético. Ejemplo: una multinacional que cuenta con una línea de ensamble como unidad de negocio en diferentes países. Esta puede seleccionar un límite que incluya todos los lugares que

cuentan con esa línea de ensamble, con el objetivo de evaluar el desempeño y los costos energéticos para un producto dado, ensamblado en múltiples instalaciones.

Los límites físicos y organizacionales pueden sufrir cambios, debido a eventos tales como expansiones de los procesos o cierres parciales de departamentos o áreas productivas, lo cual justifica un restablecimiento de estos, en el que se recopilen los datos y se administra la energía.

#### **2.5.1.2. Descripción de las fuentes de energía**

Una vez se definen los límites, el siguiente paso corresponde a identificar los energéticos utilizados dentro de estos.

Por otro lado, se trata de identificar las fuentes de energía y, en el caso de la planeación de un Sistema de Gestión Energético, se debe abordar el cómo los usos y consumos de energía serán medidos y registrados.

De tal forma, las fuentes de energía son divididas en dos categorías principales: primarias y secundarias. Las primeras se refieren a aquellas provenientes de un recurso natural, como lo son el carbón, el petróleo, la biomasa, la energía solar, entre otras.

Una fuente secundaria, como típicamente la energía eléctrica, viene de una empresa de servicios. No obstante, también puede provenir de fuentes de generación locales, como el sol o el viento, o de la recuperación del calor en efluentes energéticos.

La energía térmica puede provenir de numerosas fuentes de combustible, incluyendo gas natural, derivados del petróleo, carbón o biomasa. Sus fuentes pueden también ser suministradas desde un proveedor externo en la forma de vapor o agua fría.

La mayoría de las instalaciones estándar cuenta con medidores de energía eléctrica y de gas, para la medición del consumo en la frontera del suministro que les llegan de las compañías de servicios. Los registros de las facturas de los servicios identifican la cantidad de energía consumida durante el período de registro, el cual puede ser convertido en el consumo de energía promedio por día; por ejemplo, kWh/día promedio y BTU/día promedio. Estos valores diarios pueden ser recogidos para el período de la LBE y aplicados para su análisis.

#### **2.5.1.3. Definir el período base**

El período seleccionado para construir una Línea de Base Energética, debe ser lo suficientemente largo para que los datos incluyan los diferentes estados operacionales de los equipos, instalaciones y/o áreas dentro de los límites energéticos establecidos.

Así que, el período de medición seleccionado y el intervalo de registro de datos, deben proporcionar una muestra representativa para ser estadísticamente válida en la

construcción de una LBE que proporcione una precisión aceptable, para la estimación de ahorros energéticos y el seguimiento del desempeño energético.

De manera que, la organización debe determinar un período adecuado de datos, considerando la naturaleza de sus operaciones. Una LBE de un año se presenta como la mejor opción. Sin embargo, cuando los registros históricos de datos de las variables relevantes identificadas, no están disponible, se pueden realizar estimaciones basadas en intervalos de datos más cortos, haciendo proyecciones a partir de este análisis.

En la Tabla 8, se analizan tres posibles períodos de tiempo para la recolección de información, durante el establecimiento de una LBE, evaluando las ventajas y requerimientos operacionales y de monitoreo cuando se selecciona.

Tabla 8. Período de base para la estimación de una LBE

Período de la LBE	Ventajas	Requerimientos
<b>Un año</b>	Estimación de una LBE alineada con los objetivos de negocio de la gestión energética, que incluye el rango completo de estacionalidades y el impacto de variables relevantes como clima y otras propias del funcionamiento de la organización (ciclos operativos, demanda del mercado).	Registros históricos confiables y disponibles.
<b>Menor a un año</b>	Se puede establecer una LBE a partir de la evaluación de un trimestre o semestre, considerando que corresponde a un rango de tiempo razonable, donde se capturan patrones operativos representativos de la organización.	Tasas de producción estables a lo largo del año. Suficiente cantidad de registros históricos confiables y disponibles.
<b>Más de un año</b>	La estacionalidad y tendencias de la organización se pueden combinar, para hacer que una LBE multianual resulte óptima. Se adapta a procesos en los cuales existen ciclos de producción anual corto, donde una empresa opera por algunos meses cada año y permanece relativamente inactivo el resto del año. Por ejemplo, una compañía de vinos.	Suficiente cantidad de registros históricos confiables y disponibles de los ciclos de producción.

#### 2.5.1.4. Definir variables significativas

Las variables significativas se refieren a aquellas que más influyen en el consumo de energía de un equipo, instalación o área. En la aplicación de edificios, el clima consigue considerarse una variable significativa, pues el consumo de una instalación puede depender de las condiciones climáticas externas; y, aunque esta variable no es controlable, debe ser considerada en el análisis, para evitar interpretaciones erróneas en la evaluación del desempeño energético.

Para la determinación de las variables significativas de uso de energía, las organizaciones deben tener en cuenta la función u objeto para el cual fue diseñada una instalación o equipo; también una inspección visual, la discusión con el personal de operación, o incluso aproximaciones a través de balances de materia y energía. Las variables significativas de uso de energía pueden variar, desde una sola variable que se correlaciona lineal con el consumo de energía, hasta modelos complejos que combinan, clima y otros factores.

Posteriormente, un análisis estadístico puede demostrar que algunas variables identificadas, en realidad, tienen influencia en el consumo de energía. Estas correlaciones, a menudo, pueden ser de la forma de estadísticas-T o valores-P que demuestran el nivel de confianza de una correlación entre variables. En la práctica, el nivel de confianza del análisis debería de estar en el intervalo de 90-95 %.

**2.5.1.5. Estimar línea de base energética**

Con respecto a la estimación o cuantificación de la LBE, se debe seleccionar un método adecuado, teniendo en cuenta la complejidad de las instalaciones donde se requiere establecer. Para algunas organizaciones, puede ser válido un valor promedio, como para otras un modelo de simulación o regresiones.

En la Tabla 9, se presenta una matriz en donde se analizan tres tipos de instalaciones: simple, moderada, y compleja; también algunos requerimientos, y se recomienda un método para estimar la LBE [15].

Tabla 9. Selección de un método para la estimación de la LBE de acuerdo con el tipo de instalación

Tipo de instalación	Límites	Fuentes de energía	Período de Línea Base	Variables significativas	Ajustes requeridos	Método para la estimación de la LBE
<b>Simple</b>	Instalación única, límites claros	Reporte de energía claro y consistente	Operación estable en cada período	Producto único que impulsa el uso de energía	Ningún factor que requiera ajustes	Proporción: energía específica / Modelo de regresión lineal univariante.
<b>Moderada</b>	Múltiples instalaciones, límites moderadamente claros	Más de una fuente de energía (electricidad y gas)	La producción varía durante el año, con base en estaciones	Producto único; parada por clima o estaciones	Factor único que puede resultar en revisión de la línea de base	Modelo de regresión lineal multivariante. Modelo de regresión no lineal
<b>Compleja</b>	Múltiples instalaciones y/u operaciones	Múltiples fuentes de energía, cogeneración, energía usada como materia prima	La producción cambia constantemente, salida de producto e intensidad energía	Variables significativas complejas, intensidades de energía varían, influencia del clima	Factores importantes que requieren ajustes, cambios en diseño del proceso, nuevos productos	Modelo de regresión no lineal Simulaciones

En particular, cada organización y sus instalaciones son diferentes, en especial, las industrias, presentando características de variados niveles de complejidad, de acuerdo con la Tabla 9. Por ejemplo, una instalación puede tener límites “simples”, variables significativas complejas y un período de base y ajustes requeridos “moderados”; en consecuencia, a menudo una aproximación híbrida es la más adecuada para su tipificación y para la selección del método para la cuantificación de la Línea de Base Energética. La Figura 43 enseña lo que se busca conseguir con una línea de base de energía.

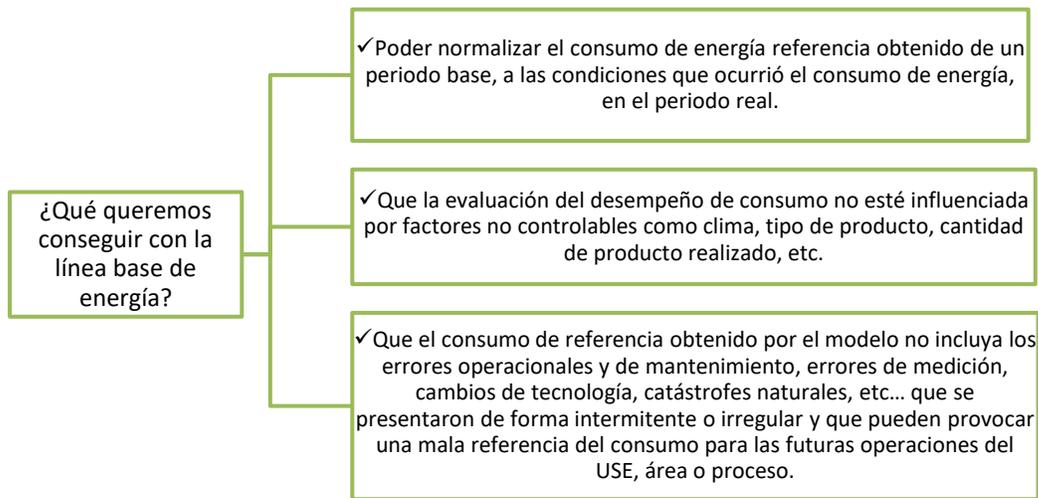


Figura 43. Lo que se quiere conseguir con una LBE

## 2.6. INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO (IDEn)

Las organizaciones deben identificar Indicadores de Desempeño Energético (IDEn) adecuados para la medición y seguimiento, de acuerdo con los requerimientos de la norma ISO 50001:2018.

La medición del desempeño energético a través de los IDEn, se basa en una relación cuantitativa entre el consumo de energía y una o varias variables significativas. Sin embargo, los IDEn pueden definirse como un simple parámetro, una relación o un modelo complejo. Algunos ejemplos de indicadores de desempeño energético pueden incluir el consumo de energía por tiempo, consumo de energía por metro cuadrado y modelos multivariados.

La organización puede elegir los IDEn que indiquen el desempeño energético de sus operaciones, y que puedan ser actualizados cuando las actividades o la LBE cambien y afecten significativamente el indicador [13].

Por consiguiente, en la selección de los IDE es importante identificar el propósito que este tenga, a qué persona de la organización involucra y la cantidad y calidad de los datos e información requerida. Ello, de manera que sea responsabilidad del representante de la

gerencia para la gestión energética y del equipo de expertos en energía, internos y terceros, trabajar en conjunto para el establecimiento de dichos indicadores.

Los IDEn son utilizados para ayudar a normalizar los costos energéticos, identificar oportunidades de mejoramiento, y detectar buenas prácticas operativas para el progreso del desempeño energético. En ese sentido, una organización puede tener múltiples indicadores de desempeño energéticos. Dependiendo de su operación, estos pueden ser establecidos en varios niveles, incluyendo el organizacional, el físico y los relacionados con sistemas. Por ejemplo, se pueden definir a un nivel de toda la organización, a nivel de la planta, o corresponder a un sistema, subsistema o a un equipo específico.

Los conceptos y la metodología empleada para constituirlos y para su seguimiento, deben ser documentados, al igual que las suposiciones, cálculos específicos y previsiones.

### 2.6.1. Selección de indicadores de desempeño energético

El indicador de desempeño energético adecuado se considera aquel que proporciona orientación y retroalimentación sobre el avance propuesto en un plan de acción, de manera que se pueda cumplir con los objetivos y metas establecidas para el mejoramiento del desempeño energético.

Para esto, es necesario tener claridad sobre el propósito del indicador, el cual está relacionado con la intención de evaluar usos, consumos y eficiencia energética dentro de unos límites establecidos; de igual manera, el interés de los usuarios internos de hacer seguimiento a los indicadores, de acuerdo a sus niveles, roles y funciones dentro de la organización; así mismo, los usuarios externos de los indicadores, motivados por la verificación de requisitos legales y evaluación del desempeño energético. Y, finalmente, el reto de contar con la cantidad y calidad de información necesaria para establecer los IDEn requeridos, acorde con el propósito y los usuarios definidos como lo presenta la Figura 44.

Propósito del IDE	Usuarios de los IDE	Información requerida
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Evaluar el consumo de energía</li> <li>•Evaluar los usos de energía</li> <li>•Evaluar la eficiencia energética</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Público interno</li> <li>•Público externo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Estado del sistema de medición</li> </ul>

Figura 44. Aspectos para tener en cuenta en el establecimiento de indicadores de desempeño energético

El propósito de los IDE es definido en la Norma ISO 50001 como la medición y seguimiento del desempeño energético, es decir, la evaluación del consumo de energía, el uso de la misma y la eficiencia energética, con referencia a la LBE establecida.

Así pues, cuantificar elementos específicos del desempeño energético, como lo es el uso, consumo o la eficiencia energética, implica requerimientos asociados a los datos energéticos y su medición; además, debe tener en cuenta métodos de medida, sin desconocer los retos asumidos por la organización cuando afronta la evaluación del desempeño energético.

Por ejemplo, cuantificar el consumo de energía puede basarse en mediciones puntuales o en línea. Ello resulta simple y funciona bien para el establecimiento de IDE en algunas instalaciones, en donde sus entradas no cambian estacionalmente, o con los niveles de producción y cuyos procesos no son muy dependientes de la temperatura. Por otro lado, la organización puede afrontar el reto de no contar con medición energética acorde con los requerimientos del SGEEn.

Con respecto al uso de energía, este relaciona la cantidad de energía consumida para usos específicos. Típicamente los IDEn, para evaluar este aspecto del desempeño energético, se basan en una relación única, como, por ejemplo, el consumo de energía por unidad de producción (kWh/unidad producción), para una instalación industrial; o consumo por área (kWh/m<sup>2</sup>), para una edificación. Para su elaboración, debe contarse con datos de cantidad de energía consumida y de la variable relacionada, cantidades de producción, área de edificios, entre otras. El reto que puede afrontar la organización al implementar indicadores para evaluar el uso de energía, al igual que el consumo, se debe a que la medición de energía existente no sea suficiente, o a la falta de datos de la variable de salida.

En cuanto a la eficiencia energética, definir un IDEn para su evaluación es muy similar a la cuantificación del uso, e implica especificar la cantidad de salidas producidas en relación a la energía consumida. Algunos ejemplos de IDE para la eficiencia energética son energía requerida/energía utilizada (donde la energía requerida puede ser derivada de un modelo teórico o de otra relación); y salida/entrada, puede ser aquella usada por toneladas de producción o los grados día de enfriamiento por unidad de energía usada.

Finalmente, los resultados medibles del desempeño energético, tales como el consumo, el uso y la eficiencia energética, pueden ser cuantificados y evaluados a través de IDE diseñados para estos propósitos.

Los IDEn determinados por la organización deben describir, adecuadamente, el desempeño energético en los distintos niveles, y para diferentes propósitos y usos. Los objetivos de los indicadores pueden ser específicos y relevantes para cierto personal encargado de gestionar la energía, a niveles particulares de la operación.

Los IDEn pueden estar dirigidos a dos tipos de público: uno interno, motivado por la necesidad de gestionar el mejoramiento del desempeño energético; y, otro externo que se interesa en obtener la información derivada de requerimientos legales y otros. Este último público incluye actores regulatorios, asociaciones profesionales y sectoriales, y auditores en ISO 50001. En este sentido cada organización debe determinar por sí misma cómo desea cuantificar el desempeño energético, siguiendo algunos requisitos:

El indicador debe reflejar y demostrar la mejora del desempeño energético

Los valores de los indicadores del desempeño energético establecidos deben ser comparados con sus respectiva(s) líneas base(s).

En caso de que existan variables relevantes que influyan en el valor del indicador y no puedan ser controlables (clima, producción, horas etc.) estas variables deben estar incluidas en la línea base para permitir que la comparación del indicador con su línea base sea en igualdad de condiciones de esas variables.

El método para determinar y actualizar los indicadores de desempeño establecidos debe mantenerse en el sistema como información documentada. A continuación, la Tabla 10 presenta los indicadores mayormente usados en la industria y edificios y sus ventajas y desventajas.

Tabla 10. Indicadores Típicos, ventajas y desventajas

Tipo de indicador	Descripción	Uso	Ventajas	Desventajas	Observaciones
<b>Consumo específico de energía en la industria</b>	Energía/resultado.  Ej. KWh/Kg KWh/unidad MMBTU/Ton	Evaluación del desempeño energético mediante el consumo unitario de energía	Muy usado en la industria. Permite asociación al costo unitario de energía.	Es influenciado por los cambios en la producción o la variable unitaria (denominador) de los períodos a comparar.	Requiere ser utilizado para iguales valores de la producción de los períodos a comparar. Y mediante línea base del indicador.
<b>Consumo específico de energía en sector comercial</b>	Energía/parámetro Ej. KWh /m2 de superficie KWh /visitante	Evaluación del desempeño energético mediante el consumo de energía referido a: m2 de superficie; visitantes; empleados	En caso que el consumo de energía se refiera a parámetros que no cambian (m2 de superficie) es preciso. En caso contrario no.	En caso que el consumo de energía este referido a parámetros que cambian (cantidad de empleados; visitantes), es influenciado por los cambios de estos parámetros de los periodos a comparar.	Requiere ser utilizado para iguales valores de los parámetros que pueden cambiar de los períodos a comparar. Requiere ser utilizado mediante línea base del indicador.

<b>Presupuesto de energía</b>	Energía*Tarifa Ej. \$/mes; \$/año de energéticos.	Evaluación del desempeño energético mensual mediante cumplimiento del presupuesto de energía.	Indicador usado en otras áreas. Cultura de uso a nivel gerencial.	Es influenciado por los cambios en la producción o la variable unitaria (denominador) de los períodos a comparar.	Requiere ser utilizado para iguales valores de la producción de los períodos a comparar. Requiere ser utilizado mediante línea base del indicador.
<b>Consumo de energía/unidad de tiempo</b>	KWH/ mes KWh/ año	Evaluación del desempeño por consumo de energía en iguales periodos de tiempo.	Permite rápida asociación al costo de la energía.	Es preciso para evaluar el desempeño, solo cuando las variables no controlables por la gestión se mantienen constantes (temperatura ambiente, producción, visitantes etc..)	Requiere ser utilizado mediante línea base del indicador.
<b>Modelos de línea base</b>	$E = m * P + E_o$ $E = m_1 * V_1 + m_2 * V_2 + \dots + m_n * V_n + E_o$ <p>Donde: E- consumo de energía o índice de consumo de Energía, m1, m2.mn- constantes del modelo P- producción V1, V2, Vn- variables significativas no controlables Eo- constante</p>	Evaluación del desempeño energético mediante comparación del indicador real con un indicador base, obtenido mediante un modelo univariable o multivariable, estadístico, en un periodo base	Mayor precisión en la evaluación del desempeño al considerar más variables.	Mayor complejidad por la elaboración de la línea base y la identificación de las variables que deben integrar el modelo.	Requiere de una selección adecuada de la información del período base para elaborar el modelo; de una selección adecuada de las variables que intervienen en el modelo y de la verificación del grado de significación del modelo.

A continuación, se presentan en la Figura 45 algunos errores comunes al seleccionar los IDEn.

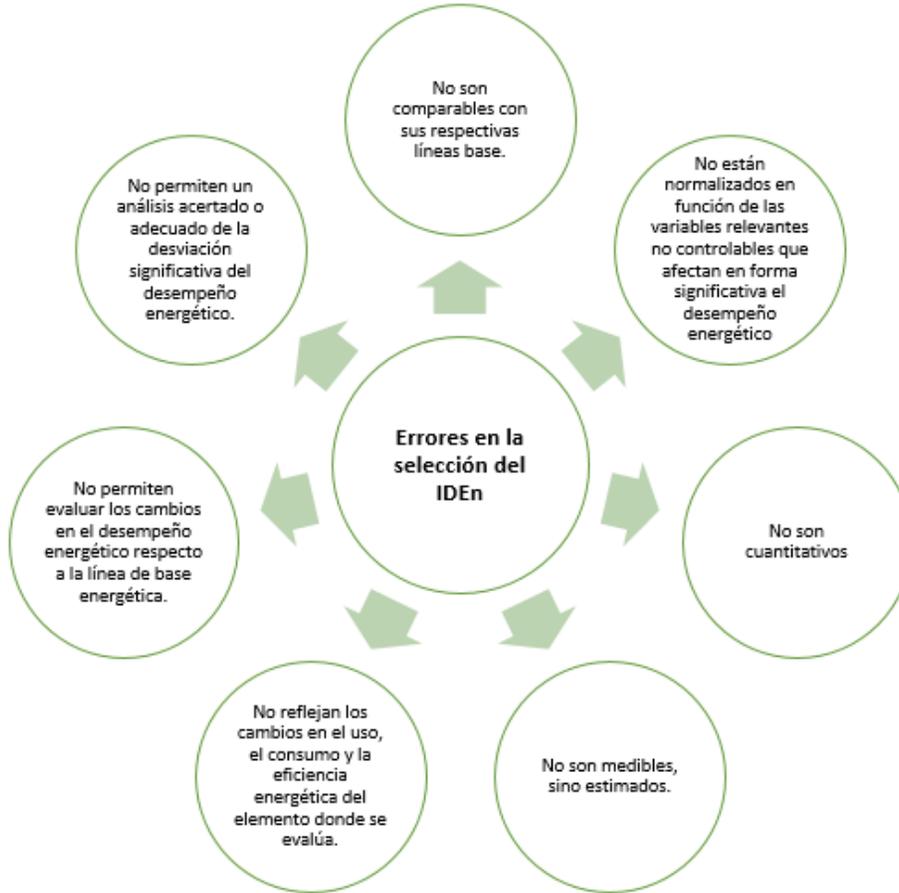


Figura 45. Errores comunes en la selección del IDEn

### 2.6.2. Indicadores de Desempeño Energético en Edificaciones

Los Indicadores de Desempeño Energético son clave para medir el nivel del rendimiento energético de un proceso.

Para el caso de los indicadores de eficiencia energética [30] estos pueden ser agregados (por ejemplo, el consumo total de la edificación) o desagregados (por ejemplo, el consumo de calefacción por área o por piso). Los indicadores por lo general se componen de un consumo de energía como numerador y una información de actividad como denominador.

Dentro de la literatura se encuentran artículos donde los autores han desarrollado y/o propuesto una serie de indicadores para de gestión energética. Como es el caso de Marinakis y Doukas [31] quienes en el artículo "An Advanced IoT-based System for Intelligent Energy Management in Buildings" proponen los indicadores de gestión energética enseñados en la Tabla 11.

Tabla 11. Indicadores para la gestión energética

Índice	Nombre de KPI	Unidad
I-11	Energía eléctrica por superficie	KWh/m <sup>2</sup>
I-12	Energía eléctrica por superficie y por tipo de uso	kWh/m <sup>2</sup> por tipo de uso (iluminación, refrigeración y otro uso)
I-13	Consumo de combustible para calefacción por superficie	lt/m <sup>2</sup> para gas natural
I-14	Energía eléctrica por superficie y usuario	KWh/m <sup>2</sup> /persona o KWh/m <sup>2</sup> /hora usuario
I-15	Consumo de combustible para calefacción por superficie	lt/m <sup>2</sup> /persona
I-21	Potencia eléctrica	kW
I-22	Factor de potencia	cosφ
I-31	Emissiones de CO <sub>2</sub> por consumo de energía eléctrica por superficie	Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>
I-32	Emissiones de CO <sub>2</sub> por consumo de combustible para calefacción por superficie	Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>
I-33	Energía producida por fuentes renovables en sitio	kWh
I-41	Facturación de Energía por superficie	\$/m <sup>2</sup>
I-42	Facturación de combustible para calefacción por superficie	\$/m <sup>2</sup>
I-43	Correlación grados día y usuarios	NA

Fuente: An Advanced IoT-based System for Intelligent Energy Management in Buildings [30].

Según la tabla, el primer grupo de indicadores se enfocan en reportar el consumo de energía del edificio, ya sea de electricidad y otros energéticos. I-11, I-12, I-13 correlacionan el uso de la energía con los metros cuadrados del edificio, ya sea reportando el indicador total o por tipo de uso (iluminación, refrigeración y otro uso). I-14, I-15 son más detallados y proporcionan información del consumo energética por ocupación.

El segundo grupo de indicadores I-21, I-22 tiene un enfoque más técnico con el fin de proporcionar información sobre la operación y la identificación de fallas.

El tercer grupo I-31, I-32; I-33 mide el impacto ambiental asociado al uso de la energía.

El cuarto grupo I-42, I-43 es una medida que relaciona el costo del energético utilizado por unidad de superficie y las oportunidades a través de la correlación con los grados día y los usuarios.

Por su parte Pinzón et al. [31] presenta la importancia de establecer indicadores energéticos en los edificios como base de comparación y monitorización para controlar y reducir las pérdidas energéticas de las distintas actividades y evaluar los potenciales de reducción de dichas pérdidas, los indicadores deben contar con las siguientes características:

- Ser relevante
- Ser entendible

- Basado e información confiable
- Transparente y verificable
- Basado en información específica con relación al proceso/sistema y el tiempo
- Poder medir cambios en una condición o situación a través del tiempo
- Que permita observar de cerca los resultados de iniciativas o acciones
- Ser instrumentos valiosos para determinar cómo se pueden alcanzar mejores resultados en proyectos de desarrollo

El artículo propone 4 tipos de indicadores presentados en la Tabla 12.

Tabla 12. Clasificación de KPI o Indicadores energéticos para edificios

<b>Nivel 1 de indicadores energéticos. Por dependencias/ zonas/pisos</b>			
<b>Indicador</b>	<b>Dependencia, zona o piso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Fuente de información</b>
Índice de consumo energético por piso	Piso 1	kWh/mes – m <sup>2</sup>	Los consumos a partir de los medidores a instalar y las dimensiones físicas construidas (en m <sup>2</sup> ) de los planos arquitectónicos
	Piso 2		
	Piso n		
Índice de potencia instalada por piso	Piso 1	W/m <sup>2</sup>	Potencia instalada del censo de carga o inventario de equipos actualizado y el área de los planos arquitectónicos.
	Piso 2		
	Piso n		
<b>Nivel 2 de indicadores energéticos. Por equipos/sistemas principales</b>			
<b>Indicador Sistema/equipo</b>	<b>Indicador Sistema/equipo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Fuente de información</b>
Índice de consumo energético por aplicación	Equipos de cómputo	kWh/mes-m	Los consumos a partir de los medidores a instalar y las dimensiones físicas construidas (en m <sup>2</sup> ) de los planos arquitectónicos
	Iluminación		
	HVAC		
Índice de potencia instalada por aplicación	Equipos de cómputo	W/m <sup>2</sup>	Potencia instalada del aforo de carga o inventario de equipos actualizado y el área de los planos Arquitectónicos.
	Iluminación		
	HVAC		
<b>Nivel 3 de indicadores energéticos. Por edificio</b>			
<b>Indicador Sistema/equipo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Fuente de información</b>	
Índice de consumo energético por área total	kWh/mes-m <sup>2</sup>	A partir de las facturas de energía y de los planos arquitectónicos.	

Índice de potencia instalada por área total.	W/m <sup>2</sup>	Potencia total instalada del inventario de equipos o de un censo de carga y área de los planos arquitectónicos.
Índice de consumo energético por persona.	kWh/mes-persona	Número total de empleados y calcular el promedio de estudiantes en el edificio.
Índice de potencia instalada por persona.	W/persona	Potencia total instalada del inventario de equipos o censo de carga y con el número total de empleados sumado al promedio de estudiantes en el edificio.
<b>Nivel 4 de indicadores energéticos. Emisiones</b>		
<b>Indicador</b>	<b>Unidad</b>	<b>Fuente de información</b>
Índice de emisiones de CO <sub>2</sub> por área de edificio	kg CO <sub>2</sub> /mes-m <sup>2</sup>	Convertir los consumos energéticos en emisiones CO <sub>2</sub> con el índice actual
Índice de emisiones de CO <sub>2</sub> por persona	kg CO <sub>2</sub> /mes-persona	

Fuente: Implementación de indicadores energéticos en centros educativos CASO DE ESTUDIO: Edificio Alejandro Suárez Copete- Universidad Distrital Francisco José de Caldas [32].

Dentro de los indicadores principales más utilizados en análisis de desempeño energético en edificaciones en los países de la Unión Europea se encuentran:

- Las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> (kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> de superficie útil).
- Consumo anual de energía primaria (kWh/ m<sup>2</sup>año).

Dependiendo del país contarán con uno u otro como indicador principal. Además, existen una serie de indicadores complementarios de eficiencia energética que son:

- Energía primaria no renovable anual (KWh/m<sup>2</sup>año).
- Energía primaria anual procedente de fuentes renovables (KWh/ m<sup>2</sup>año).
- Porcentaje de energía primaria anual procedente de fuentes de energías renovables respecto a la energía primaria total anual.
- Energía primaria total anual desagregada por usos de calefacción, refrigeración, producción de agua corriente sanitaria e iluminación (KWh/ m<sup>2</sup> año).
- Demanda energética anual de calefacción (KWh/ m<sup>2</sup> año).
- Demanda energética anual de refrigeración (KWh/ m<sup>2</sup> año).
- Las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> desagregadas por servicios.

### 2.6.2.1. Indicadores de Gestión Energética

#### Indicador de Eficiencia IEE:

Es un indicador de gestión energética que refleja el comportamiento de los resultados del desempeño energético respecto a la línea de base energética tomando como cumplimiento el valor 1.

Representa en qué porcentaje el consumo de energía de un área, proceso o equipo, ha alcanzado el valor del consumo de la línea de base energética, para iguales cantidades de la variable relevante con la que se construyó la línea base.

Permite conocer en qué porcentaje se aumentó o disminuyó el desempeño energético por causa de un cambio en la eficiencia energética de la tecnología o el proceso, un cambio en las prácticas de uso de la energía o un cambio en el consumo, influenciado por el estado técnico o del mantenimiento de la tecnología.

El indicador se forma por la siguiente expresión:

$$IEE = \frac{E_{medida}}{E_{Base}}$$

Donde:

$E_{Base}$  = Energía que teóricamente se debió consumir según la línea base ( $m \cdot P + E_0$ )

$E_{medida}$  = valor real del consumo de energía medido.

Si  $IEE > 1$  hay una disminución del desempeño ya que el consumo de energía fue superior al de la línea de base establecida como referencia.

Si  $IEE < 1$  hay una mejora del desempeño, puesto que el consumo de energía fue inferior al de la línea de base establecida como referencia, como se ilustra en la Figura 46.

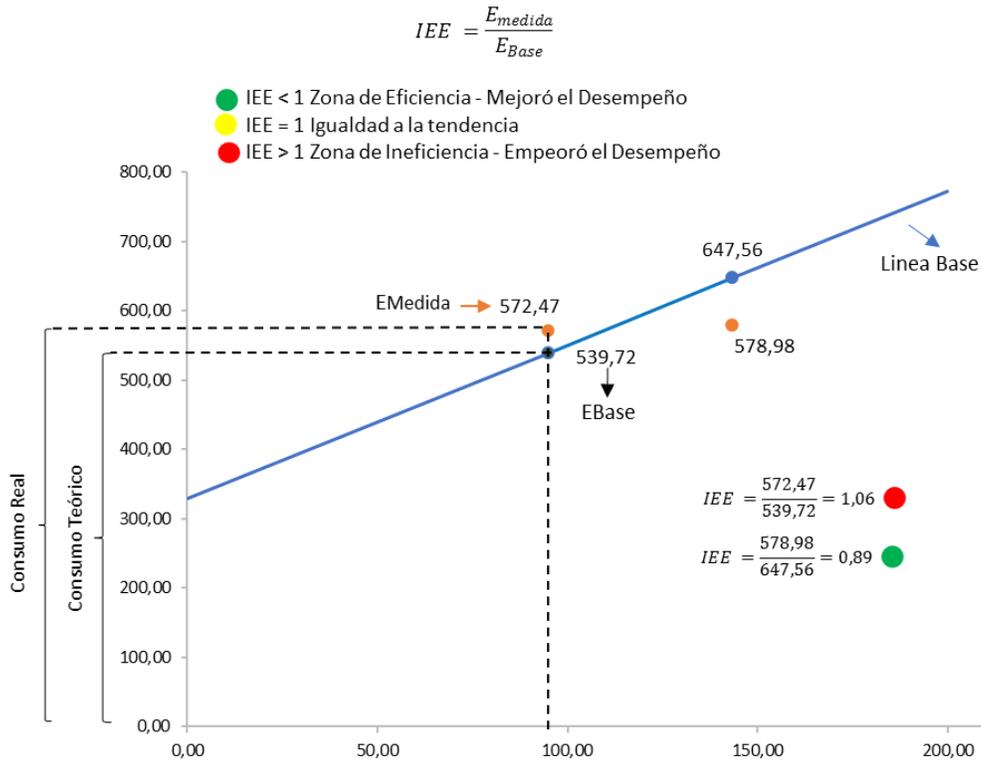


Figura 46. Gráfico ilustrativo del indicador de Eficiencia Energética.

El valor del indicador, en el intervalo de tiempo que sea calculado (horario, diario, mensual, etc.) puede ser graficado. El valor 1 en el gráfico será el valor de cumplimiento del desempeño energético (igual al de la línea base), por encima de 1 será la zona de no conformidad del desempeño y por debajo de 1 la zona de conformidad del desempeño, según se presenta en la Figura 47.

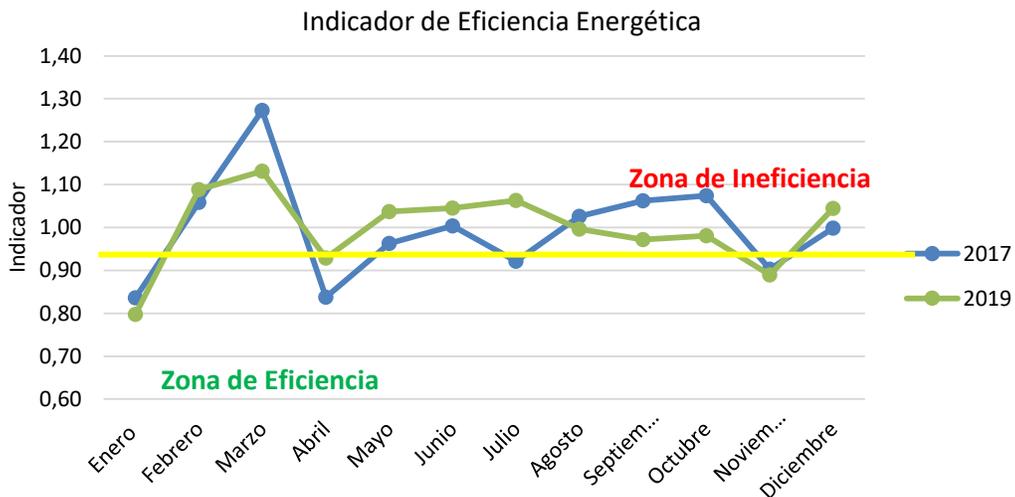


Figura 47. Gráfica seguimiento Indicador de Eficiencia IEE

Este indicador [33] ha sido incorporado recientemente por el protocolo EVO (Energy Performance Indicator (SEnPI)) para hacer seguimiento al desempeño energético en su programa Superior Energy Performance 50001™ (SEP 50001TM).

### **Indicador de tendencia del desempeño energético (CUSUM)**

El indicador de tendencia del desempeño energético consiste en conocer cuál es la tendencia acumulada de las desviaciones del consumo de energía real respecto al de la línea de base energética.

La tendencia de las desviaciones puede tener tres alternativas de comportamiento:

- Oscilaciones entre valores negativos y positivos alrededor del valor cero: indica que no existe una variable relevante que mueva la tendencia de forma permanente hacia arriba o hacia abajo del valor 0. Por tanto, sería indicativo que el proceso está bajo control y no está impactado por una mejora o desmejora del desempeño.
- Tendencia ascendente sobre el valor cero: indica que las desviaciones del consumo de energía real respecto al consumo de la línea de base energética se mantienen, es decir, que el consumo real es mayor al consumo base.
- Tendencia descendente sobre el valor cero: el consumo real es menor que el consumo base.

Si hay un cambio de tendencia de ascendente a descendente o viceversa, indica el efecto de una o más variables relevantes sobre el consumo de energía. Un cambio de pendiente del gráfico ascendente o descendente indica también la influencia de una nueva variable en el mismo sentido de la tendencia. Es decir, me indica la presencia de un factor permanente que afecta esa desviación.

Para construir el indicador de tendencia de desempeño energético se utiliza la técnica estadística CUSUM (cumulative-sum) que significa suma acumulada. Los gráficos CUSUM se basan en la representación de la acumulación de las desviaciones de cada observación respecto a un valor de referencia.

Con la técnica CUSUM se obtendrá la suma acumulativa de las desviaciones del valor del consumo de energía real respecto al consumo de la línea de base energética. Para ello, es necesario calcular la diferencia entre el consumo energético real y el consumo de la línea de base energética:

$$\text{Suma acumulativa} = (E_r - E_{LB})_i + (E_r - E_{LB})_{i-1}$$

Donde:

$(E_r - E_{LB})_i$ : Diferencia entre el valor del consumo de energía real respecto al consumo de la línea de base energética para el periodo  $i$ .

$(E_r - E_{LB})_{i-1}$ : Diferencia entre el valor del consumo de energía real respecto al consumo de la línea de base energética para el periodo inmediatamente anterior.

El primer valor de desviación del consumo de energía en la suma acumulativa coincide con  $E_r - E_{LB}$ . El segundo valor de la revisión de la desviación, en la suma acumulativa, es la suma de la primera desviación más la segunda y así sucesivamente.

Las ventajas del indicador de tendencia CUSUM son:

- Indica la tendencia del desempeño en un periodo dado.
- Permite saber el momento de cambio de tendencia y asociarlo con el cambio de las variables de control operacional o eventos.
- El valor final cuantitativo es el ahorro o desahorro obtenido del desempeño en el periodo analizado.
- Permite cuantificar en el tiempo cuánto cuesta en energía no actuar sobre la tendencia a desmejorar el desempeño energético.

### **2.6.2.2. Indicadores de Impacto Ambiental**

#### **Indicador de emisiones de CO<sub>2</sub>**

El ahorro energético de cualquier fuente trae asociado una mejora ambiental producto de las llamadas emisiones indirectas, las cuales dependen de la fuente de generación o del combustible utilizado. El Factor de Emisiones, representa la cantidad de CO<sub>2</sub> que se libera de la producción de cada unidad de electricidad, o en el caso de combustibles, la cantidad de CO<sub>2</sub> que se libera por unidad consumida de este energético. El indicador de emisiones de CO<sub>2</sub> consistirá en la comparación de la cantidad de CO<sub>2</sub> emitidas con la cantidad de emisiones calculadas con la línea base.

Es el producto del ahorro y/o sobreconsumos por el factor de emisión de CO<sub>2</sub>e. Sus unidades son Kg de CO<sub>2</sub>e y dependerá de las fuentes de generación de la energía que es suministrada al proceso y/o USEn.

Este indicador nos brinda información de las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) dejadas de emitir o emitidas respecto a la línea de base energética establecida.

$$I_M = C_{final} * FactorElectricidad_{CO_2}$$

### **2.6.2.3. Indicadores para edificios cero energía nZEB**

Los indicadores de uso final más usados corresponden a Indicadores de edificios de consumo de energía casi nulo nZEB.

El nuevo CTE-HE 2018 [31] establecerá una serie de limitaciones a los siguientes indicadores:

### Indicador de Consumo de Energía Primaria Total

El objetivo del indicador de consumo de energía primaria total [34], [35] es asegurar un equilibrio entre el uso eficiente de energía procedente de fuentes renovables y el uso de estrategias de reducción de la demanda. El indicador aparece como “equivalente” a un indicador de limitación de la demanda, ya que para alcanzar un valor límite, debe reducirse al máximo la demanda o mejorar la eficiencia de las instalaciones.

El indicador de energía primaria resume toda la energía entregada y exportada (electricidad, calefacción y refrigeración urbanas, combustibles) en un solo indicador, y se calcula a partir de la energía entregada y exportada con el factor de energía primaria nacional como:

$$E_{p,nrem} = \sum_i (E_{del,i} f_{del,nren,i}) - \sum_i (E_{exp,i} f_{del,exp,i})$$

Donde:

$E_{p,nrem}$ : Energía primaria no renovable (kWh/a)

$E_{del,i}$ : Energía suministrada in situ o cerca (kWh/a) del vector energético i

$f_{del,nren,i}$ : Factor de energía primaria no renovable del vector energético suministrado i

$E_{exp,i}$ : Energía exportada in situ o cercana (kWh/a) o el vector energético i

$f_{del,exp,i}$ : Factor de energía primaria no renovable de la energía suministrada compensado por la energía exportada para el vector energético i, que es por defecto igual al factor de la energía suministrada, si no está definido a escala nacional de otra manera.

$$EP_p = \frac{E_{p,nrem}}{A_{net}}$$

$EP_p$ : Indicador de energía primaria (kWh/m<sup>2</sup>·a)

$E_{p,nrem}$ : Energía primaria no renovable (kWh/a)

$A_{net}$ : Área útil (m<sup>2</sup>) calculado según la definición nacional

### Indicador de Consumo de energía primaria no renovable

El objetivo del indicador de consumo de energía primaria no renovable (Cep;nren) [34], [35] es limitar el uso de recursos no renovables para reducir las emisiones asociadas de gases de efecto invernadero, favorecer la independencia energética y evitar el agotamiento de recursos no renovables

Limitando el consumo de energía primaria no renovable, se pretende promover el uso de la energía procedente de fuentes renovables. Se trata de un indicador que se utiliza actualmente, comprensible por los agentes del sector y fácil de calcular, ya que contamos con factores de conversión entre energías finales y energía primaria no renovable.

Este indicador forma parte de los recogidos por la norma ISO 52000-1. En esta norma se establece una posibilidad de diferenciar dos indicadores en función de si la energía renovable se ha producido en el propio edificio o no. La generación de energía renovable in situ puede producirse mediante energía solar térmica o fotovoltaica y energía mini-eólica. También tienen consideración de energía renovable la biomasa y la geotermia, hidrotermia y aerotermia.

$$E_{p,nrem} = CET_{RED\ Medido} * f_{nrem\ Colombia}$$

Donde:

$E_{p,nrem}$ : Energía primaria no renovable (kWh/a)

$CET_{RED\ Medido}$ : Medida del Consumo Eléctrico Total de la red

$f_{nrem\ Colombia}$ : Factor de Electricidad no Renovable para Colombia obtenido de la matriz energética

### Indicador de Consumo de energía primaria renovable

Para calcular la cuota de uso de energías renovables, la proporción de energías renovables RER, todas las fuentes de energía renovables tienen que ser contabilizadas. Entre ellas se incluyen la energía solar térmica, la electricidad solar, la energía eólica e hidroeléctrica, la energía renovable captada a partir de fuentes de calor ambiente mediante bombas de calor y la refrigeración gratuita, los combustibles renovables y la energía renovable fuera del emplazamiento. Las fuentes de calor ambiente de las bombas de calor y la free-cooling deben incluirse en el límite del sistema de uso de energía renovable, porque en el cálculo de la RER, las bombas de calor y la free-cooling no sólo se tienen en cuenta en el cálculo de la energía suministrada basado en el COP, sino también en la energía extraída de las fuentes de calor ambiente.

La proporción de energía renovable se calcula en relación con todo el uso de energía en el edificio, en términos de energía primaria total. Se tiene en cuenta que la energía exportada compensa la energía entregada. Por defecto, se considera que la energía exportada compensa la mezcla de la red o, en el caso de la energía térmica, la mezcla de la red de calefacción o refrigeración urbana. Para la energía renovable in situ y cercana, el factor de energía primaria total es 1,0, y el factor de energía primaria no renovable es 0.

La ecuación RER basada en la energía primaria total es la siguiente:

$$RER_p = \frac{\sum_i E_{ren,i} + \sum_i ((f_{del,tot,i} - f_{del,nrem,i}) E_{del,i})}{\sum_i E_{ren,i} + \sum_i (E_{del,i} f_{del,tot,i}) - \sum_i (E_{exp,i} f_{exp,tot,i})}$$

Donde:

$RER_p$ : Proporción de energía renovable basada en la energía primaria total

$E_{ren,i}$ : Energía renovable producida in situ o en las proximidades para el vector energético i, (kWh/a)

$f_{del,tot,i}$ : Factor de energía primaria total del vector energético suministrado i

$f_{del,nren,i}$ : Factor de energía primaria no renovable para el vector energético suministrado i

$E_{del,i}$ : Energía suministrada en el lugar o en las cercanías (kWh/a) para el vector energético i

$f_{exp,tot,i}$ : Factor de energía primaria total de la energía suministrada compensado por la energía exportada para el vector energético i

$E_{exp,i}$ : Energía exportada in situ o en las cercanías (kWh/a) para el vector energético i

$$E_{p,rem} = CET_{Renovable\ Medido} * 1 + CET_{RED\ Medido} * f_{rem\ Colombia}$$

Donde:

$E_{p,rem}$ : Energía primaria renovable (kWh/a)

$CET_{Renovable\ Medido}$ : Medida del Consumo Eléctrico Total generado de Energía renovable

$CET_{RED\ Medido}$ : Medida del Consumo Eléctrico Total de la red

$f_{rem\ Colombia}$ : Factor de Electricidad Renovable para Colombia obtenido de la matriz energética

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]IEA, “Indicadores de Eficiencia Energética: Bases Esenciales para el Establecimiento de Políticas”, Agencia Int. Energía, p. 182, 2015.
- [2]A. McKane et al., “Predicting the quantifiable impacts of ISO 50001 on climate change mitigation”, *Energy Policy*, vol. 107, núm. May, pp. 278–288, 2017.
- [3]H. Kanneganti et al., “Specification of energy assessment methodologies to satisfy ISO 50001 energy management standard”, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 23, núm. September, pp. 121–135, 2017.
- [4]B. Gopalakrishnan, K. Ramamoorthy, E. Crowe, S. Chaudhari, y H. Latif, “A structured approach for facilitating the implementation of ISO 50001 standard in the manufacturing sector”, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 7, pp. 154–165, 2014.
- [5]M. Benedetti, V. Cesarotti, y V. Introna, “From energy targets setting to energy-aware operations control and back: An advanced methodology for energy efficient manufacturing”, *J. Clean. Prod.*, vol. 167, pp. 1518–1533, 2018.
- [6]W. A. Pelsler, J. C. Vosloo, y M. J. Mathews, “Results and prospects of applying an ISO 50001 based reporting system on a cement plant”, *J. Clean. Prod.*, vol. 198, pp. 642–653, 2018.
- [7]F. Bonacina, A. Corsini, L. De Propris, A. Marchegiani, y F. Mori, “Industrial Energy Management Systems in Italy: state of the art and perspective”, vol. 82, pp. 562–569, 2015.
- [8]B. Jovanović, J. Filipović, y V. Bakić, “Energy management system implementation in Serbian manufacturing – Plan-Do-Check-Act cycle approach”, *J. Clean. Prod.*, vol. 162, núm. 2017, pp. 1144–1156, 2017.
- [9]V. António da Silva Gonçalves y F. J. Mil-Homens dos Santos, “Energy management system ISO 50001:2011 and energy management for sustainable development”, *Energy Policy*, vol. 133, núm. June, p. 110868, 2019.
- [10]C. Cooremans y A. Schönenberger, “Energy management: A key driver of energy-efficiency investment?”, *J. Clean. Prod.*, vol. 230, pp. 264–275, 2019.
- [11]J. M. Sousa Lira, E. G. Salgado, y L. A. Beijo, “Which factors does the diffusion of ISO 50001 in different regions of the world is influenced?”, *J. Clean. Prod.*, vol. 226, pp. 759–767, 2019.
- [12] SGS Tecnos S.A., “Actualización ISO 50001: avanzando hacia la implementación de la norma internacional | SGS España”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.sgs.es/es-es/news/2018/11/actualizacion-iso-50001>. [Consultado: 27-ago-2019].
- [13] ISO, *ISO 50001:2018 Energy management systems - Requirements with guidance for use*. SUIZA, 2018.
- [14] P. P. Poveda-Orjuela, J. C. García-Díaz, A. Pulido-Rojano, y G. Cañón-Zabala, “ISO 50001: 2018 and its application in a comprehensive management system with an energy-performance focus”, *Energies*, vol. 12, núm. 24, 2019.
- [15] R. Castrillón y A. Gonzalez, *Metodología Para la Planificación Energética a Partir de la Norma ISO 50001*. Cali, 2018.

- [16] Red Colombiana de Conocimiento en Eficiencia Energética – RECIEE, *Implementación de un sistema de Gestión de la Energía – Guía con base en la norma ISO 50001:2018*, 2da ed. Colombia, 2019.
- [17] D. R. Anderson, D. J. Sweeney, y T. A. Williams, *Estadística para administración y economía*, 10a ed. México DF, 2008.
- [18] R. Castrillón, E. C. Quispe, A. Gonzalez, M. Urhan, y D. Fandiño, *Metodología para la implementación del Sistema de Gestión Integral de la Energía. Fundamentos y casos prácticos*. 2015.
- [19] J. C. Campos, E. D. Lora, C. A. Rofriguez, R. M. Contreras, E. C. Quispe, y R. Castrillón, *Herramientas para la implementación de un Sistema de Gestión Integral de la Energía en la industria Petrolera Upstream y Downstream*. Barranquilla, 2011.
- [20] A. Aranda, F. Barrio, I. Zabalza, y S. Díaz, *Técnicas para la elaboración de auditorías energéticas en el sector industrial*. Zaragoza, 2010.
- [21] H. Kume, *Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad*. Bogotá: Norma, 2002.
- [22] ISO, *ISO 50002:2014 Energy audits — Requirements with guidance for use*. SUIZA, 2014.
- [23] Z. K. Morvay y D. D. Gvozdenac, *Applied Industrial Energy and Environmental Management*. 2009.
- [24] IONOS, “Brainstorming o lluvia de ideas: definición, técnicas y ejemplos - IONOS”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.ionos.es/startupguide/productividad/brainstorming-o-lluvia-de-ideas/>. [Consultado: 27-ago-2019].
- [25] I. Legaz y A. Luna, “Experiencia de innovación educativa con ‘Brainstorming’ en la Universidad de Murcia”, Murcia, 2014.
- [26] D. Saygin, E. Worrell, M. K. Patel, y D. J. Gielen, “Benchmarking the energy use of energy-intensive industries in industrialized and in developing countries”, *Energy*, vol. 36, núm. 11, pp. 6661–6673, 2011.
- [27] A. A. Fernández, *Revisión de metodologías y aplicaciones de Benchmarking Energético en la Industria*, 1a ed. Sevilla, 2014.
- [28] L. Martínez, “Variables relevantes y factores estáticos | ISO 50001 - Gestión de la energía”. [En línea]. Disponible en: <http://50001iso.com/?p=66>. [Consultado: 27-ago-2019].
- [29] ISO 50006, “Energy management systems - Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) - General principles and guidance”, 2016.
- [30] M. Moreno, “Metodología para la Aplicación de Sistemas BMSy BEMS para la Operación Eficiente de Edificios”, Universidad Autónoma de Occidente, 2019.
- [31] V. Marinakis y H. Doukas, “An Advanced IoT-based System for Intelligent Energy Management in Buildings”, *Sensors*, vol. 18, núm. 2, p. 610, feb. 2018.
- [32] J. D. Pinzón, A. Corredor, F. Santamaría, J. A. Hernández, y C. L. Trujillo, “Implementación de indicadores energéticos en centros educativos CASO DE ESTUDIO: Edificio Alejandro Suárez Copete- Universidad Distrital Francisco José de Caldas”, *Rev. EAN*, pp. 186–201, 2012.

[33] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, “Superior Energy Performance 50001™ Program Measurement & Verification Protocol: 2019”. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, California, p. 38, 2019.

[34] Ministerio de Fomento, *Documento de bases para la actualización del Documento Básico DB-HE*. España, 2016, p. 13.

[35] Comité técnico CTN 100 y Asociación Española de Normalización, “Eficiencia energética de los edificios Evaluación global de la eficiencia energética de los edificios Parte 1: Marco general y procedimientos (ISO 52000-1:2017)”, Madrid, 2019.

## **CAPÍTULO 3: MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LÍNEAS BASES**

### **BASES**

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos para la aplicación de los modelos de estimación de líneas bases e indicadores, como respuesta a la necesidad de establecer una referencia que permita medir ahorros y pronosticar consumos futuros cuando se requiera hacer gestión energética en una edificación. A lo largo de la investigación se identificó que existen numerosos vacíos en torno a las condiciones para la recolección de los datos, procesarlos y dar la validación estadística. Esto permite tener la certeza que el valor establecido como referencia o línea de base energética es válido para el periodo de análisis.

Desde esta perspectiva, en el desarrollo de este capítulo, partiremos de los cuatro modelos propuestos por la norma ISO50006, para establecer una Línea base energética e indicadores, desarrollando las bases teóricas para la implementación de cada modelo y la aplicación del mismo, según los recursos disponibles tanto de medición como objetivos de ahorro. Cabe mencionar que la norma propone los modelos, pero no desarrolla las bases teóricas, métodos estadísticos y criterios para determinar si una línea base o un indicador son válidos para establecer una referencia de consumo y posteriormente un ahorro energético.

A continuación, hacemos una breve descripción de los métodos recomendados por la norma ISO50006 y seguidamente se mostrará el tratamiento estadístico realizado en función de contar con una línea base energética validada que permita monitorizar, implementar indicadores y evaluar medidas de ahorro energético.

#### **Medición del valor absoluto de Energía**

Para los procesos en los que la organización no tiene datos que indiquen que las variables relevantes afectan el rendimiento energético, el consumo absoluto puede servir como el valor de indicador y su respectiva línea base energética, puesto que, permiten estimar a partir de información pasada, el consumo de energía futuro, considerando que el sistema en estudio no sufrirá modificaciones. De tal forma que la medición de reducciones o incrementos en el uso o consumo absoluto de la energía; resulta de utilidad para el cumplimiento de requisitos legales que se basen en ahorros absolutos; seguimiento y control de inventarios y costos energéticos; también es usado para la comprensión de las tendencias en el consumo de la energía y para cuantificar el gasto energético a través de procesos de medición directa, usando un instrumento de medición de energía o indirecta usando un factor de conversión [1].

Este modelo permite cuantificar el consumo energético que se ha realizado en la operación de un servicio HVAC o iluminación en un edificio durante un periodo de tiempo. El modelo medición del valor absoluto de energía, considera una única variable, como es el consumo de energía del sistema en estudio, cuantificada en periodos de análisis.

### **Cociente de los valores medido o relación simple**

El modelo cociente de valores medidos, kWh /m<sup>2</sup> a, también conocido como consumo de energía específico de intensidad energética en edificios IE, se usa comúnmente porque es simple, pero supone que no hay un consumo de energía de base (fijo). De tal forma, que resulta útil para el seguimiento de la eficiencia energética de sistemas que tienen una única variable relevante; seguimiento de sistemas con una carga base muy pequeña o inexistente; estandarización de comparaciones entre múltiples instalaciones organizacionales (benchmarking), en organizaciones que operan múltiples instalaciones de uso similar, este indicador es utilidad para comparar el desempeño energético de una instalación respecto a las otras, o para compararse contra estándares de otros edificios similares para el cumplimiento de requisitos legales basados en eficiencia energética; también pueden expresar la eficiencia energética de una pieza de equipo o de un sistema.

### **Modelo estadístico**

Los modelos estadísticos se desarrollan utilizando datos del período de referencia para cuantificar el impacto de una o más variables relevantes en el consumo de energía. Los modelos estadísticos aplicados a edificios cuantifican la influencia de variables independientes, como los grados día GD climáticos de temperatura exterior, en la variable dependiente, consumo de energía. El resultado es una relación matemática mediante la cual se puede predecir el consumo de energía utilizando los valores de las variables relevantes, con una pronóstico razonable.

La validez del modelo debe confirmarse mediante pruebas estadísticas. Por ejemplo, el  $R^2$  ajustado indica con qué precisión el modelo predice el consumo de energía real. Los resultados también dependen de la calidad y cantidad de datos.

Antes de realizar la regresión, el usuario debe determinar si el modelo debe ser lineal o no lineal.

### **Modelo de ingeniería o simulación**

Los modelos basados en ingeniería pueden representar una gran cantidad de variables relevantes. La preparación de modelos de ingeniería o simulación, requiere un conocimiento detallado del comportamiento del consumo de energía de la energía utilizando el sistema que se está modelando. El modelado basado en ingeniería se puede usar cuando no hay datos anteriores disponibles.

Los modelos de ingeniería también son útiles cuando existen variables importantes que no son independientes entre sí, como la temperatura y el caudal, en modelos de edificaciones completas que tienen en cuenta horas de operación, sistemas de climatización (HVAC) distribuidos vs centralizados y variación en las necesidades de los ocupantes.

Los indicadores obtenidos con modelos de ingeniería son de gran utilidad para medir el desempeño energético debido a cambios operacionales cuando las variables a considerar son numerosas; también en procesos y/o sistemas transitorios que involucran ciclos dinámicos de retroalimentación o en sistemas que con variables relevantes interdependientes (como temperatura y el caudal); resultan adecuados para estimar el desempeño energético en una etapa de diseño.

Considerando ahora que una línea puede ser establecida como un consumo absoluto medido hasta un modelo de ingeniería o simulación, se presenta una tabla donde se resume la selección de una LBE exponiendo utilidad y desventajas del tipo o método escogido.

La Tabla 13, presenta los tipos de indicadores y líneas base propuesto por la norma ISO 50006 versión 2016.

Tabla 13. Tipos de indicadores y líneas base propuesto por la norma ISO50006

Tipo de LBE	Útil para	Ejemplos	Observación
<p><b>Medición de valor de energía</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Medición de la reducción en el uso absoluto o consumo de energía.</li> <li>- Cumplir los requisitos reglamentarios basados en ahorros absolutos.</li> <li>- Monitoreo y control de las reservas y costos de energía.</li> <li>- Comprensión de las tendencias en el consumo de energía.</li> <li>- Supervisión del rendimiento energético.</li> <li>- Determinar la mejora del rendimiento energético en los casos en que no hay variables relevantes que afecten el consumo y la carga base sea insignificante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consumo de energía (kWh, GJ)</li> <li>- Consumo de energía (kWh) para iluminación.</li> <li>- Consumo de combustible (GJ) de las calderas.</li> <li>- Consumo de electricidad (kWh) durante horas pico.</li> <li>- Ahorros energéticos totales (GJ) de programas relacionados con eficiencia energética</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No tiene en cuenta los efectos de las variables relevantes, dando resultados engañosos para la mayoría de las aplicaciones.</li> <li>- No mide la eficiencia energética.</li> <li>- Se puede obtener de un medidor de servicios públicos / factura</li> <li>- kW no tiene en cuenta el tiempo de uso</li> </ul>

<p><b>Cociente de valores medidos</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Expresar la eficiencia energética de un equipo o sistema, particularmente en condiciones estándar o equivalentes.</li> <li>- Monitorear la eficiencia energética de los sistemas que tienen solo una variable relevante</li> <li>- Comparaciones entre múltiples instalaciones u organizaciones (benchmarking)</li> <li>- Cumplir los requisitos reglamentarios basados en la eficiencia energética.</li> <li>- Comprender las tendencias de eficiencia energética.</li> <li>- Usado comúnmente en varios sectores económicos y como parte de los requisitos legales de presentación de informes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kWh / tonelada de producción</li> <li>- GJ / unidad de producto</li> <li>- kWh / m2 de superficie útil</li> <li>- GJ / hombre-día</li> <li>- Litros de combustible por kilómetro de pasajero</li> <li>- Eficiencia de conversión de una caldera (%)</li> <li>- Energía de entrada / energía de salida en instalaciones de generación de energía (tasa de calor)</li> <li>- kWh / MJ para sistemas de enfriamiento</li> <li>- kW / Nm3 para sistemas de aire comprimido</li> <li>- L / 100km</li> <li>- kWh / valor agregado en unidad de moneda</li> <li>- kWh / unidad de ventas</li> <li>- Tendencias y seguimiento de la eficacia del compresor de aire (generalmente kW / cfm) o la eficiencia de la caldera (%) para indicar cuándo está cambiando el rendimiento del equipo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Típicamente, fácil de calcular e implica un grado de normalización</li> <li>- Puede ser engañoso, especialmente el consumo específico de energía (SEC) (por ejemplo, kJ / ton y kJ / ocupante), y debe usarse con precaución y después de una cuidadosa consideración.</li> <li>- Muy pocos sistemas no tienen carga base o solo una variable relevante</li> <li>- Como métricas de mejora del rendimiento energético, deben evitarse los cálculos del valor de EnPI de tipo SEC, a menos que se requiera lo contrario para informes organizativos o reglamentarios. Cuando se requieren SEC, sería una buena práctica incluir los supuestos subyacentes al informar estos valores.</li> <li>- Debe usarse con precaución para determinar e informar la mejora del rendimiento del equipo</li> <li>- Las líneas base de tipo SEC pueden no cumplir con los requisitos de normalización en ISO 50001: 2018</li> </ul>
<p><b>Modelo Estadístico</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema con una o más variables relevantes y un consumo significativo de energía de carga base</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desempeño energético de una instalación de producción con dos o más tipos de productos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El desarrollo de modelos estadísticos debe incluir la consideración de la relación de ingeniería entre las variables</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A nivel del sistema y de la organización.</li> <li>- Determinar la mejora del rendimiento energético en condiciones comparables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desempeño energético de una instalación con una carga base.</li> <li>- Desempeño energético de un hotel con tasa de ocupación y temperatura exterior variables.</li> <li>- Relación entre el consumo de energía de una bomba/ventilador y la tasa de flujo.</li> </ul>	<p>relevantes y el consumo de energía. A medida que el modelo de regresión examina las relaciones entre el consumo de energía y varias variables relevantes, cada variable tendrá una correlación diferente con el consumo de energía cuando la regresión se realice con una sola variable, o con diferentes combinaciones de otras variables.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Los modelos de regresión lineal con una o más variables relevantes se usan comúnmente y se consideran una práctica recomendada por muchos profesionales al monitorear el rendimiento energético y determinar la mejora del rendimiento energético para una instalación</li> <li>- Si se desarrolla con relaciones de ingeniería lógica entre el consumo de energía y las variables relevantes, los modelos estadísticos pueden tener en cuenta el consumo de energía de base y las variables relevantes con una incertidumbre razonable.</li> <li>- El modelo de regresión estadística solo es válido cuando se cumplen ciertos supuestos. Por ejemplo, las variables relevantes deben ser</li> </ul>
--	--	---	---

			<p>independientes y los datos deben estar normalmente distribuidos. Si los supuestos estadísticos básicos no se cumplen, se requieren técnicas estadísticas avanzadas, pero el esfuerzo de llevar a cabo este análisis avanzado puede no ser justificable</p>
<p><b>Modelo de Ingeniería o simulación</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluar el rendimiento energético donde el uso de energía y las variables relevantes son numerosas. Muchas industrias tienen modelos de ingeniería sofisticados, rigurosos y ampliamente aceptados para procesos específicos.</li> <li>- Para complementar las mediciones de flujo de energía y, en algunos casos, para inferir o calcular efectivamente los flujos de energía a partir de variables relevantes.</li> <li>- En una fase de diseño para optimizar conceptualmente el rendimiento energético o estimar la mejora del rendimiento energético para una EPIA específica antes de realizar inversiones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El modelado de edificios, incluida la simulación calibrada, es otro ejemplo de cálculo de un valor de EnPI a partir de modelos de ingeniería.</li> <li>- Modelo de una refinería de petróleo.</li> <li>- Los modelos de ingeniería pueden usarse incluso si las variables relevantes no son independientes entre sí (p. Ej. Temperatura y presión)</li> <li>- Modelo de un horno de arco eléctrico: además de los flujos eléctricos y de gas medidos, se agrega polvo de carbono al lote para ajustar la química del acero. Este carbono también agrega energía de combustión al lote, y aunque normalmente se rastrea el número de bolsas, el modelo de proceso a menudo se usa para calcular la contribución de energía. Modelos de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La recopilación de datos y el requisito de cuantificación de EnPI deben revisarse para los EnPI seleccionados.</li> <li>- Algunas veces denominadas simulaciones, los modelos de ingeniería pueden capturar el rendimiento energético de sistemas e instalaciones simples o complejos.</li> <li>- Los modelos de ingeniería pueden encapsular una gran cantidad de variables relevantes y proporcionar información sobre el proceso y / o la operación transitoria del sistema cuando se calibra adecuadamente al rendimiento medido.</li> <li>- Si están bien calibrados, los modelos de ingeniería pueden proporcionar una base normalizada para determinar la mejora del rendimiento energético.</li> </ul>

		edificaciones completas que tienen en cuenta horas de operación, sistemas de climatización (HVAC) distribuidos vs centralizados y variación en las necesidades de los ocupantes	- El modelado basado en ingeniería también se puede utilizar para calcular directamente las pérdidas o ganancias de energía, por ejemplo. Recuperación adicional de calor residual.
--	--	---	---

Fuente: Traducción de la norma ISO 50006 versión 2016

En este sentido, la selección de una línea de base energética está ligada a retos que puede afrontar la organización, abordando aspectos tales como el tamaño de las instalaciones, el perfil de producción, la cultura organizacional, niveles de ocupación en una edificación, condiciones climáticas entre otros. En este sentido, el establecimiento de una LBE debe contar con la participación de diversas personas en su planificación, quienes deben ser capaces de hablar más allá de la simple perspectiva del uso de la energía, e involucrar factores tales como ciclos recurrentes del proceso, eventos que ocurrieron una sola vez en el pasado, y otros que se espera ocurran en los siguientes meses del año. De modo que, al tener en cuenta dichos aspectos, se defina una LBE apropiada para la organización, y se seleccione un método adecuado para su cuantificación.

La Figura 48 presenta un esquema para ejemplificar el proceso para desarrollar, usar y actualizar indicadores y líneas base según la recomendación de la ISO 50006.

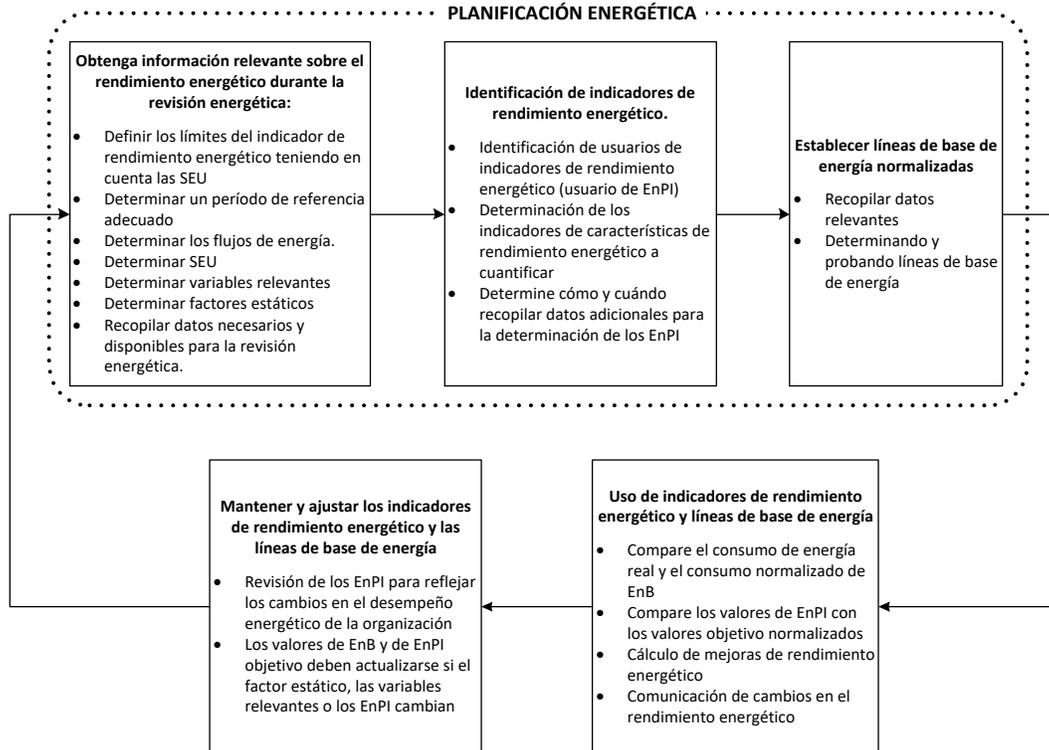


Figura 48. Diagrama para ejemplificar el proceso para desarrollar, usar y actualizar IDE y LBE según la norma ISO 50006. Tomado y adaptado de la norma ISO 50006 versión 2016

Para implementar una línea de base energética basado en el modelo de consumo absoluto y consumo energético específico se propone utilizar el análisis estadístico basado en series de tiempos. Las mismas han sido utilizadas como herramienta de pronóstico, para examinar patrones, tendencias y ciclos del pasado para predecir patrones, tendencias y ciclos en el futuro [2]. Contreras et al. [3] presenta un caso de estudio, donde implementa series de tiempo en una empresa dedicada al almacenamiento de productos perecederos, con el fin de estimar el volumen de almacenamiento y así, poder prever los requerimientos de instalaciones adicionales, personal y materiales necesarios para la movilidad de los productos. En el artículo “Estudio del pronóstico de la demanda de energía eléctrica, utilizando modelos de series de tiempo” [4], los autores describen el pronóstico de demanda de energía eléctrica usando series de tiempo bajo la metodología ARIMA (Autorregresive-Integrated-Moving Average), el paquete estadístico SPSS, teniendo datos históricos de un año. Sergio Botero y Jovan A. Cano [5], por su parte implementaron y analizaron las series de tiempo para predecir los precios de la energía eléctrica en la bolsa de Colombia, donde se obtiene que entre mayor sean los datos del histórico, mejor es el modelo pronóstico. Valencia et al. [6] en el artículo “Modelo de promedios móviles para de pronóstico horario de potencia y energía eléctrica”, realizan el modelo de pronóstico horario de energía y potencia eléctrica usando series de tiempo, bajo la metodología de promedios móviles. Deb et al. [7] revisó 9 metodologías de series de tiempo para pronosticar el consumo de energía en edificios existentes, donde obtuvo que el modelo que

más se ajustó a su caso de estudio fue el “hibrido” que combina dos o más técnicas de pronóstico.

A continuación, se describen algunos de los conceptos teóricos más importante para la aplicación de esta técnica y las validaciones necesaria para poder utilizar estos modelos de pronosticos aplicados a la selección adecuada de una línea base energética.

Para tal caso es necesario tener en cuenta algunos aspectos relacionados con los modelos a analizar:

- El modelo medición del valor absoluto de energía no tiene en cuenta los efectos de las variables relevantes.
- El modelo cociente de los valores medido o relación determina un valor resultado del cociente entre el consumo de energía y la variable relevante del sistema en estudio, para un periodo de tiempo, no considera el tipo de relaciones matemáticas que puedan existir entre las variables involucradas en dicho cociente. En este caso su interés es determinar cómo es de óptimo el sistema en estudio en el uso y/o en el consumo de energía en el tiempo.

### **3.1. MODELO DE PRONÓSTICO BASADO EN SERIES DE TIEMPO**

Pronosticar [8], [9] es una estimación cuantitativa o cualitativa de uno o varios factores (variables) que conforman un evento futuro, con base en información actual o del pasado. Su objetivo es reducir la incertidumbre del futuro, mediante la anticipación de eventos cuya probabilidad de ocurrencia sea relativamente alta, respecto a otros eventos posibles.

Los métodos de pronóstico [10] se clasifican como cualitativos y cuantitativos.

Los métodos cuantitativos de pronóstico se suelen usar cuando:

1) Se cuenta con información del pasado acerca de la variable que se desea pronosticar, 2) esa información se puede cuantificar, 3) es razonable pensar que el patrón seguido en el pasado continuará en el futuro. En tales casos es posible obtener un buen pronóstico mediante un método de series de tiempo o un método causal.

En los métodos cualitativos, para obtener un pronóstico, suele necesitarse el criterio de un experto, la ventaja es que pueden aplicarse cuando la información sobre la variable que se está pronosticando no puede cuantificarse o es escasa.

La Tabla 14, presenta una visión general de los métodos de pronóstico y las técnicas usadas en cada método.

Tabla 14. Métodos de pronóstico

<b>Métodos de pronóstico</b>	<b>Cuantitativo</b> Numérico - Basado en Datos y estadística	Investigación de mercados
		Analogías históricas
		Método Delphi
		Consenso general
		Análisis de escenarios
	<b>Cualitativo</b> Subjetivo - Opiniones y Experiencia de Expertos	Extrapolativas
		Análisis de series de tiempo
		Modelos Causales

Para llevar a cabo un buen pronóstico se deben cumplir una serie de etapas y así garantizar los datos iniciales y su resultado final, como se presenta en la Figura 49.



Figura 49. Etapas de un pronóstico

Una serie de tiempo es un conjunto de observaciones de una variable medida en puntos sucesivos en el tiempo o en periodos de tiempo sucesivos [10]. El objetivo de una serie de tiempo es descubrir en los datos históricos un patrón para después extrapolar ese patrón al futuro; el pronóstico se basa únicamente en los valores de la variable en el pasado o en errores de pronóstico en el pasado.

El patrón o el comportamiento que siguen los datos de una serie de tiempo se debe a diversos componentes. Por lo general los componentes son: de tendencia, cíclico, estacional e irregular que son presentados en la Tabla 15.

Tabla 15. Componentes de una serie de tiempo

Componente	Descripción	Ejemplo	Gráfica
<b>Tendencia</b>	Es el componente de largo plazo que representa el crecimiento o disminución en la serie sobre un periodo amplio.	Crecimiento de la población, cambio en la productividad.	

<p><b>Cíclico</b></p>	<p>Es la fluctuación en forma de onda alrededor de la tendencia.</p>	<p>Ciclos economicos, cambios en el gusto de la poblacion, cambios en el ciclo de vida del producto.</p>	
<p><b>Estacional</b></p>	<p>Es un patrón de cambio que se repite a sí mismo año tras año.</p>	<p>Periodos escolares, periodos vacacionales, productos de estacion, estaciones del año, clima que afecta la variable de interes.</p>	
<p><b>Aleatorio</b></p>	<p>Mide la variabilidad de las series de tiempo después de retirar los otros componentes.</p>	<p>Cambios climaticos, desastres naturales, huelgas, hechos fortuitos</p>	

Fuente: Estadística para administración y economía, 2008.

Dentro de las series de tiempo, se encuentran una serie de métodos para realizar el pronóstico, según sean los datos históricos que se tengan. La Tabla 16 presenta las características de datos para cada uno de los métodos de pronóstico.

Tabla 16. Métodos de series de tiempo y características de los datos

Método	Patrón de datos	Observaciones	Horizonte de pronóstico
Ingenuos	Estacionario	Pocos	Muy corto
Promedios móviles	Estacionario	Muchos	Muy corto
Suav Exp. Simple	Estacionario	Pocos	Muy corto
Suav Exp. Holt	Tendencia	Pocos	Corto a Medio
Suav Exp. Winters	Tendencia y Estacionalidad	Mínimo 4 o 5 por Estación	Corto a Medio
Descomposición de series	Tendencia, Estacionalidad y ciclos	Muchos	Corto, Medio y Largo

**3.1.1. Modelo Ingenuo**

El método ingenuo [11] es el método más sencillo de pronóstico. Supone que el pronóstico para un periodo futuro es el valor observado en el periodo Winter anterior. La ecuación para obtener el pronóstico es:

$$F_{t+i} = X_t$$

donde:

$t$  = periodo actual

$i$  = número de periodos adelantados pronosticados

$F_{t+i}$  = pronóstico del periodo  $t + i$

$X_t$  = último valor real en el periodo  $t$

**3.1.2. Promedios Móviles**

En el método de los promedios móviles [10], para pronosticar el periodo siguiente, se emplea el promedio de los valores de los  $n$  datos más recientes de la serie de tiempo. El cálculo de un promedio móvil se hace de la forma:

$$\text{Promedio móvil} = \frac{\sum(\text{de los } n \text{ datos más recientes})}{n}$$

El término móvil se usa porque cada vez que en la serie de tiempo hay una nueva observación, ésta sustituye a la observación más antigua que se emplee en la ecuación y se calcula un nuevo promedio. De esta manera, el promedio se modifica, o se mueve, cada vez que se tiene una nueva observación.

**3.1.3. Suavización Exponencial Simple**

La suavización exponencial simple [10], utiliza un promedio ponderado de los valores pasados de la serie de tiempo; es un caso especial del método de promedios ponderados móviles; en este caso sólo hay que elegir un peso, el peso para la observación más reciente. Los pesos para los demás datos se calculan automáticamente y son más pequeños a medida que los datos son más antiguos. El modelo viene dado de la forma:

$$F_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha)F_t$$

donde:

$F_{t+1}$  = pronóstico para el periodo  $t + 1$  de la serie de tiempo

$Y_t$  = valor real en el periodo  $t$  de la serie de tiempo

$F_t$  = pronóstico para el periodo  $t$  de la serie de tiempo

$\alpha$  = constante de suavización ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

A pesar de que con el suavizamiento exponencial se obtiene un pronóstico que es el promedio ponderado de todas las observaciones pasadas, no es necesario conservar todos los datos pasados para calcular el pronóstico para el periodo siguiente. En efecto, una vez elegida la constante de suavizamiento  $\alpha$ , sólo se necesitan dos informaciones para calcular el pronóstico. En la ecuación se observa que dada una  $\alpha$ , para calcular el pronóstico en el periodo  $t+1$  sólo se necesita conocer el valor real y el valor pronosticado de la serie de tiempo para el periodo  $t$ , es decir,  $Y_t$  y  $F_t$ .

### 3.1.4. Suavización Exponencial Holt

La suavización exponencial de Holt [9] es apropiada cuando los datos presentan tendencia, pues es una ampliación del modelo de suavización exponencial simple, adiciona un factor de crecimiento (tendencia). Este modelo cuenta con tres ecuaciones, la primera se encarga de la suavización simplemente la segunda de la tendencia y la tercera agrega las primeras dos. La suavización exponencial de Holt está dada por:

$$F_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(F_t + T_t)$$

$$T_{t+1} = \gamma(F_{t+1} - F_t) + (1 - \gamma)T_t$$

$$\hat{Y}_{t+m} = F_{t+1} + m * T_{t+1}$$

donde:

$Y_t$  = valor observado en el periodo  $t$

$\alpha$  = constante de suavización ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$F_i$  = estimación de la suavización para el periodo  $i$

$\gamma$  = constante de suavización para la Tendencia ( $0 \leq \gamma \leq 1$ )

$T_i$  = estimación de la Tendencia para el periodo  $i$

$m$  = número de periodos a pronosticar

$Y_{t+m}$  = valor pronosticado para el periodo  $t + m$

### 3.1.5. Suavización Exponencial Winters

La suavización exponencial de Winters [9] es apropiada cuando la serie de datos presentan tendencia y Estacionalidad, es una ampliación del modelo de suavización de Holt que adiciona una ecuación para estimar Estacionalidad. Cuando hay estacionalidad el modelo de suavización simple y de Holt se quedan cortos.

El modelo está compuesto por cuatro ecuaciones: la primera se encarga de la suavización simple, la segunda estima la estacionalidad, la tercera estima la tendencia y la cuarta agrega las estimaciones de las tres primeras ecuaciones. Las ecuaciones que representan el modelo son:

$$F_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-p}} + (1 - \alpha)(F_{t-1} + T_{t-1})$$

$$S_t = \beta \frac{Y_t}{F_t} + (1 - \beta)S_{t-p}$$

$$T_t = \gamma(F_t - F_{t-1}) + (1 - \gamma)T_{t-1}$$

$$\hat{Y}_{t+m} = (F_t + m * T_t)S_{t+m-p}$$

donde:

$Y_t$  = valor observado en el periodo t

$\alpha$  = constante de suavización ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$F_i$  = estimación de la suavización para el periodo i

$\gamma$  = constante de suavización para la Tendencia ( $0 \leq \gamma \leq 1$ )

$T_i$  = estimación de la Tendencia para el periodo i

m = número de periodos a pronósticar

$\beta$  = constante de suavización para la estacionalidad ( $0 \leq \beta \leq 1$ )

$S_i$  = estimación de la estacionalidad para el periodo i

p = número de periodos en el ciclo estacional

$Y_{t+m}$  = valor pronosticado para el periodo t + m

### 3.1.6. Descomposición de Series

Existen tres modelos de series de tiempos conocidos como descomposición de series [12], que generalmente se aceptan como buenas aproximaciones a las verdaderas relaciones, entre los componentes de los datos observados. Estos son:

$$\text{Aditivo} \Rightarrow X(t) = T(t) + E(t) + A(t)$$

$$\text{Multiplicativo} \Rightarrow X(t) = T(t) * E(t) * A(t)$$

$$\text{Mixto} \Rightarrow X(t) = T(t) * E(t) + A(t)$$

donde:

$X(t)$ : serie observada en instante t

$T(t)$ : componente de tendencia

$E(t)$ : componente estacional

$A(t)$ : componente aleatoria

Una suposición usual es que  $A(t)$  sea una componente aleatoria o ruido blanco con media cero y varianza constante.

Un modelo aditivo, es adecuado, cuando E(t) no depende de otras componentes, como T(t), sí por el contrario la estacionalidad varía con la tendencia, el modelo más adecuado es un modelo multiplicativo.

### **3.1.7. Medidas de Error**

Es importante establecer medidas de error [8],[9],[11], como herramienta para evaluar la calidad y validez del modelo de pronóstico realizado, normalmente se realizan pronósticos con varios métodos al tiempo, las medidas de error permiten evaluar la precisión de dichos métodos y seleccionar el óptimo.

El error correspondiente a cualquier pronóstico es la diferencia entre el valor observado en la serie de tiempo y el pronóstico. El error de pronóstico puede ser positivo o negativo dependiendo si el pronóstico es demasiado alto o demasiado bajo.

Los errores de pronóstico [13], normalmente calculados son:

#### **Error de pronóstico**

$$\text{Error de pronóstico} = \text{Demanda real} - \text{valor pronosticado}$$

Su cálculo permite tomar decisiones frente a qué método de pronóstico es el mejor y logran detectar cuando algo en nuestra previsión de la demanda no está marchando bien, con lo que conseguimos cambiar el rumbo de nuestras decisiones a fin tomar las mejores elecciones.

#### **Suma acumulada de errores de pronóstico (CFE) o error medio**

$$CFE = \sum \text{Error de pronóstico}$$

Es la medida más básica de todas y es la que da origen a las demás. Es la suma acumulada de los errores de pronóstico. Permite evaluar el sesgo del pronóstico. Por ejemplo, si a través de los periodos el valor real de la demanda siempre resulta superior al valor de pronóstico, la CFE será más grande, indicando la existencia de un error sistemático en el cálculo de la demanda.

#### **Desviación media absoluta (MAD)**

$$MAD = \frac{\sum |\text{real} - \text{pronóstico}|}{n}$$

Mide la dispersión del error de pronóstico o, dicho de otra forma, la medición del tamaño del error en unidades. Es el valor absoluto de la diferencia entre la demanda real y el pronóstico, dividido sobre el número de periodos.

**Error cuadrático medio (MSE)**

$$MSE = \frac{\sum(\text{error de pronóstico})^2}{n}$$

Al igual que la MAD, el MSE es una medida de dispersión del error de pronóstico, sin embargo, esta medida maximiza el error al elevar al cuadrado, castigando aquellos periodos donde la diferencia fue más alta a comparación de otros. En consecuencia, se recomienda el uso del MSE para periodos con desviaciones pequeñas o en casos que se prefiere una técnica que produzca errores moderados a otra que generalmente tenga errores pequeños, pero ocasionalmente arroje algunos muy grandes.

**Error porcentual medio absoluto (MAPE)**

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n |Real_i - Pronóstico_i|}{Real_i \cdot n}$$

El MAPE entrega la desviación en términos porcentuales y no en unidades como las anteriores medidas. Es el promedio del error absoluto o diferencia entre la demanda real y el pronóstico, expresado como un porcentaje de los valores reales. Se conoce también como Porcentaje de error medio absoluto (PEMA) o EPAM.

El PEMA indica qué tan grande son los errores comparados con los valores reales de la serie. Se utiliza para comparar la precisión de la misma u otra técnica sobre dos series completamente diferentes.

**3.2. MODELO DE REGRESIÓN**

Los modelos de regresión han sido usados en diversas ocasiones para estimar la tendencia que siguen los datos y predecir su comportamiento en un futuro. En temas de energía, es común que sean usados para estimar o predecir el consumo en un proceso, instalación o edificio. Para estimar líneas de base energética y predecir el consumo de energía en edificaciones, son usados mayormente los modelos de regresión lineal, según autores como Syarifah Permai y Heruna Tanty [14], Jonathan Roth y Ram Rajagopal [15], Nelson Fumo y Rafe Biswas [16], Beñat Arregi y Roberto Garay [17] y Aranda et al. [18], entre otros. Sin embargo, autores como Bilous et al. [19] utilizan modelos de regresión no lineal.

Numerosos estudios se han llevado a cabo para estimar líneas de base energética, aplicando modelos de regresión univariable y multivariable, a los cuales se les ha probado el cumplimiento de una serie de supuestos estadísticos para que el modelo de regresión planteado sea válido. Dentro de la literatura se encuentran:

Strachan [20], empleó la metodología para predecir niveles de consumo energético en el Reino Unido, como herramienta para el establecimiento de políticas energéticas.

Sakamoto et al. [21] utilizó el modelo de línea base para predecir la demanda energética de Japón para el año 2030, teniendo en cuenta variables climáticas y aspectos socio-económicos del país, el resultado apuntó hacia un aumento en el sector edificios y un descenso en el consumo industrial.

Alves et al. [22], Ko et al. [23] y Elbeltagi et al. [24], proponen que la construcción de una línea base de energía es un punto de partida para comprender la demanda de energía de las ciudades donde no se tienen puntos de referencia de consumo de energía de edificios, y se hace difícil la toma de decisiones sobre las intervenciones en el stock de edificios, pues no se conocen ni el rendimiento energético existente ni el alcanzable.

El artículo “Development and application of a statistical methodology to evaluate the predictive accuracy of building energy baseline models” [25] desarrolló y aplicó una metodología estadística para evaluar la precisión de los modelos de línea base de energía en 29 edificaciones, centrándose en su aplicación a M&V (medición y verificación) del ahorro energético del edificio.

Liang et al. [26] en su estudio, establece que existen numerosos modelos para predecir la línea de base de energía en un edificio, pero en la mayoría no se tiene en cuenta la ocupación como variable, la cual ha sido considerada como esencial en estudios anteriores.

El artículo “Building energy performance forecasting: A multiple linear regression approach” [27] desarrolló un modelo de regresión lineal alternativo y confiable para determinar las necesidades de energía del edificio, partiendo de un modelo dinámico detallado y calibrado, en el que implementó 195 escenarios de rendimiento energético para determinar la demanda de energía térmica del edificio en función de solo unos pocos parámetros conocidos.

Uno de los aspectos más relevantes de la Estadística [28]–[30] es el análisis de la relación o dependencia entre variables, pues resulta interesante conocer el efecto que una o varias variables pueden causar sobre otra, e incluso predecir en mayor o menor grado valores en una variable a partir de otra.

Los métodos de regresión estudian la construcción de modelos para explicar o representar la dependencia entre una variable dependiente (Y) y la(s) variable(s) explicativa(s) o dependiente(s), X. Normalmente son de tipo univariable o multivariable.

El modelo univariable está dado de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$$

El modelo multivariable es descrito por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

Existen diversos modelos de regresión, según las características de los datos que se tengan (número de variables medidas, temporalidad, etc.), la Tabla 17 presenta tres de modelos de regresión.

Tabla 17. Modelos de regresión

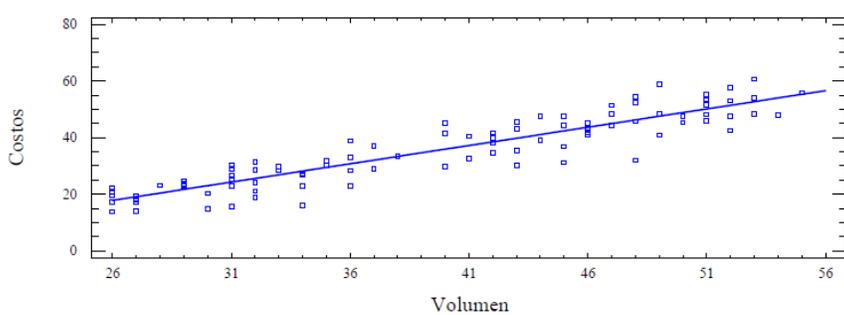
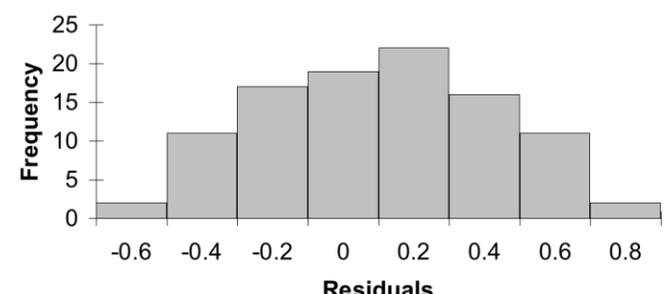
Modelo	Característica
<p><b>Regresión Lineal simple</b></p>	<p>Examina la relación lineal entre dos variables: dependiente (Y) y explicativa (X). Cuando las dos variables están relacionadas, es posible predecir un valor de respuesta (Y) a partir de un valor predictor (X).</p> <p>Los métodos de estimación que suelen utilizarse son: mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y máxima verosimilitud (MV).</p> <p>Los pronosticos obtenidos son de <b>largo plazo</b> basados en el rango de información analizada, no es confiable el pronóstico para eventos por fuera de los valores máximos y mínimos.</p> <p>El modelo es de tipo: <math>Y = \beta_0 + \beta_1 X_1</math></p>
<p><b>Regresión Lineal multiple</b></p>	<p>Examina las relaciones lineales entre una variable dependiente (Y) y dos o más explicativas. Si el número de variables explicativas es grande, se deben utilizar técnicas de selección de modelo paso a paso para excluir las variables explicativas que no estén asociadas a la variable de respuesta (Y).</p> <p>Permite obtener pronósticos de <b>largo plazo</b> basados en el rango de información analizada, no es confiable el pronóstico para eventos por fuera de los valores máximos y mínimos de las variables explicativas.</p> <p>El modelo es de tipo: <math>Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n</math></p>
<p><b>Regresión polinomial</b></p>	<p>Examina la relación lineal entre dos variables: dependiente (Y) y explicativa (X). Cuando la variable de respuesta (Y) depende del comportamiento polinomial de la variable explicativa (X).</p> <p>Los pronósticos son a <b>largo plazo</b> basados en el rango de información analizada, el pronóstico no es confiable para eventos por fuera de los valores máximos y mínimos de la variable explicativa.</p> <p>El modelo es de tipo: <math>Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X^2 + \dots + \beta_n X^n</math></p>

Usualmente, los modelos de regresión son evaluados con el *porcentaje de variación de la variable dependiente, explicada por las variables independientes  $R^2$* , el cual varía entre 0% y 100%, y entre mayor sea el valor de  $R^2$ , mejor es el ajuste del modelo a los datos.

Sin embargo, tener un modelo de regresión con un alto valor de  $R^2$ , no garantiza que el modelo tenga la mejor capacidad de pronóstico, y se hace necesario el cumplimiento de una serie de supuestos estadísticos que garanticen la validez del modelo.

La Tabla 18, presenta los supuestos estadísticos [28]–[31] que deben cumplir los modelos de regresión.

Tabla 18. Supuestos Estadísticos para el modelo de regresión

Supuesto	Definición	Validación
Linealidad	<p>La relación existente entre las variables es lineal.</p> $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$	<p>Graficar los datos para establecer el tipo de relación existente entre las variables (lineal, cuadrática, exponencial, etc.) o verificar que el modelo obtenido satisfaga el modelo lineal dado.</p>
	<p>Plot of Fitted Model</p> 	
Normalidad	<p>Los errores siguen una distribución normal.</p> $u_i \sim N(0, \sigma)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Histograma de los residuos: Permite determinar si los datos son asimétricos.</li> <li>• Gráfico de probabilidad Normal de los residuos: debe seguir aproximadamente una línea recta.</li> <li>• Prueba de Kolmogórov-Smirnov.</li> <li>• Prueba de Shapiro-Wilk.</li> </ul>
		

<b>Homocedasticidad</b>	<p>La varianza de los errores es constante.</p> $Var(U_i) = \sigma^2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gráfico de residuos vs valores ajustados: Verificar gráfico sin pautas de asociación.</li> <li>• Estadístico de Levene.</li> <li>• Prueba de Breush Pagan.</li> <li>• Prueba de Barleth</li> </ul>
	<p><b>Homocedasticidad</b></p>	
<b>Independencia</b>	<p>Los datos deben ser independientes. Una observación no debe dar información sobre las demás.</p> $E[u_i u_j] = 0$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gráfico de residuos vs orden: Permite comprobar la independencia de los residuos, estos deben tener un comportamiento aleatorio, sin exhibir patrones o tendencias.</li> <li>• Estadístico de Durbin Watson</li> </ul>
<b>Multicolinealidad (Sólo para el modelo multivariable)</b>	<p>Existe multicolinealidad cuando una o más variables, son una combinación lineal de otra, es decir, que el coeficiente de correlación entre estas dos variables de 1.</p> <p>Al enfrentar problemas de multicolinealidad severa, una de las soluciones más simples consiste en omitir del modelo una de las variables colineales.</p>	<p>Factor de inflación de la varianza (FIV), cuantifica la intensidad de la multicolinealidad:</p> <p>FIV=1: No hay multicolinealidad.</p> <p>FIV&gt;1: existe multicolinealidad entre las variables independientes.</p>

### 3.3. MODELO DE SIMULACIÓN

Para el autor Robert E. Shannon [32], [33] *“La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias - dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos- para el funcionamiento del sistema”*.

El objetivo de una simulación energética [34] es modelar un edificio y su entorno, y determinar de forma anticipada su comportamiento energético, tiene en características constructivas del edificio (geometría y los materiales que lo componen) como, las condiciones climatológicas del exterior, además de su uso (niveles de ocupación y horarios de funcionamiento, cargas interiores debidas al uso previsto, etc.).

La simulación energética de edificios [32], consiste en analizar en función del tiempo las necesidades energéticas de un edificio al proporcionar unas condiciones básicas de confort, según su diseño y su entorno condicionado por variables como la radiación solar directa o difusa, la ocupación, orientación del edificio o caracterización térmica de sus componentes arquitectónicos. La simulación energética dinámica, permite experimentar posibles modificaciones, con la intención de mejorar las condiciones de diseño y optimizarlo. Buscando un equilibrio entre consumo de energía, economía, confort y medio ambiente. En países de la UE, la simulación energética es necesaria en:

- **Proyectos constructivos:** Cualquier proyecto constructivo de un edificio debe incluir una Certificación Energética, basada en una simulación previa a su ejecución, realizada con alguno de los programas oficialmente reconocidos.
- **Rehabilitación:** La rehabilitación de un edificio en aras de mejorar su eficiencia energética es un caso característico en el que es interesante una simulación, para prever el comportamiento energético obtenido con las medidas de mejoras que se desean incorporar.
- **Obtención de sello de certificación ambiental:** Muchos de los sellos y programas de certificación ambiental de edificios, requieren datos obtenidos en una simulación previa, como energía/consumo final o emisiones de CO<sub>2</sub>.
- **Auditoría Energética:** En una auditoría energética se analiza el comportamiento energético real de un edificio, y el coste asociado. El objetivo suele ser la reducción del consumo, tanto a nivel energético como a nivel económico. Algunas propuestas de mejora se suelen basar en predicciones de comportamiento del edificio con la variación de las condiciones aportadas por dichas mejoras, que sólo son posibles si contamos con una buena simulación energética que nos permita decidir la conveniencia o no de llevar a cabo la medida.

La simulación energética en edificios se ha convertido en pieza clave para la mejora del consumo y eficiencia energética [35], pues permite, mediante herramientas de cálculo evaluar el comportamiento energético de los edificios y sus instalaciones, y, a partir de datos reales recogidos mediante medición directa, validar el estado actual del edificio, y posteriormente generar propuestas de mejora y reducción del consumo energético.

Para esto se han desarrollado una serie de programas de simulación que permiten el desarrollo de estas propuestas, entre ellos se encuentran: TERESE (Tecnologías para la Rehabilitación y sistemas para la eficiencia energética de edificios), Energy plus, Design Builder, Simergy, Ecotect, Transys, Equest, Fluent y para el caso puntual de España, Lider y Calener, todos ellos con mejoras en la interfaz gráfica y niveles de aproximación en los cálculos más precisos.

Para el desarrollo de este trabajo, se decidió utilizar la herramienta de simulación Design Builder con el motor de cálculo EnergyPlus, de elevado reconocimiento internacional, siendo este un software de simulación de alta precisión, que permite la construcción del edificio en tres dimensiones, y el desarrollo de los cálculos energéticos pertinentes que entregan información relacionada al cálculo de cargas térmicas, cálculo de demandas de calefacción y refrigeración, cálculo de consumos y emisiones de CO<sub>2</sub>, cálculo de condiciones ambientales interiores, entre otras; todo esto mediante la implementación de una amplia biblioteca de componentes y materiales de construcción, por los cuales se pueden simular los distintos tipos de estructuras existentes.

El motor de simulación Energy Plus [32] es un motor de simulación gratuito. Sin embargo, su complejidad radica en la entrada de datos (lenguaje propio que debe utilizarse un entorno tipo “bloc de notas”). Energy Plus está pensado para que se desarrollen en torno al mismo, aplicaciones gráficas y manejables que aprovechen su potencia de cálculo, como es el caso del programa Design Builder.

Design Builder lleva integrado Energy Plus de forma que, al simular, automáticamente se lanza el cálculo en Energy Plus y Design Builder recoge los resultados que éste le proporciona para mostrarlos gráfica y numéricamente.

Energy Plus es un motor completo y complejo, del que Design Builder incorpora sus principales funcionalidades y existe la posibilidad de exportar el modelo desde Design Builder a formato Energy Plus y trabajar con él externamente para incorporar aquel elemento que pueda haber quedado fuera del alcance de Design Builder.

Los datos que Design Builder entrega a través de la simulación con Energy Plus son:

- Cálculo de cargas: Design Builder implementa de forma específica el cálculo de cargas máximas de calefacción y refrigeración conforme al estándar ASHRAE.

- Cálculo de la demanda de calefacción y refrigeración: Permite calcular la demanda de forma ágil durante las primeras etapas del diseño orientado a la mejora del diseño bioclimático del edificio, sin entrar a modelar en detalle las instalaciones de climatización.
- Cálculo de los consumos de calefacción, refrigeración y ACS y de las emisiones de CO<sub>2</sub>: Introduciendo las instalaciones, que pueden modelarse en diferentes niveles de detalle y complejidad, se obtienen los consumos energéticos y el gasto en combustible (electricidad, gas, biomasa, etc.) así como las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas.
- Cálculo de las condiciones ambientales interiores: Con los recintos climatizados o no, se obtienen las condiciones interiores del edificio, temperatura y humedad, en cualquier instante del año.
- Cálculo de las condiciones de confort: A través de diversos índices de confort, como el PMV, PPD, la temperatura operativa o el porcentaje de horas a determinadas temperaturas, se puede obtener información sobre las condiciones de confort en los recintos del edificio.
- Balance Térmico: Design Builder presenta las ganancias solares, por ocupación, iluminación, etc. así como las pérdidas en ventilación, transmisión de cerramientos, etc. Dando así información importante sobre los elementos más críticos en el balance térmico del edificio.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]ISO 50006, “Energy management systems - Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) - General principles and guidance”, 2016.
- [2]R. A. Wienclaw, “Time Series”, Salem Press Encyclopedia. Great Neck Publishing, 2019.
- [3]A. C. Juárez, C. A. Zuñiga, J. L. M. Flores, y D. S. Partida, “Análisis de series de tiempo en el pronóstico de la demanda de almacenamiento de productos perecederos”, *Estud. Gerenciales*, vol. 32, núm. 141, pp. 387–396, 2016.
- [4]J. Murillo, A. Trejos, y P. Carvajal, “Estudio del pronóstico de la demanda de energía eléctrica, utilizando modelos de series de tiempo”, *Sci. Tech.*, vol. IX, núm. 23, pp. 37–42, 2003.
- [5]S. Botero Botero y J. A. Cano Cano, “ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO PARA LA PREDICCIÓN DE LOS PRECIOS DE LA ENERGÍA EN LA BOLSA DE COLOMBIA”, *Cuadernos de Economía*, vol. 27. scieloco, pp. 173–208, 2008.
- [6]A. L. Valencia, C. A. Lozano, y C. A. Moreno, “Modelo de promedios móviles para el pronóstico horario de potencia y energía eléctrica”, *El Hombre y La Máquina*, vol. 29, pp. 96–105, 2007.
- [7]C. Deb, F. Zhang, J. Yang, S. E. Lee, y K. W. Shah, “A review on time series forecasting techniques for building energy consumption”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, núm. July 2016, pp. 902–924, 2017.
- [8]M. Mendoza Ramírez, “Pronósticos y Estadística para la Administración”.
- [9]F. Villarreal, “Introducción a los Modelos de Pronósticos”, Buenos Aires, 2016.
- [10]D. R. Anderson, D. J. Sweeney, y T. A. Williams, *Estadística para administración y economía*, 10a ed. México DF, 2008.
- [11]Universidad de las Américas Puebla, “Metodología”, Puebla, 2015.
- [12]M. Arellano, “Introducción al análisis clásico de Series de Tiempo”, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://ciberconta.unizar.es/LECCION/seriest/100.HTM>. [Consultado: 10-nov-2019].
- [13]D. F. Betancourt, “Medición del error en pronósticos de demanda”, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://ingenioempresa.com/medicion-error-pronostico/>. [Consultado: 10-nov-2019].
- [14]S. D. Permai y H. Tanty, “Linear regression model using bayesian approach for energy performance of residential building”, en *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 135, pp. 671–677.
- [15]J. Roth y R. Rajagopal, “Benchmarking building energy efficiency using quantile regression”, *Energy*, vol. 152, pp. 866–876, jun. 2018.
- [16]N. Fumo y M. A. Rafe Biswas, “Regression analysis for prediction of residential energy consumption”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47. Elsevier Ltd, pp. 332–343, 2015.
- [17]B. Arregi y R. Garay, “Regression analysis of the energy consumption of tertiary buildings”, en *Energy Procedia*, 2017, vol. 122, pp. 9–14.

- [18]A. Aranda, G. Ferreira, M. D. Mainar-Toledo, S. Scarpellini, y E. Llera Sastresa, “Multiple regression models to predict the annual energy consumption in the Spanish banking sector”, *Energy Build.*, vol. 49, pp. 380–387, jun. 2012.
- [19]I. Bilous, V. Deshko, y I. Sukhodub, “Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models”, *J. Build. Eng.*, vol. 20, pp. 327–336, nov. 2018.
- [20]N. Strachan, “Business-as-Unusual: Existing policies in energy model baselines”, *Energy Econ.*, vol. 33, núm. 2, pp. 153–160, mar. 2011.
- [21]T. Sakamoto, K. Takase, R. Matsushashi, y S. Managi, “Baseline of the projection under a structural change in energy demand”, *Energy Policy*, vol. 98, pp. 274–289, nov. 2016.
- [22]T. Alves, L. Machado, R. G. de Souza, y P. de Wilde, “A methodology for estimating office building energy use baselines by means of land use legislation and reference buildings”, *Energy Build.*, vol. 143, pp. 100–113, 2017.
- [23]J. H. Ko, D. S. Kong, y J. H. Huh, “Baseline building energy modeling of cluster inverse model by using daily energy consumption in office buildings”, *Energy Build.*, vol. 140, pp. 317–323, 2017.
- [24]E. Elbeltagi, H. Wefki, S. Abdrabou, M. Dawood, y A. Ramzy, “Visualized strategy for predicting buildings energy consumption during early design stage using parametric analysis”, *J. Build. Eng.*, vol. 13, núm. July, pp. 127–136, 2017.
- [25]J. Granderson y P. N. Price, “Development and application of a statistical methodology to evaluate the predictive accuracy of building energy baseline models”, *Energy*, vol. 66, pp. 981–990, 2014.
- [26]X. Liang, T. Hong, y G. Q. Shen, “Improving the accuracy of energy baseline models for commercial buildings with occupancy data”, *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 247–260, 2016.
- [27]G. Ciulla y A. D’Amico, “Building energy performance forecasting: A multiple linear regression approach”, *Appl. Energy*, vol. 253, núm. April, p. 113500, 2019.
- [28]D. Montoro, “Regresión lineal simple”, 2016.
- [29]A. Arribas, “Estadística II Tema 4. Regresión lineal simple”, 2010.
- [30]U. Morelisa, “Modelo de regresión lineal simple”, 2013.
- [31]P. Fonseca, “Regresión Lineal”, Barcelona, 2018.
- [32]D. Quesada, “ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS MUNICIPALES COMPARANDO HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN CON MEDIDAS EXPERIMENTALES”, Universidad de Valladolid, 2016.
- [33]R. Shannon y J. D. Johannes, “Systems Simulation: The Art and Science”, *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. SMC-6, núm. 10, pp. 723–724, jul. 2008.
- [34]A. Gavilán, “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS EXISTENTES CON DIFERENTES HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA”, Universidad de Valladolid, 2017.
- [35]A. J. Colonia y F. J. Riascos, “Análisis del Desempeño Energético del edificio de aulas 4 de la Universidad Autónoma De Occidente mediante simulación computacional”, Univ. Autónoma de Occidente, 2018.

## **CAPÍTULO 4: CASO ESTUDIO ENERGÉTICO DEL CAMPUS UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE, UAO**

El siguiente capítulo expone la revisión energética adelantada al campus y al edificio de aula 4, mostrando la monitorización y medidas de los años 2016 a 2019. Se incorporan procedimientos en la auditoría energética, según recomendaciones normativas. Lo anterior da una idea de los consumos reales de las diferentes áreas y equipos instalados, tanto en el campus como en el edificio de estudio. Para el análisis se contó con el sistema de monitorización instalado power monitor de Schneider, con equipos portátiles como sensores y data logger de IAQ e intensidad lumínica, analizadores de red y una estación meteorológica. En conjunto, los procedimientos adelantados posibilitaron un análisis detallado de la situación energética de los edificios objeto de estudio.

### **4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE**

La Universidad Autónoma de Occidente (UAO) es una institución de educación superior universitaria en Colombia con funciones de docencia, investigación y proyección social e internacional. La Figura 50, muestra la vista superior del campus universitario.



Figura 50. Vista superior campus universitario

En la actualidad, la Autónoma de Occidente tiene dos sedes en la ciudad de Cali; la principal ubicada en la vía Cali- Jamundí y otra pequeña en San Fernando. La Universidad para garantizar la calidad y el compromiso con la sociedad, ha implementado y recibido las respectivas certificaciones de los sistemas de gestión: calidad-ISO 9001 y ambiental ISO 14001, los cuales han recibido las respectivas certificaciones ISO 9001 e ISO 14001. Recientemente en el año 2015 se aprobó con el fin de abordar y contribuir a la sostenibilidad, el proyecto “modelo de Campus Sostenible” que articula las acciones y programas generados desde la academia, la investigación, la operación interna y la proyección social de la Universidad Autónoma de Occidente, en función del compromiso y responsabilidad ambiental y social. En el marco del proyecto se ha venido trabajando en temas relacionados con: tratamiento de agua potable y residual, composición del campus en cuanto al paisaje y la flora que lo adorna, mejor disposición de residuos, eficiencia energética, y la conservación del agua. La Figura 51., muestra la vista frontal y entrada peatonal principal del campus universitario.



Figura 51. Vista frontal y entrada peatonal principal del campus universitario

Como resultado del trabajo realizado en el ámbito de la eficiencia energética y el proyecto de campus sostenible; la Universidad Autónoma de Occidente ha obtenido el Premio Andesco-MinMinas-Finder a la Eficiencia Energética 2015; adicionalmente se ubicó tercera en la clasificación de instituciones latinoamericanas y la primera en Colombia de la UI GreenMetric World University Sustainability Ranking que publicó la Universidad de Indonesia en el 2017; y en ese mismo año el programa Campus Sostenible fue reconocido una vez más a nivel internacional, ya que fue elegido ganador, por unanimidad del jurado, del III Premio de buenas prácticas en gestión para universidades colombianas, otorgado por la Fundación Internacional OCU, con sede en Madrid, España; lo anterior permite evidenciar la puesta en marcha de las acciones académicas, de investigación y de proyección; que promueven el compromiso y la responsabilidad ambiental, social y energética de la universidad.

El campus de la UAO consta de cuatro bloques fundamentales de edificios que son:

•**Área 1: Edificio Central**

En este se desarrollan los principales procesos administrativos de la Universidad; se encuentra dividido en dos secciones denominados ala norte y ala sur, que constan de cuatro pisos cada uno. En ala sur se encuentran ubicados dos auditorios, la biblioteca y las facultades de ciencias básicas y humanidades. En ala norte se ubica la vicerrectoría administrativa y financiera, varias dependencias asociadas a la misma, la vicerrectoría académica con las facultades de ingeniería, comunicación social y ciencias económicas y administrativas, y rectoría.

Adicionalmente, se ubican en esta área los dos sótanos donde se encuentran los laboratorios y el estudio de televisión.

•**Área 2: Aulas**

Se compone de cuatro edificios numerados de 1 a 4, con cuatro pisos cada uno y con similares características estructurales, sin embargo, con diferencias apreciables en cuanto a la potencia eléctrica instalada: En el edificio de aulas 1 se encuentra, además de los salones de clase y auditorios (denominados por la institución como torreones), el instituto de idiomas, el almacén de compras, el taller de mantenimiento y el laboratorio de prototipado. En el cuarto piso de aulas 2 y aulas 4 se han dispuesto los salones de postgrado, operacionalmente diferentes a los demás salones de clase, pues cada salón tiene su unidad de tratamiento de aire acondicionado (UTA). En las diferentes aulas se encuentran también algunas oficinas asociadas a departamentos o procesos administrativos, por ejemplo, en aulas 3 se encuentra el departamento de mantenimiento, en aulas 2 el de seguridad y control y en aulas 4 la dirección de educación virtual, entre otros.

•**Área 3: Bienestar Universitario y Cafetería**

Se asocian a esta área dos edificios de tres pisos donde principalmente se encuentran ubicadas las oficinas de bienestar universitario y se prestan los servicios de cafetería a través de cinco locales con consumos independientes entre sí.

•**Área 4: Plantas de Tratamiento de Agua**

Esta área comprende los equipos principalmente; bombas y motores utilizados para el tratamiento de agua potable (PTAP) y de agua residual (PTAR).

La Figura 52., muestra el diagrama energético productivo del campus universitario de la UAO.

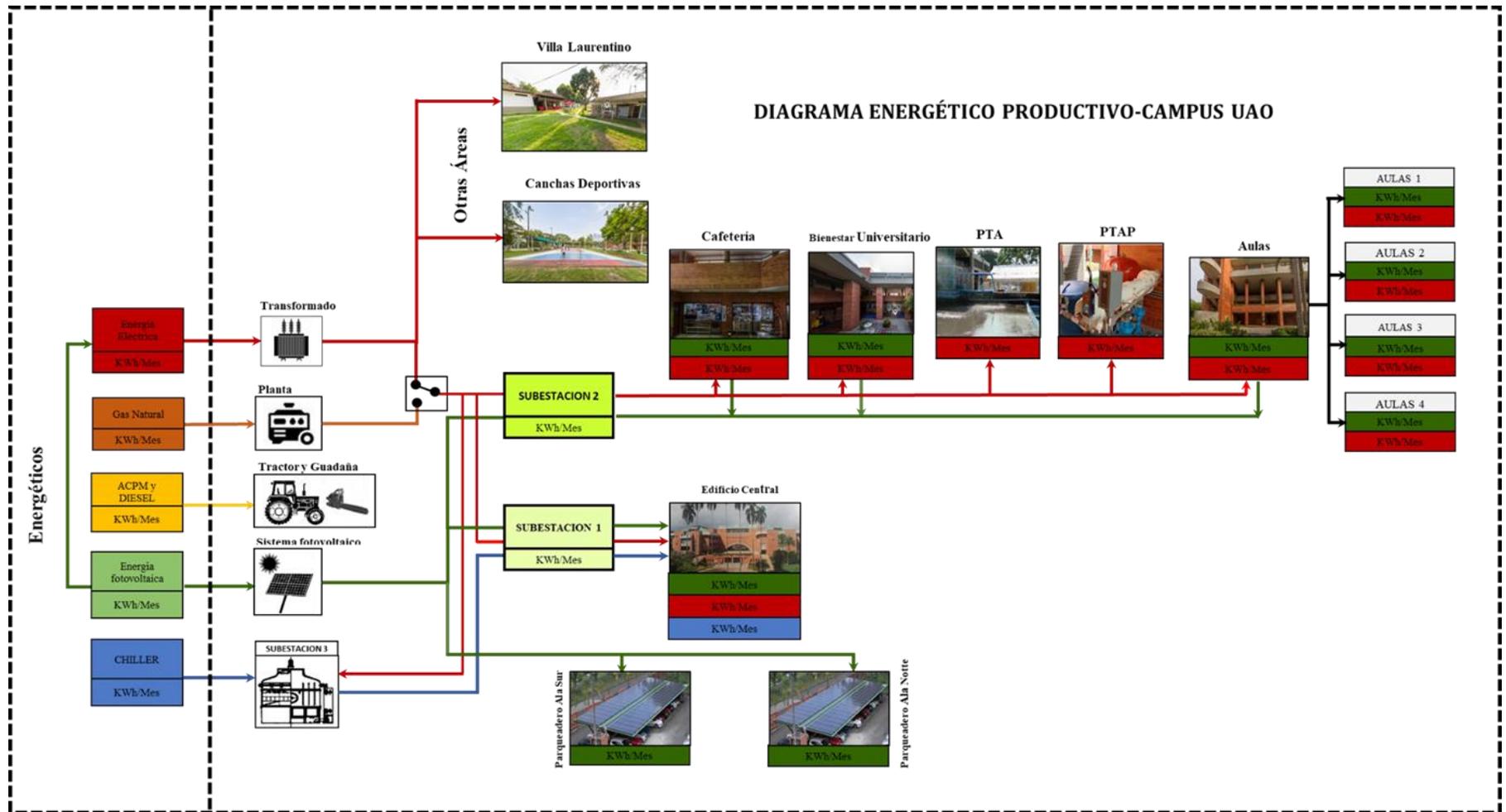


Figura 52. Diagrama energético campus UAO

La Tabla 19, muestra la distribución por áreas del campus universitario UAO y los principales equipos de uso final que equipan las áreas.

Tabla 19. Equipos de uso final y distribución por áreas del campus de la UAO

Área	Energético	Sistemas			Funcionamiento
		Iluminación	Climatización	Otros equipos	
Edificio central	-Electricidad red -Generación fotovoltaica	Panel LED Sylvania 45w Tubos LED 18w	2 enfriadoras de agua de 879.21 kW Marca York	Computadores Dell Impresoras Epson Fotocopiadoras Ricoh	lunes a viernes 8:00 am a 9:30 pm sábado 8:00 am a 5:00 pm
Aulas	-Electricidad red -Generación fotovoltaica	Panel LED Sylvania 45w Tubos LED 18w	Minisplit de 10.55 y 17.58 kW	Computadores Dell Video Beam Epson Parlantes Behringer	lunes a viernes 6:30 am a 9:30 pm sábado 7:30 am a 5:00 pm
Edificio de bienestar universitario	-Electricidad red -Generación fotovoltaica	Panel LED Sylvania 45w Tubos LED 18w	-	Computadores Dell Impresoras Epson Fotocopiadoras Ricoh	lunes a viernes 8:00 am a 9:30 pm sábado 8:00 am a 12:00 pm
Cafetería	-Electricidad red -Generación fotovoltaica -Gas Natural	Panel LED Sylvania 45w Tubos LED 18w	-	Refrigeradores Hornos Microondas Licuadoras Vitrinas	lunes a viernes 6:00 am a 9:30 pm sábado 8:00 am a 5:00 pm
Planta de tratamiento de agua	Electricidad Generación fotovoltaica	Tubos LED 18w	-	Motores Bombas	lunes a viernes 8:00 am a 9:30 pm sábado 8:00 am a 5:00 pm

La red eléctrica de suministro al Campus UAO se divide en 3 subestaciones:

La 1, suministra la energía del edificio central y tiene una capacidad de 500 KVA.

La 2, alimenta eléctricamente a los dos chiller del edificio central para aire acondicionado centralizado y tiene una capacidad de 800 KVA.

La 3, proporciona la energía necesaria a los servicios de los cuatro edificios de aulas, a los dos de bienestar Universitario y cafetería y a la planta de tratamiento de aguas y es de 1000 KVA

El campus de la UAO está monitorizado mediante 11 medidores eléctricos tipo SCHNEIDER, con telemedida que permiten medir la potencia y energía eléctrica consumida en las diferentes áreas.

También existe 8 medidores asociados a los sistemas solares Fotovoltaicos.

## 4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN INSTALADOS

**Energía Eléctrica:** La UAO actualmente tiene instalado el medidor principal de consumo dispuesto por la empresa prestadora del servicio de energía del pacifico-EPSA, con un nivel de tensión de 13200 V, a través de una acometida con su respectivo dispositivo de medición; este se divide en 3 subestaciones, cada una con su transformador, adicional a ello la organización en el año 2015 adquirió 11 medidores de consumo de energía eléctrica marca SCHNEIDER con sistemas de tele medida que recopilan información referente a: potencia activa y reactiva; y energía con periodicidad de 15 minutos, diaria, mensual y anual; los datos se reportan y almacenan en el programa Power monitor-GCE. La Figura 53 y la Figura 54, enseñan los sistemas de medición instalados en el campus.

### UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE

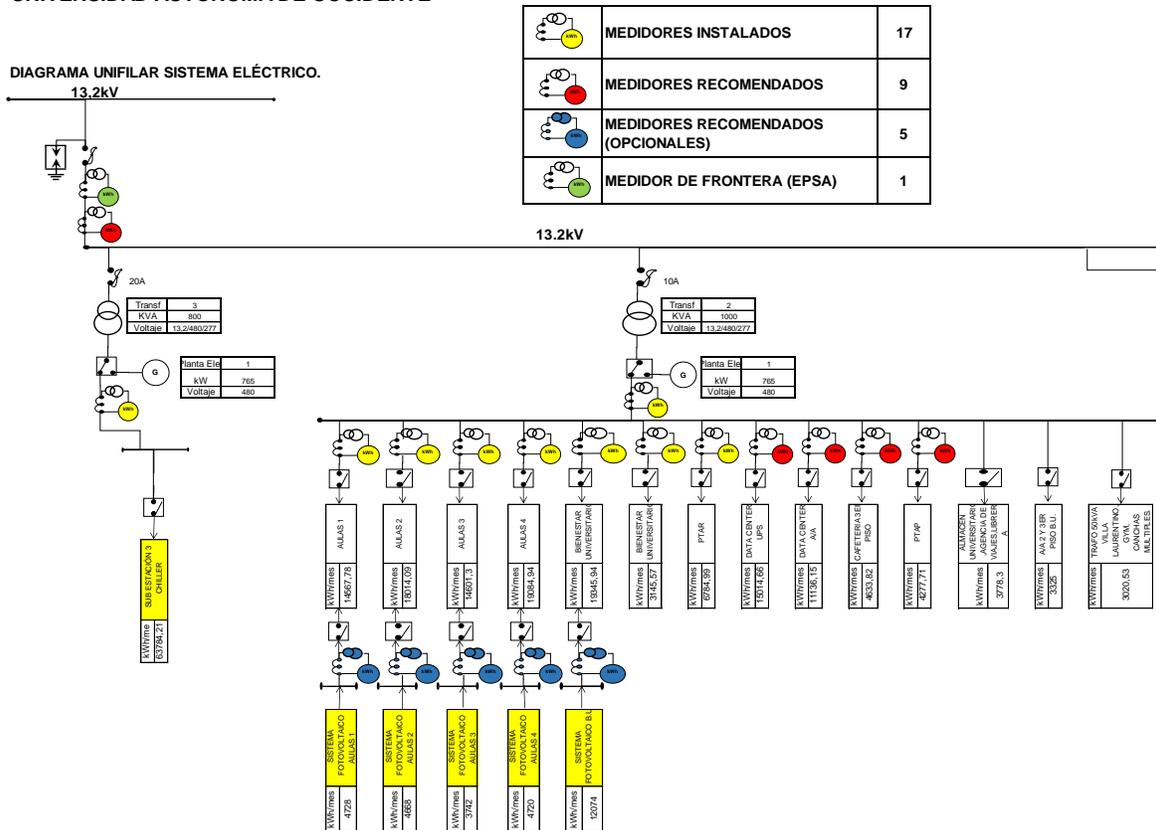


Figura 53. Sistema de medición de energía eléctrica instalado en la UAO

Las zonas donde se ubican los medidores son:

#### Subestación Uno:

- Circuito principal
- Ala Norte Piso Uno, Dos y Tres.
- Ala Sur Piso, Uno y Dos.

**Subestación Dos:**

- Circuito Principal
- Aulas Uno, Dos, Tres y Cuatro
- Bienestar Piso Uno y Dos.
- PTAP
- PTAR

**Subestación Tres:**

- Circuito principal

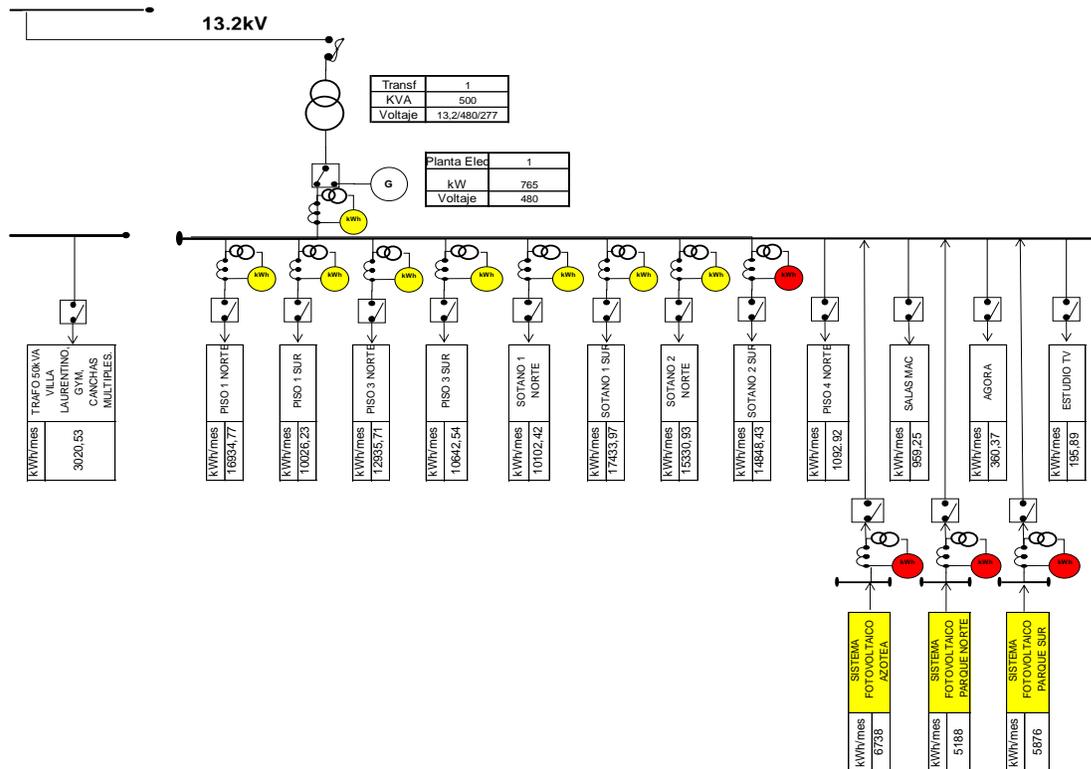


Figura 54. Sistema de medición de energía eléctrica instalado en la UAO

**Gas natural:** Se cuenta con un medidor de consumo energético de GN el cual es administrado por el proveedor del servicio Gases de Occidente, los registros de consumo en la organización se reportan mensualmente de la factura.

**Energía Solar Fotovoltaica:** El sistema solar fotovoltaico (SSFV) está conectado a la red de energía eléctrica y es utilizado por el proveedor del servicio de energía del pacifico-EPISA, quien reporta la generación mensualmente en la factura y a través de la página: <https://solar.epsa.com.co/index.aspx>

La Figura 55 y la Tabla 20., presentan los sistemas de energía solar fotovoltaica (SSFV) instalados en el campus universitario y describe el número, tipo de paneles y potencia instalada por sistema.



Figura 55. Vista superior del campus universitario y sistemas marcación de los SSFV del campus

Tabla 20. Descripción de los SSFV instalados en el campus de la UAO

Sistema	Área	Equipo instalado	Cantidad	Potencia Instalada
1	Parqueadero Ala sur	Panel FV: PANASONIC VBHN240 Tecnología HIT de 240 Wp	225	52.85 kWp
		Inversor: SMA STP 24000TL-US de 24 kW	2	
2	Edificio Central	Panel FV: PANASONIC VBHN230 Tecnología HIT de 230 Wp	230	52.9 kWp
		Inversor SMA STP 24000TL-US de 24 kW	2	
3	Parqueadero Ala norte	Panel FV: PANASONIC VBHN240 Tecnología HIT de 240 Wp	188	45.12 kWp
		Inversor: SMA STP 20000TL-US de 20 kW	2	
4	Aulas 1	Panel FV: JINKO SOLAR JKM265P Módulo Policristalino de 265 Wp	144	38.2kWp
		Inversor: Fronius Symo 17.5-3 de 18 kW	2	
5	Aulas 2	Panel FV: JINKO SOLAR JKM265P Módulo Policristalino de 265 Wp	144	38.2kWp
		Inversor: Fronius Symo 17.5-3 de 18 kW	2	
6	Aulas 3	Panel FV: JINKO SOLAR JKM265P Módulo Policristalino de 265 Wp	144	38.2kWp
		Inversor: Fronius Symo 17.5-3 de 18 kW	2	

7	Aulas 4	Panel FV: JINKO SOLAR JKM265P Módulo Policristalino de 265 Wp	144	38.2kWp
		Inversor: Fronius Symo 17.5-3 de 18 kW	2	
8	Cafetería y Bienestar Universitario	Panel FV: JINKO SOLAR JKM265P Módulo Policristalino de 265 Wp	368	97.56 kWp
		Inversor: Fronius Symo 24.0-3 de 24 kW	4	

#### 4.2.1. Equipos de medición

La UAO posee una serie de equipos de medida que permiten monitorizar sus consumos y la calidad de sus parámetros.

#### Medición de Energía Eléctrica

En el campus universitario de la UAO, se encuentran instalados 19 medidores de energía eléctrica certificados y calibrados marca Schneider presentados en la Tabla 21, la cual muestra las características técnicas de los equipos de medición instalados.

Tabla 21. Medidores de Energía Eléctrica instalados en el campus

Medidor	Características Técnicas	Cantidad	Lugar de Instalación
	<b>PowerLogic ION7400:</b> Medidor compacto de energía y potencia para alimentadores o cargas críticas.  <b>Precisión:</b> Clase 0.2S IEC 62053-22, ANSI C12.20 Clase 0.2 (energía activa)	1	MEDIDOR UAO FRONTERA (Medidor de Respaldo)
	<b>DM 5240:</b> Medidor de Energía Eléctrica – Ofrece medición directa del consumo de energía  <b>Precisión:</b> Clase 1.0; según IEC 62052-11 e IEC 62053-21 Clase 0.5; ± (0.25% de la lectura + 0.25% de la escala total)	17	Edificios de aulas, bienestar universitario, subestaciones (1,2,3), PTAR y tableros de distribución en el edificio central.
	<b>PowerLogic PM850:</b> Medidor central de Energía  <b>Precisión:</b> Clase 0.5S según IEC 62053-22, Clase 2 según IEC 62053-23, Clase 0.2 según ANSI C12.20 (energía activa)	1	Subestación 2

Fuente: Características técnicas tomadas de la página <  
<https://www.se.com/co/es/?preferredCountry=yes>>

La plataforma “Power Monitor Expert” de Schneider, integra la información de los medidores de energía eléctrica y permite la monitorización y análisis especializado para soluciones de gestión energética, gestionar la calidad eléctrica, disponibilidad y fiabilidad, optimizar el uso de la infraestructura y activos eléctricos, reducir costes energéticos y operacionales, entre otros. Las figuras 56 – 67., muestra la información suministrada por la plataforma y el sistema de medición de energía eléctrica instalado en la UAO.

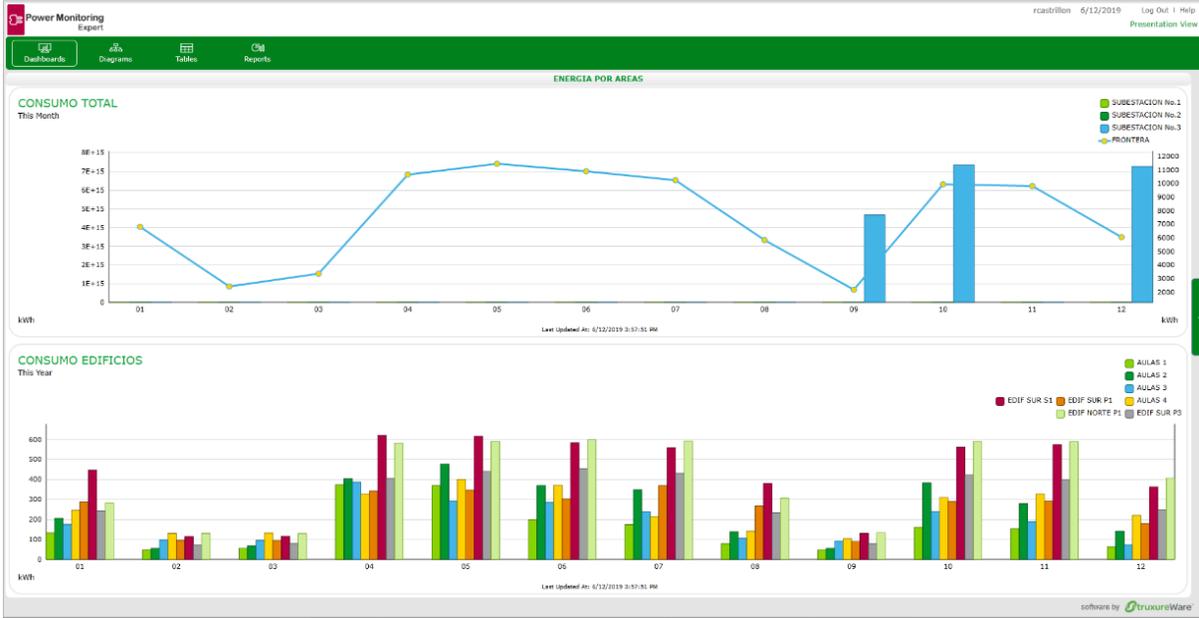


Figura 56. Consumo de energía total y por áreas de la UAO.

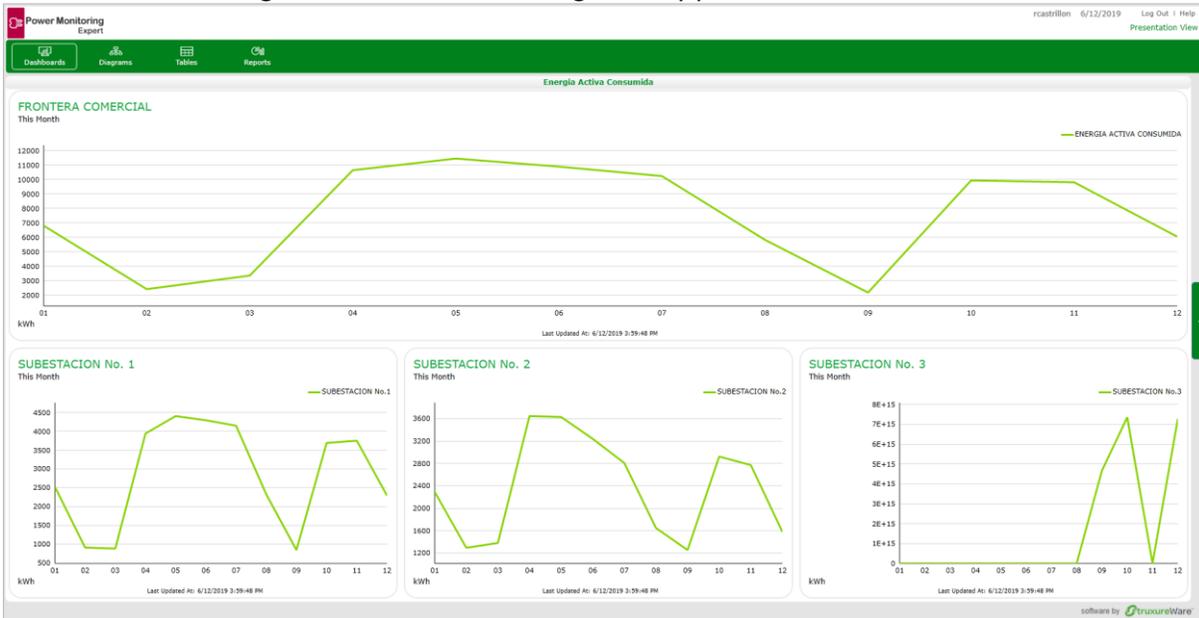


Figura 57. Energía activa consumida y subestaciones del campus.



Figura 58. Parámetros eléctricos monitorizados de Aulas 4

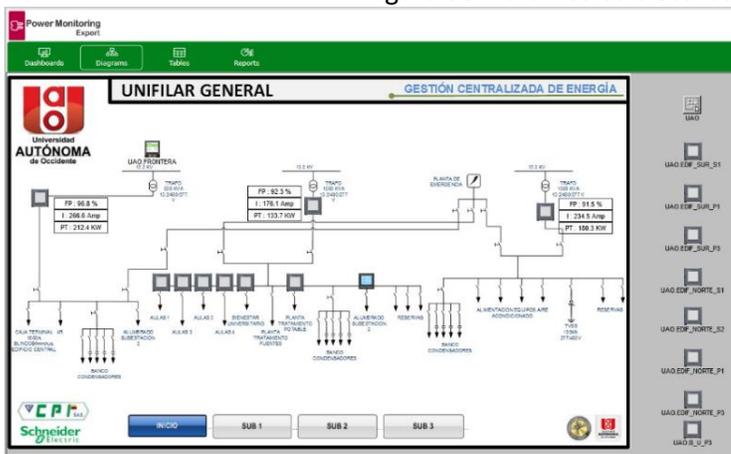


Figura 59. Diagrama unifilar general de medición UAO

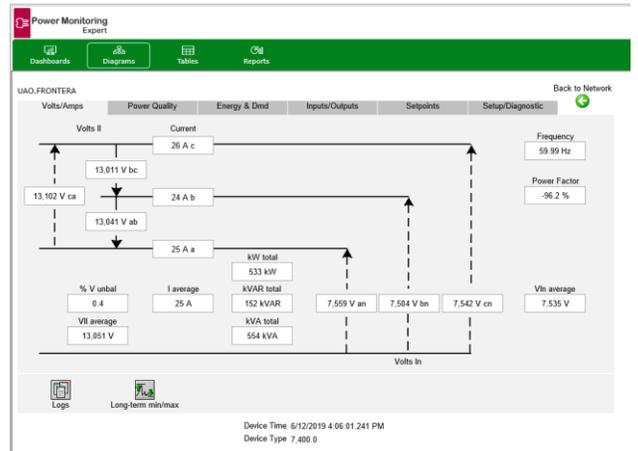


Figura 60. Parámetros medidor de Frontera

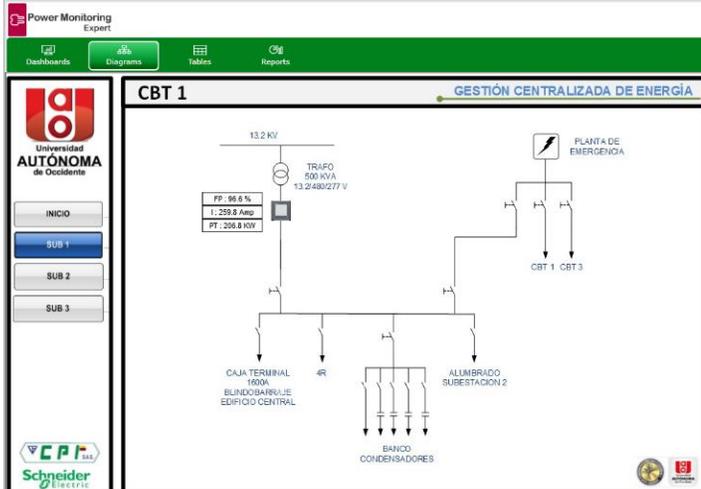


Figura 61. Diagrama unifilar subestación 1

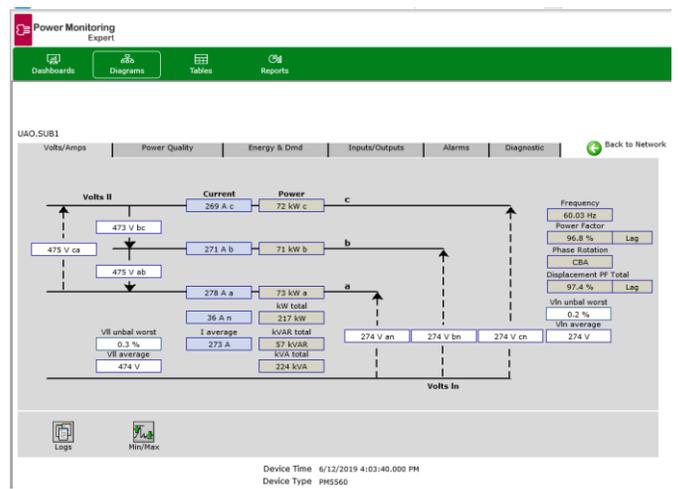


Figura 62. Parámetros medidor subestación 1

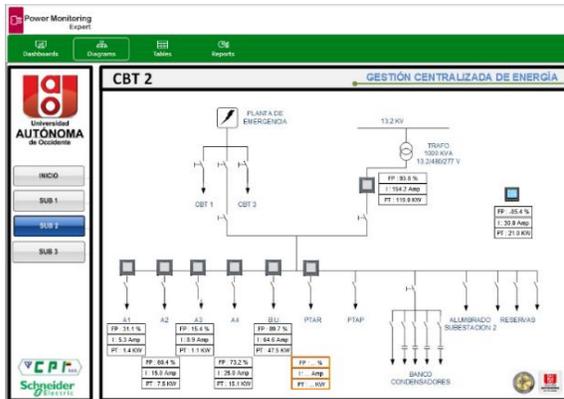


Figura 63 Diagrama unifilar subestación 2

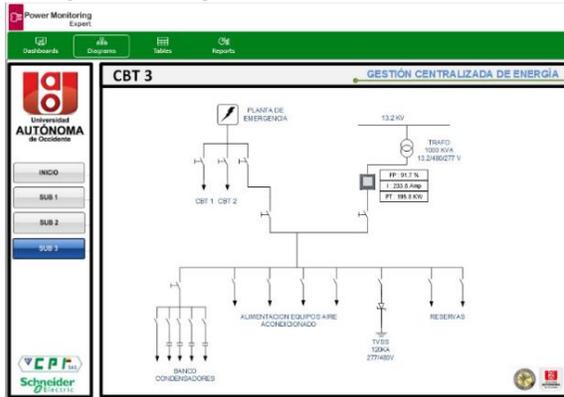


Figura 65 Diagrama unifilar subestación 3

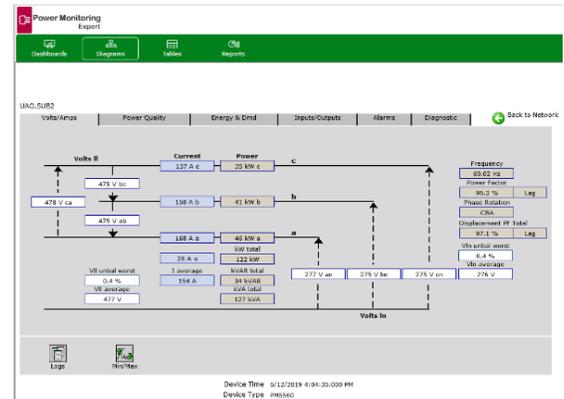


Figura 64. Parámetros medidor subestación 2

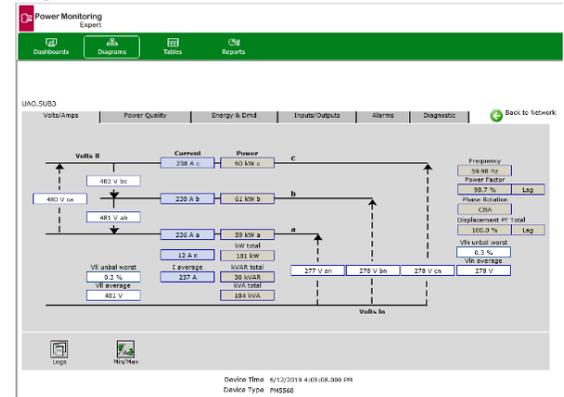


Figura 66. Parámetros medidor subestación 3

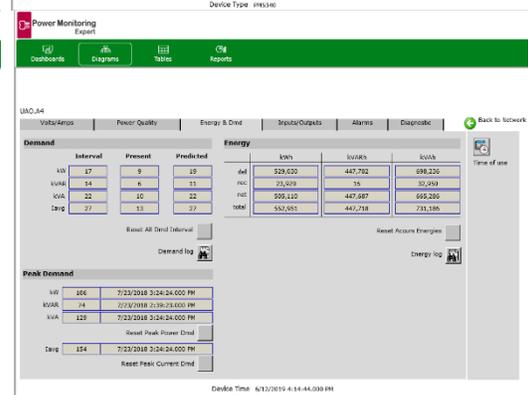
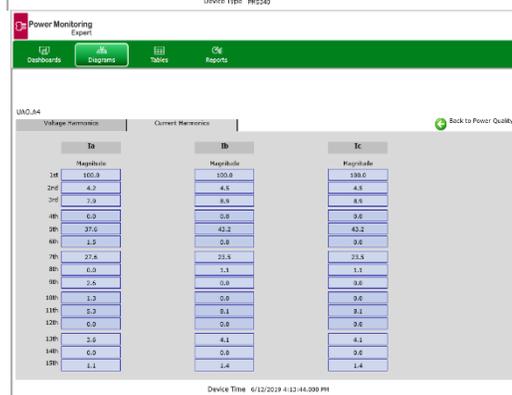
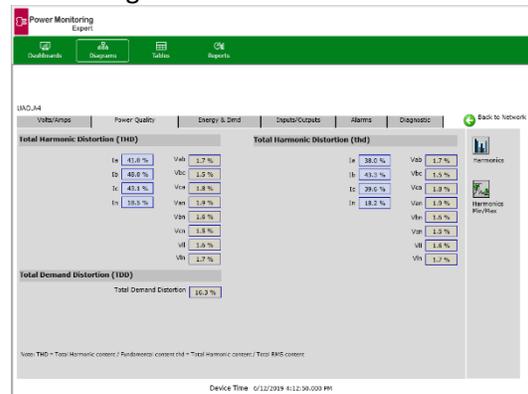
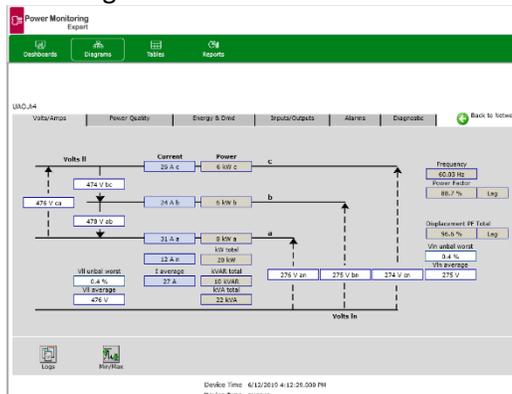


Figura 67. Parámetros medidor Edificio de Aulas 4

**Estación Meteorológica**

En el campus universitario se encuentra instalada una estación meteorológica portátil Davis Vantage Pro2 (Figura 68) que posee sensores integrados de lluvia, viento, temperatura y humedad con sensor UV y radiación solar. Entrega datos meteorológicos precisos actualizados cada 2,5 segundos. La Tabla 22. Muestra información detallada de la estación meteorológica.

Tabla 22. Características técnica estación meteorológica

VARIABLE	RESOLUCIÓN	RANGO	PRECISIÓN NORMAL (+/-)
Presión barométrica	0.01» Hg; 0.1 mm; 0.1 hPa; 0.1 mb	16» to 32.5» Hg 410 to 820 mm 540 to 1100 hPa 540 to 1100 mb	0.03» Hg 0.8 mm Hg 1.0 hPa 1.0 mb
Humedad	1%	1 to 100%	3% RH; 4% por encima 90%
Punto de Rocío	1°C	-105° to +130°F; -76°C to +54°C	3°F; 1.5°C
Radiación Solar	1 W/m2	0 to 1800 W/m2	5% en escala completa
Temperatura interior	0.1 °F; 0.1 °C	+32 ° to +140 °F; 0 to +60 °C	1 °F; 0.5 °C
Temperatura exterior	0.1 °F; 0.1 °C	-40 ° to +150 °F; -40 ° to +65 °C	1 °F; 0.5 °C
Índice de calor	1°F; 1°C	-40° to +165°F; -40° to +74° C	3°F (1.5°C)
Dirección del viento	1°	0 to 360°	3°
Rosa de los vientos	22.5°	16 puntos de brújula	0.3 puntos de brújula
Velocidad del Viento	1 mph; 0.4 m/ s; 1 km/h	0 to 200 mph; 0 to 322 km/h, 0 to 809 m/s	mayormente de 1 m/s; 3 km/h or 5%
Sensación Térmica	1°F; 1°C	110° to +135°F -79° to +57°C	2°F; 1°C

Fuente: <https://estaciondemeteorologia.com/davis-vantage-pro2-estacion-meteorologica-profesional-analisis-y-opiniones/>



Figura 68. Estación meteorológica Davis Vantage pro 2

### ***Enfriadora de agua condensada por agua***

La enfriadora de agua del edificio central compuesta por 2 unidades marca YORK YVWA de 879.21 kW cada una con 2 compresores a tornillo y refrigerante R134A, cuenta con un sistema de control NCE de Johnson Controls que se encarga del encendido, apagado y el monitoreo del equipo, además de integrar la información a su plataforma BAS (Sistemas de Automatización de Edificios) llama **Metasys**.

La enfriadora de agua mediante la plataforma Metasys y su sistema de control posee set-points o puntos de partida (seguimiento) en los horarios de funcionamiento (encendido y apagado), control y seguimiento de temperaturas, seguimiento del estado y funcionamiento de los compresores y condensadores, entre otros. Las figuras 69 – 72, presentan pantallazos del aplicativo Metasys que monitorea La enfriadora de agua del edificio central.

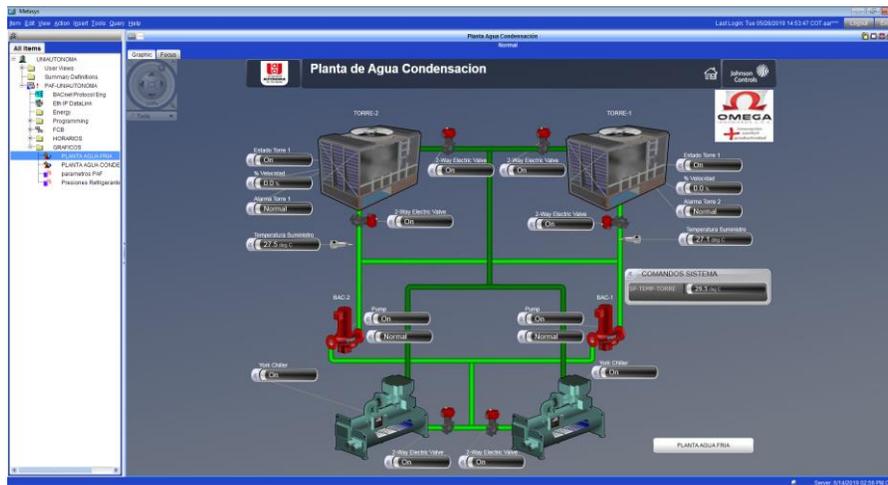


Figura 69. Diagrama de condensación Planta de agua fría Edificio Central. Metasys

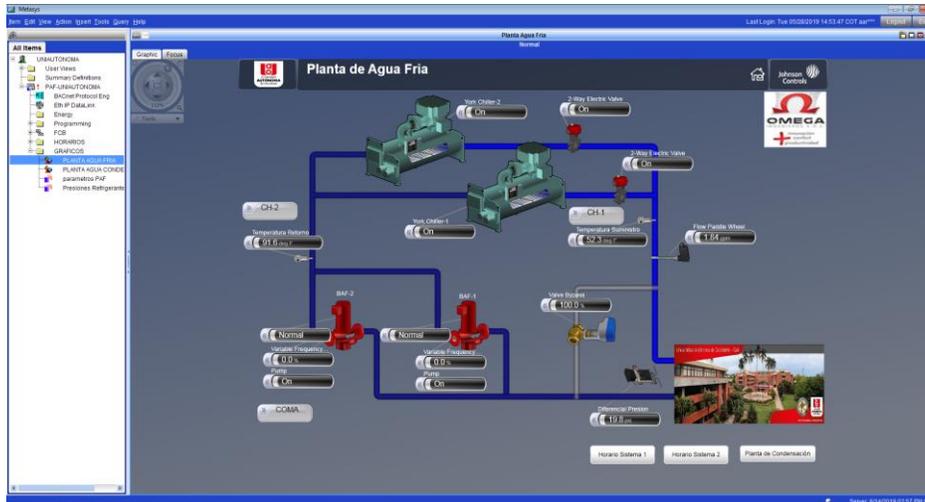


Figura 70. Diagrama planta de agua fría – Enfriadora de agua Edificio central. Metasys

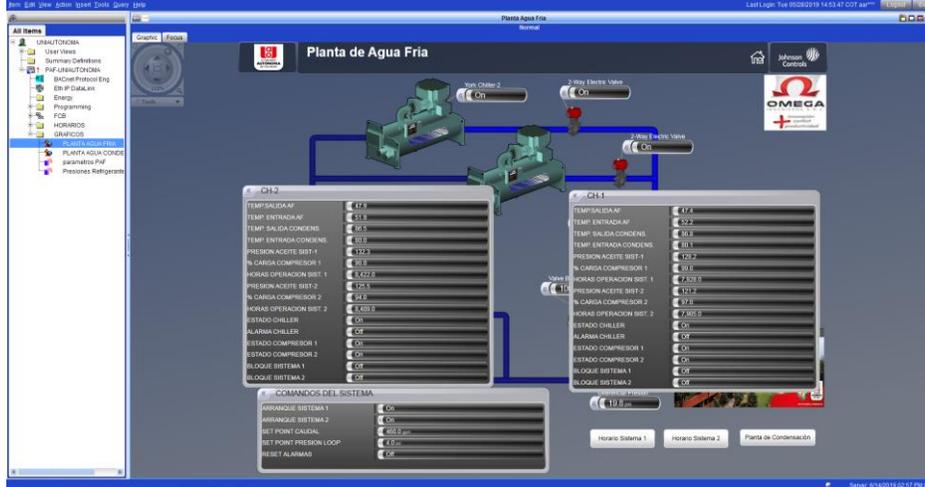


Figura 71. Diagrama planta de agua fría con información desplegada– Enfriadora de agua Edificio central. Metasys

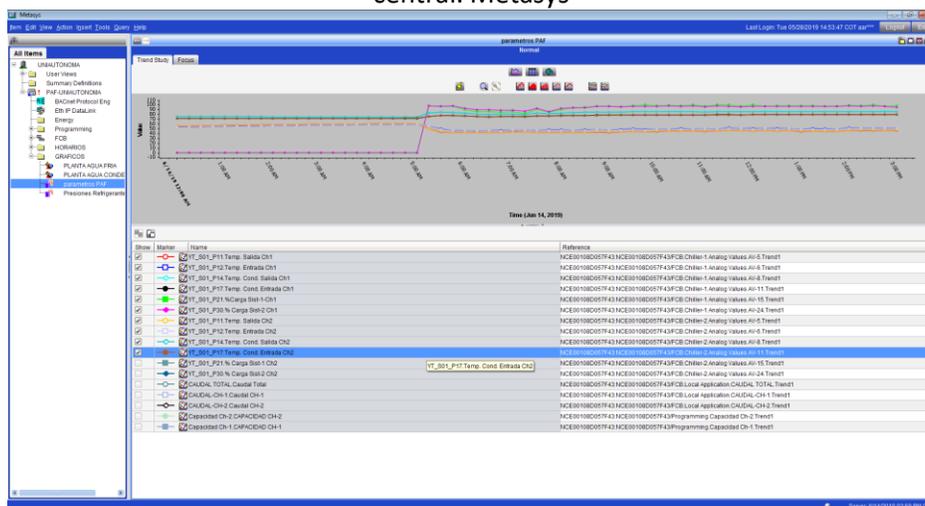


Figura 72. Curvas de comportamiento y parámetros monitorizados en planta de agua fría

**Equipos de medición utilizados en la Auditoria**

A continuación, se presentan los equipos de medición usados en la auditoria energética realizada en el campus universitario de la UAO (Tabla 23).

Tabla 23. Equipos de medida usados en la auditoria energética del campus

	<p align="center"><b>ANALIZADOR DE RED MONOFÁSICO HT SIRIUS 89N</b></p> <p>El equipo permite tomar medidas de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluctuaciones de voltaje por encima de los valores límite establecidos (interrupciones y picos) con una resolución mínima de 10 ms</li> <li>• Curva de tensión TRMS hasta 600V</li> <li>• Perfil actual TRMS hasta 3000 A</li> <li>• Armónicos de tensión y corriente hasta el orden 49.</li> <li>• Potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente.</li> <li>• Consumo de energía</li> <li>• Factor de potencia cos</li> </ul> <p align="right">Precisión: lectura <math>\pm</math> 2%</p>
	<p align="center"><b>ANALIZADOR DE RED TRIFÁSICO – HT PQA 824</b></p> <p>El equipo registra:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Medida simultánea de parámetros de red en sistema mono/trifásico 3-4 hilos.</li> <li>• Potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente.</li> <li>• Consumo de energía</li> <li>• Factor de potencia cos</li> <li>• Diagrama vectorial tensiones y corrientes</li> <li>• Análisis armónico tensiones y corrientes hasta el 49º con cálculo del THD%</li> <li>• Registro anomalías de tensión (huecos, picos) con resolución 10 ms</li> <li>• Registro corrientes de arranque de motores con resolución a 10 ms</li> <li>• Análisis desequilibrios de las tensiones de entrada</li> </ul> <p align="right">Precisión: lectura <math>\pm</math> 0.5 – 1.0%</p>
	<p align="center"><b>ANALIZADOR DE RED TRIFÁSICO – CIRCUTOR AR6</b></p> <p>Analizador de redes portátil para realizar medidas y registros de todos los parámetros eléctricos en redes trifásicas, bifásicas y monofásicas. Incorpora la medida de corrientes de fuga, parámetros de calidad de suministro y registro de transitorios.</p> <p align="right">Precisión: lectura <math>\pm</math> 0.5%</p>

	<p style="text-align: center;"><b>PINZA AMPERIMÉTRICA HT9022</b></p> <p>La pinza amperimétrica de potencia HT9022 mide corriente CC, CA+CC TRMS hasta 1000A para el alcance de la CAT IV 600V según la norma IEC/EN61010-1. Realiza medidas y registros de Potencia Activa, Reactiva, Aparente, Energía, análisis armónico tensión/corriente hasta el 25º con cálculo del THD% en sistemas Monofásico o Trifásico equilibrados.</p> <p style="text-align: center;">Precisión: lectura <math>\pm</math> 1%</p>
	<p style="text-align: center;"><b>MEDIDOR DE INTENSIDAD DE LUZ – TESTO 540</b></p> <p>Sensor adaptado a la sensibilidad espectral del ojo humano, lo cual resulta ideal para medir la intensidad de luz en puestos de trabajo.</p> <p style="text-align: center;">Precisión: lectura <math>\pm</math> 3%</p>
	<p style="text-align: center;"><b>CONTADOR DE PERSONAS S3 – SensorTES</b></p> <p>Sensor IR infrarrojo que detecta la temperatura del cuerpo para contar únicamente personas y no objetos. Su comunicación a la red de datos local (LAN) es inalámbrica vía Wifi, mediante los servicios de banda ancha disponibles se conecta a través de Internet para mantener actualizada la información en tiempo real dentro de la plataforma WEB.</p>
	<p style="text-align: center;"><b>Data Logger para calidad del aire interior – testo 160 IAQ</b></p> <p>Supervisión, registro y cálculo de la temperatura, humedad ambiental, CO2 y presión atmosférica.</p> <p>Precisión: Lectura <math>\pm</math> 1.6%</p>

Además de los datos obtenidos por el sistema de medición en línea de Power monitor Expert, se llevaron a cabo mediciones en algunos de los circuitos. La Tabla 24., presenta el cronograma de medición que se llevó a cabo. Adicional, la Tabla 25, resume los consumos de energía eléctrica por áreas y se designa el número de código de los medidores implementados en el campus UAO.

Tabla 24. cronograma de mediciones de consumo de energía eléctrica según lineamientos de la ISO50002

FECHA	ÁREA MEDIDA	TIEMPO DE MEDICIÓN		
AÑO	SUB ESTACIÓN 2	DESDE	HASTA	TIEMPO MEDIDO
2017	A/A Bienestar Universitario	28/10/2017 16:08:00	04/11/2017 16:33:00	7.02
2017	Cafetería tercer piso	28/10/2017 03:55:00	04/11/2017 04:25:00	7.02
2017	Tablero bienestar universitario TD5	21/10/2017 03:07:00	28/10/2017 03:32:00	7.02
2017	Cafeterías segundo piso	21/10/2017 15:21:00	28/10/2017 15:31:00	7.01
2018	Iluminación Cancha de futbol	20/02/2018 05:33:00 PM	21/02/2018 04:13:00 PM	0.94
2018	A/A Bienestar Universitario	20/02/2018 17:43:00	07/03/2018 16:59:00	14.97
2018	A/A Data center	31/03/2018 16:32:00	17/04/2018 15:47:00	16.97
2018	Aulas 4	31/03/2018 17:14:00	17/04/2018 15:39:00	16.93
2018	Cafetera 3er piso	10/02/2018 17:28:00	07/03/2018 16:46:00	24.97
2018	Cafetería 2do Piso	10/02/2018 17:58	20/02/2018 15:58	9.92
2018	Canchas múltiples	20/02/2018 17:22:00	07/03/2018 16:51:00	14.98
2018	PTAP	10/02/2018 16:47:00	20/02/2018 16:56:00	10.01
2018	UPS Data Center	31/03/2018 16:52:00	17/04/2018 15:42:00	16.95
2018	A1 AATORREONES	18/05/2018 15:08:00	26/05/2018 15:08:00	8.00
2018	A2 AATORREONES	12/05/2018 15:51:00	26/05/2018 15:01:00	13.97
2018	A3 AATORREONES	05/05/2018 16:39:00	12/05/2018 15:49:00	6.97
2018	A4 AAPOSGRADOS	05/05/2018 15:29:00	12/05/2018 14:49:00	6.97
AÑO	SUB ESTACIÓN 1	DESDE	HASTA	TIEMPO MEDIDO
2018	Ágora	24/04/2018 17:13:00	28/04/2018 16:38:00	3.98
2018	Sala de tv	24/04/2018 16:41:00	03/05/2018 15:21:00	8.94
2018	Salas Mac	24/04/2018 16:20:00	28/04/2018 16:15:00	4.00
2018	TD 13 Trafo de 30kVA UPS	16/11/2018 17:08:00	24/11/2018 15:13:00	7.92
2018	TD 13 75kVA	16/11/2018 16:45:00	24/11/2018 15:15:00	7.94
2018	UMA QUINCHA	26/05/2018 15:59:00	07/06/2018 19:11:00	12.13
2018	YQUINDE NORTE 16TON	26/05/2018 17:07:00	16/06/2018 01:40:00 PM	20.86

Tabla 25. Datos de consumo de energía eléctrica y código de medidores implementados en la UAO

Subestación de Energía Eléctrica S/E	Total consumo S/E kWh/mes	Medidor de Energía Eléctrica	Ubicación cuartos Eléctricos UAO	Consumo de Energía Eléctrica (kwh/mes)	Áreas Medidas	Consumo de energía por área (kwh/mes)
1	110,863	MEDIDOR Schneider TD6	Piso 1 norte	16,935	PISOS 1 Y 2	26,961
		MEDIDOR Schneider TD7	Piso 1 sur	10,026		
		MEDIDOR Schneider TD8	Piso 3 norte	12,936	PISOS 3 Y 4	23,578
		MEDIDOR Schneider TD9	Piso 3 sur	10,643		
		MEDIDOR Schneider TD10	Sótano 1 norte	10,102	SOTANO 1	27,536
		MEDIDOR Schneider TD11	Sótano 1 sur	17,434		
		MEDIDOR Schneider TD12	Sótano 2 norte	15,331	SOTANO 2	30,179
		ANALIZADOR DE RED HT	Sótano 2 sur	14,848		
		ANALIZADOR DE RED HT	Piso 4 norte	1,093	PISO 4	1,093
		ANALIZADOR DE RED HT	Salas mac	959	SOTANO 1	959
		ANALIZADOR DE RED HT	Ágora	360	SOTANO 1	360
		ANALIZADOR DE RED HT	Estudio tv	196	SOTANO 2	196
2	140,731	MEDIDOR Schneider TD1	Aulas 1	14,568	AULAS	66,268
		MEDIDOR Schneider TD2	Aulas 2	18,014		
		MEDIDOR Schneider TD3	Aulas 3	14,601		
		MEDIDOR Schneider TD4	Aulas 4	19,085		
		MEDIDOR Schneider TD5	Bienestar Univ.	19,346	BIENESTAR UNIVERSIT	22,492
		MEDIDOR Schneider TD5	Bienestar Univ.	3,146		
		ANALIZADOR DE RED HT	PTAR	6,785	PTAR	6,785
		ANALIZADOR DE RED HT	Data center ups	15,015	DATA CENTER	26,151
		ANALIZADOR DE RED HT	Data center AA	11,136		
		ANALIZADOR DE RED HT	Cafetería 3er p	4,634	CAFETERIA	4,634
		ANALIZADOR DE RED HT	PTAP	4,278	PTAP	4,278
		ANALIZADOR DE RED HT	Almacén, Librería, etc.	3,778	CAFETERIA	3,778
		ANALIZADOR DE RED HT	AA 2 y 3er piso	3,325	BIENESTAR UNIVERSIT	3,325
ANALIZADOR DE RED HT	trafo 50kva villa laurentino, gym, canchas multiples.	3,021	VILLA LAURENTINO	3,021		
3	63,784	MEDIDOR Schneider SUBESTACIÓN 3	Enfriadora de agua	63784.21	CHILLER	63,784
<b>TOTAL CONSUMO PROMEDIO MES</b>	315,378					

### 4.3. ANÁLISIS DE LOS USOS Y CONSUMOS DE LA ENERGÍA EN EL CAMPUS

En esta etapa se realizó la caracterización energética del campus, se llevó a cabo el análisis gráfico del comportamiento del uso y consumo de la energía, con el objeto de identificar los periodos y horas de mayor consumo de energía, además de reconocer variables que puedan afectar significativamente el uso y consumo de la energía. A partir de los resultados de este análisis fue posible identificar y priorizar oportunidades para mejorar el desempeño energético.

Las herramientas que se utilizaron para la evaluación correspondieron a gráficas de tendencias lineales, gráficos de control y los diagramas de Pareto. Para el presente análisis se evaluó el año 2016, 2017 y 2018.

Los energéticos que se utilizan en la UAO son: gas natural, energía eléctrica y energía solar-fotovoltaica.

- El Gas Natural es usado en la planta de emergencia marca CATERPILAR cuya capacidad es de 1000 KVA, que opera como suministro de electricidad en caso de cortes.
- El sistema solar fotovoltaico que opera desde el 12 de febrero de 2015 hasta el año 2016 tenía 638 Módulos de 230 Wp c/u, una capacidad instalada de 150 kWp y una producción mensual y anual de 15.000 y 180.000 kWh respectivamente, en el año 2017 se incrementó la capacidad, pues se instalaron paneles fotovoltaicos en las cubiertas de los edificios de Bienestar Universitario y los cuatro edificios de aulas, la potencia instalada fue de 38,2 kWp por cada edificio de Aulas y de 97.56 kWp para el edificio de Bienestar Universitario.
- La Energía Eléctrica es utilizada en los sistemas de iluminación, enfriadoras de agua, aires acondicionados mini Split, sistemas de cómputo u otros equipos tales como impresoras, Escáneres, Fotocopiadoras, Extractores, Secadores, Ventiladores, y Bebederos.

#### 4.3.1. Gráficos de tendencia de consumo por tipo de energético

Se construyeron las gráficas de tendencia (Figuras 73 – 76) para el año 2016, 2017, 2018 y 2019 respectivamente; en las cuales fue posible evaluar de manera general el comportamiento de utilización de energía empleando los datos de consumo por mes: Energía eléctrica de la red, fotovoltaico y gas natural GN; para la conversión a kWh del Gas Natural se utilizó el factor 11.7 kWh/m<sup>3</sup>. (Para el año 2019 no se presenta información del consumo de Gas Natural, pues no fue posible conseguir la información son el Depto. encargado).

Se evidencia conforme al análisis realizado que la energía de mayor consumo en el campus UAO es la energía eléctrica de la red con porcentajes que oscilan entre 64.8 y 95.2 en los diferentes meses de los 4 años analizados; y con bajas participaciones en el consumo de energía están: gas natural y energía fotovoltaica. En el año 2017 se presentó una reducción

del consumo del 18% en energía eléctrica de la red y 53% en gas natural; contrario al caso de la energía fotovoltaica, en el cual se incrementó en un 76%, por la ampliación de la capacidad del sistema que se llevó a cabo.

Tanto en el año 2016 como en el 2017 los meses de mayor consumo de energía analizada se genera en el primer periodo académico que abarca los meses de febrero a mayo, se presenta una excepción en la energía fotovoltaica dado que en el año 2017 se produce aumentos en el tercer periodo académico (agosto a noviembre); debido a la ampliación de la capacidad. Los meses de menor consumo se presentaron en los periodos 2 y 4 que corresponden a las vacaciones; especialmente en la energía eléctrica, gas natural y fotovoltaica. El año 2018 por su parte, tiene los mayores consumos energéticos en los meses de abril, mayo, septiembre y noviembre. Sin embargo, se evidencia que los consumos energéticos totales se redujeron en un 2.55% con respecto al 2017 y de 22.8% con respecto al 2016. El 2019, presenta sus mayores consumos energéticos en los meses de mayo, agosto y octubre, y los menores consumos en los meses de enero y diciembre. Los datos de consumo de energía se registran en la Tabla 26.

Tabla 26 datos de consumo por tipo de energéticos 2016-2019

Año	2016				2017			
Mes/Consumo	Consumo de Energía KWh/mes	Sistema Solar Fotovoltaica KWh/mes	Gas Natural KWh/mes	Consumo Total kWh/mes 2016	Consumo de Energía KWh/mes	Sistema Solar Fotovoltaica KWh/mes	Gas Natural KWh/mes	Consumo Total kWh/mes 2017
Enero	267.644	18.935	18.954	305.533	265.880	14.490	18.954	299.324
Febrero	403.917	18.154	37.534	459.605	327.778	16.880	8.295	352.953
Marzo	335.299	19.045	32.772	387.116	333.408	17.340	25.728	376.476
Abril	385.732	17.127	166.713	569.572	278.846	17.580	5.639	302.065
Mayo	368.364	18.219	27.846	414.429	313.901	28.210	58.980	401.091
Junio	279.592	17.999	35.498	333.089	210.604	43.970	7.102	261.676
Julio	299.786	18.681	3.803	322.270	239.874	49.670	2.422	291.966
Agosto	418.899	17.517	7.827	444.243	297.252	48.990	39.920	386.162
Septiembre	409.230	18.245	27.331	454.806	315.568	51.230	2.890	369.688
Octubre	374.706	18.477	2.995	396.178	299.604	44.810	13.057	357.471
Noviembre	341.199	16.346	983	358.528	269.742	45.388	15.362	330.493
Diciembre	218.687	15.565	32.315	266.567	160.716	45.892	2.235	208.842
Total Año	4.103.055	214.310	394.571	4.711.936	3.313.173	424.450	200.585	3.938.208
Año	2018				2019			
Mes/Consumo	Consumo de Energía KWh/mes	Sistema Solar Fotovoltaica KWh/mes	Gas Natural KWh/mes	Consumo Total kWh/mes 2018	Consumo de Energía KWh/mes	Sistema Solar Fotovoltaica KWh/mes	Gas Natural KWh/mes	Consumo Total kWh/mes 2019
Enero	214.535	45.889	15.596	276.020	193.481	44.154	-	237.635
Febrero	276.019	46.453	398	322.870	262.178	43.081	-	305.260
Marzo	252.125	50.768	4.072	306.965	283.337	45.354	-	328.690
Abril	271.791	43.382	37.148	352.321	247.512	42.641	-	290.152
Mayo	281.236	42.996	22.757	346.989	307.745	41.529	-	349.274
Junio	196.262	40.330	10.202	246.794	203.416	43.131	-	246.547
Julio	238.238	43.397	34.223	315.858	253.210	48.891	-	302.101
Agosto	284.049	48.193	11.291	343.533	300.874	50.617	-	351.491
Septiembre	273.716	47.643	40.693	362.052	298.430	47.446	-	345.877
Octubre	285.752	47.875	10.261	343.888	312.343	47.149	-	359.493
Noviembre	247.129	40.099	94.349	381.577	277.115	40.582	-	317.697
Diciembre	179.085	48.635	11.232	238.952	181.639	42.585	-	224.224
Total Año	2.999.937	545.660	292.219	3.837.816	3.121.281	537.160	-	3.658.441

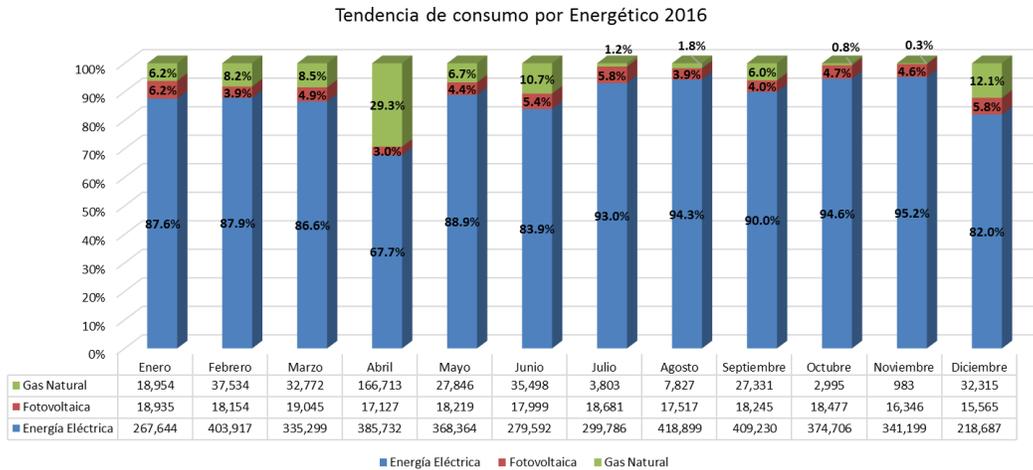


Figura 73. Tendencia de consumo por tipo de energético año 2016

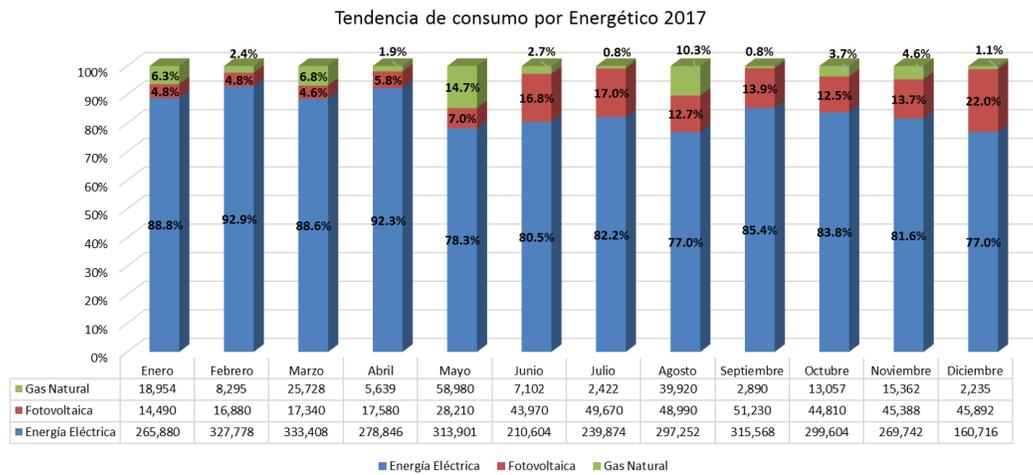


Figura 74. Tendencia de consumo por tipo de energético año 2017

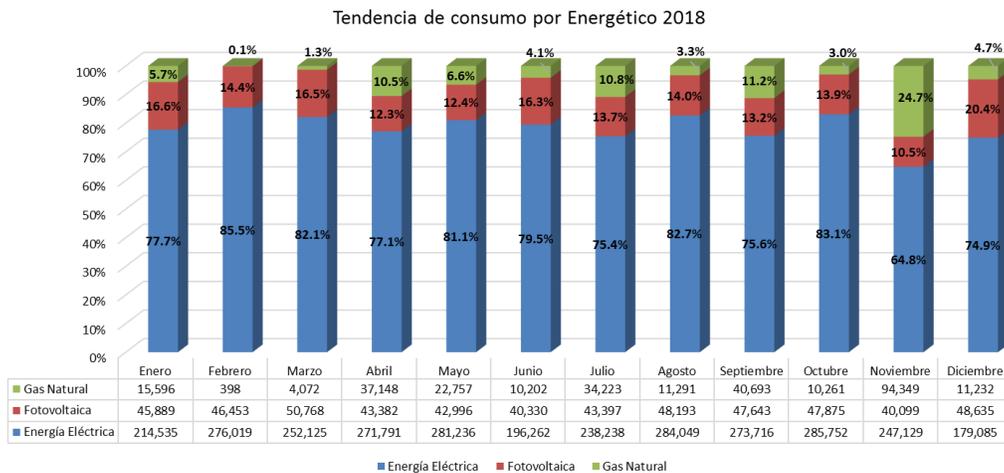


Figura 75. Tendencia de consumo por tipo de energético año 2018

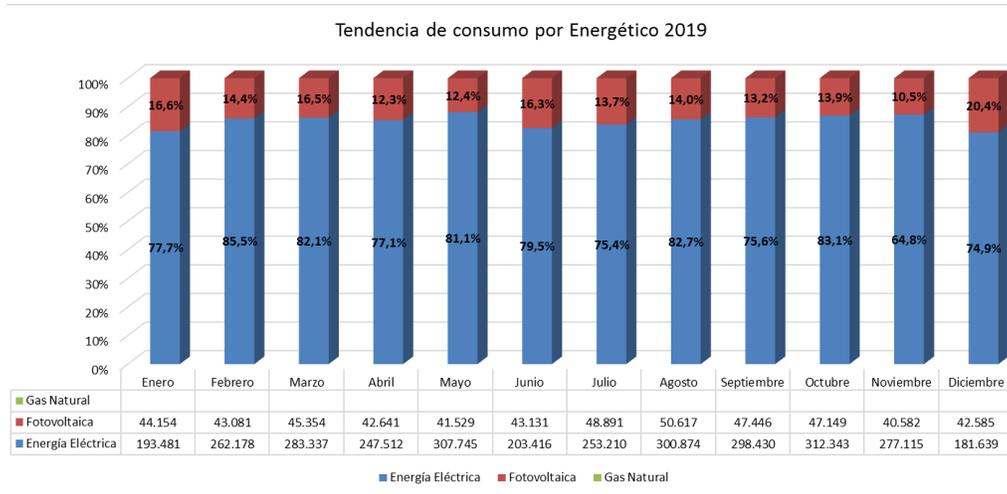


Figura 76. Tendencia de consumo por tipo de energético año 2019

#### 4.3.2. Análisis del uso y consumo de la energía eléctrica y fotovoltaica

Se analizó el consumo total de la energía eléctrica y la generación de energía fotovoltaica de los años 2016, 2017, 2018, 2019 (figuras 77 y 78), se observa que en el año 2016 el sistema solar fotovoltaico aportó en los meses de enero y diciembre aproximadamente el 7% del consumo de energía eléctrica y en promedio aportó el 5% del consumo de energía eléctrica del campus, en el 2017 se presenta un aumento en la generación de energía solar fotovoltaica pues se aumentó la capacidad instalada en el campus, se pasó de suplir un 5% - 7% mensual a suplir hasta el 22% del consumo de energía mensual del campus, en promedio el sistema solar fotovoltaico aportó el 11% del consumo anual de energía eléctrica del campus. En el año 2018 los meses de mayor aporte de energía solar fotovoltaica fueron marzo, agosto y diciembre con la generación de 50.768 kWh, 48.193 kWh y 48.635 kWh respectivamente; el sistema fotovoltaico aportó el 15% del consumo de energía eléctrica anual. En el año 2019 los meses de mayor aporte de energía solar fotovoltaica fueron julio, agosto, septiembre y octubre; el sistema fotovoltaico aportó el 15% del consumo de energía eléctrica anual. Los datos de consumo se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27. Datos de consumo energía eléctrica y fotovoltaica

Año	2016				2017			
Mes / Consumo	Consumo de Energía KWh/mes	Sistema Solar-Fotovoltaico KWh/mes	Consumo total-KWh/mes	participación del SSFV	Consumo de Energía KWh/mes	Sistema Solar-Fotovoltaico KWh/mes	Consumo total-KWh/mes	participación del SSFV
Enero	267.644	18.935	286.579	7%	265.880	14.490	280.370	5%
Febrero	403.917	18.154	422.071	4%	327.778	16.880	344.658	5%
Marzo	335.299	19.045	354.344	5%	333.408	17.340	350.748	5%
Abril	385.732	17.127	402.859	4%	278.846	17.580	296.426	6%
Mayo	368.364	18.219	386.583	5%	313.901	28.210	342.111	8%
Junio	279.592	17.999	297.591	6%	210.604	43.970	254.574	17%
Julio	299.786	18.681	318.467	6%	239.874	49.670	289.544	17%
Agosto	418.899	17.517	436.416	4%	297.252	48.990	346.242	14%
Septiembre	409.230	18.245	427.475	4%	315.568	51.230	366.798	14%
Octubre	374.706	18.477	393.183	5%	299.604	45.388	344.992	13%
Noviembre	341.199	16.346	357.545	5%	269.742	45.892	315.634	15%
Diciembre	218.687	15.565	234.252	7%	160.716	45.427	206.143	22%
<b>Total</b>	<b>4.103.055</b>	<b>214.310</b>	<b>4.317.365</b>	<b>5%</b>	<b>3.313.173</b>	<b>425.067</b>	<b>3.738.241</b>	<b>11%</b>
Año	2018				2019			
Mes/Consumo	Consumo de Energía KWh/mes	Sistema Solar-Fotovoltaico KWh/mes	Consumo total-KWh/mes	participación del SSFV	Consumo de Energía KWh/mes	Sistema Solar-Fotovoltaico KWh/mes	Consumo total-KWh/mes	participación del SSFV
Enero	214.535	45.889	260.424	18%	193.481	44.154	237.635	19%
Febrero	276.019	46.453	322.472	14%	262.178	43.081	305.260	14%
Marzo	252.125	50.768	302.893	17%	283.337	45.354	328.690	14%
Abril	271.791	43.382	315.173	14%	247.512	42.641	290.152	15%
Mayo	281.236	42.996	324.232	13%	307.745	41.529	349.274	12%
Junio	196.262	40.330	236.592	17%	203.416	43.131	246.547	17%
Julio	238.238	43.397	281.635	15%	253.210	48.891	302.101	16%
Agosto	284.049	48.193	332.242	15%	300.874	50.617	351.491	14%
Septiembre	273.716	47.643	321.359	15%	298.430	47.446	345.877	14%
Octubre	285.752	47.875	333.627	14%	312.343	47.149	359.493	13%
Noviembre	247.129	40.099	287.228	14%	277.115	40.582	317.697	13%
Diciembre	179.085	48.635	227.720	21%	181.639	42.585	224.224	19%
<b>Total</b>	<b>2.999.937</b>	<b>545.660</b>	<b>3.545.597</b>	<b>15%</b>	<b>3.121.281</b>	<b>537.160</b>	<b>3.658.441</b>	<b>15%</b>

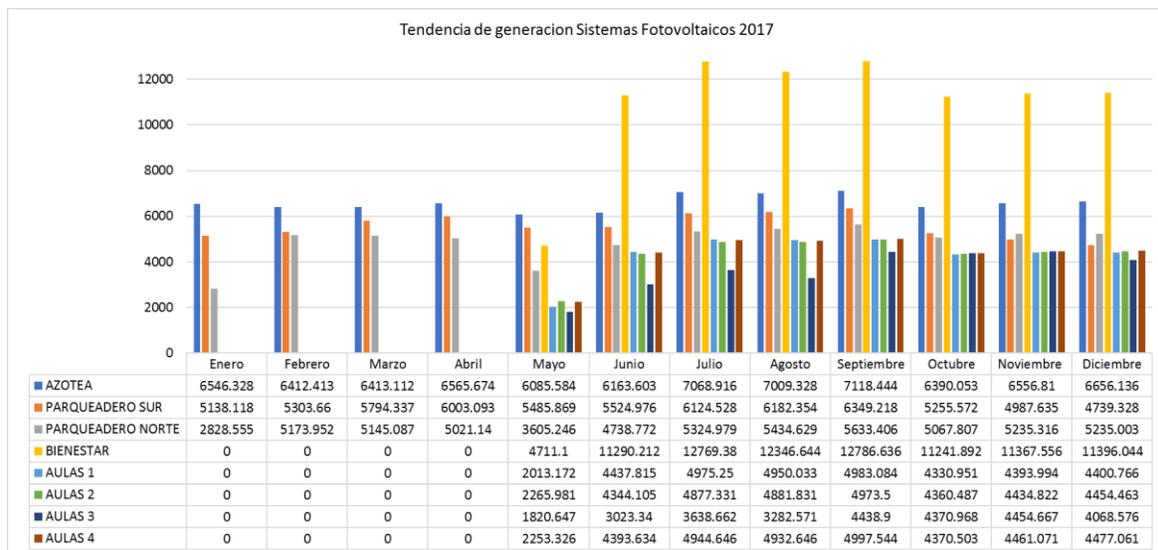


Figura 77. Tendencia de generación sistema fotovoltaico por area año 2017

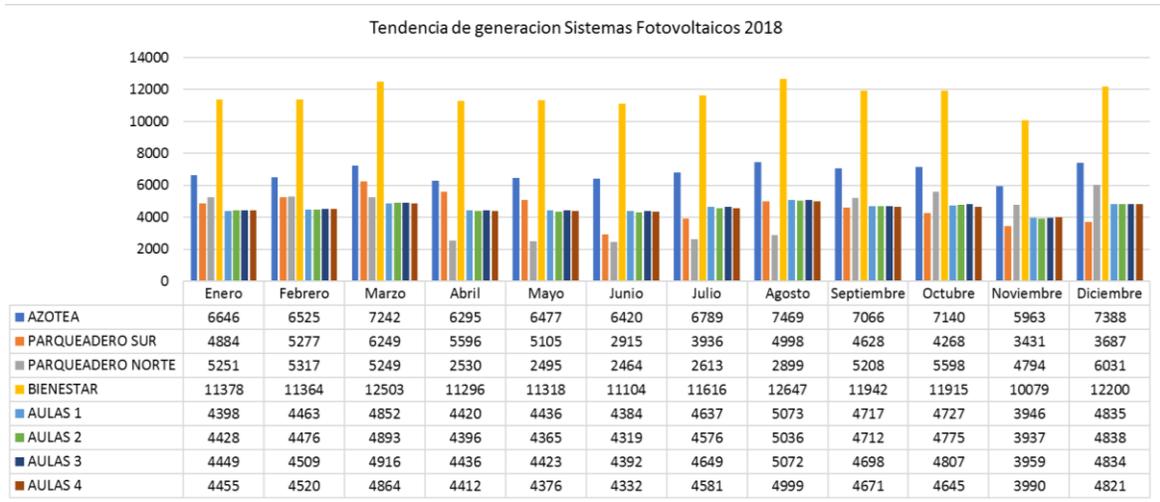


Figura 78. Tendencia de generación sistema fotovoltaico por area año 2018

A continuación, se presentan las tendencias de consumo de energía eléctrica de la red y la suministrada por los sistemas solares fotovoltaicos instalados.

Para el año 2016, el sistema solar fotovoltaico instalado en el campus universitario suplió el 5% del consumo de energía eléctrica como se muestra en la Figura 79.

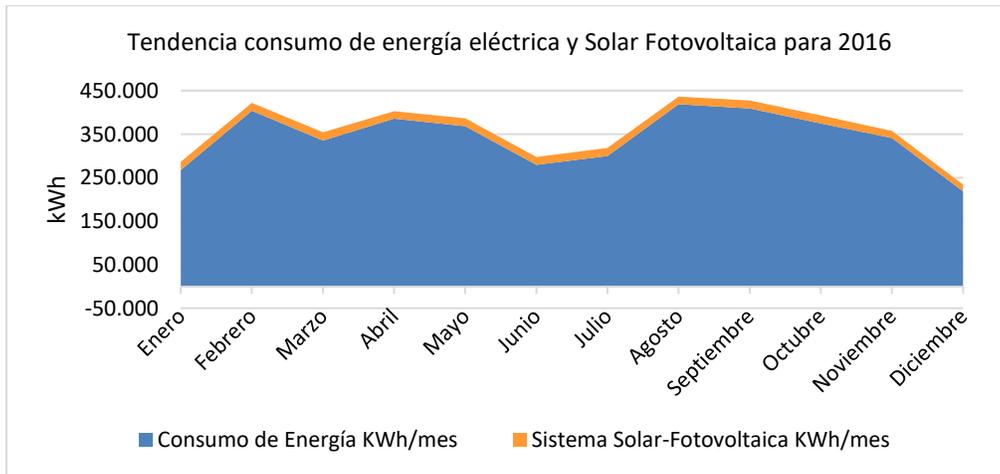


Figura 79. Tendencia de consumo de energía eléctrica y fotovoltaica 2016

Para el año 2017, el sistema solar fotovoltaico instalado en el campus universitario suplió el 11% del consumo de energía eléctrica, los sistemas con mayor participación fueron los instalados en el edificio de bienestar universitario, parqueadero norte y azotea del edificio central (Figuras 80 y 81).

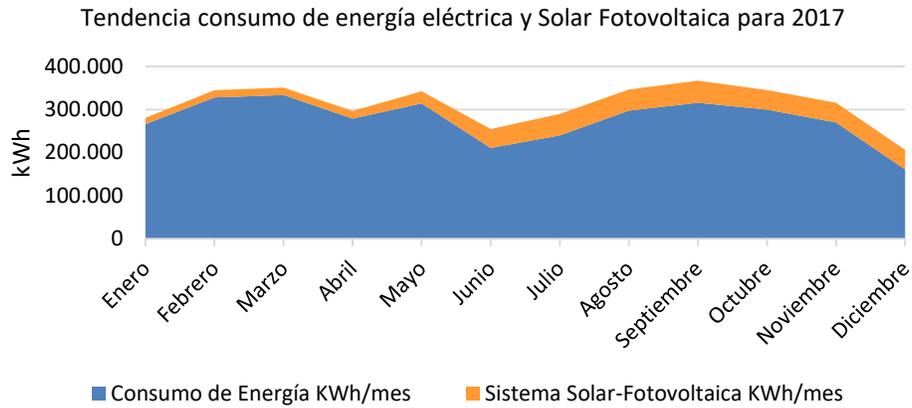


Figura 80. Tendencia de consumo de energía eléctrica y fotovoltaica 2017

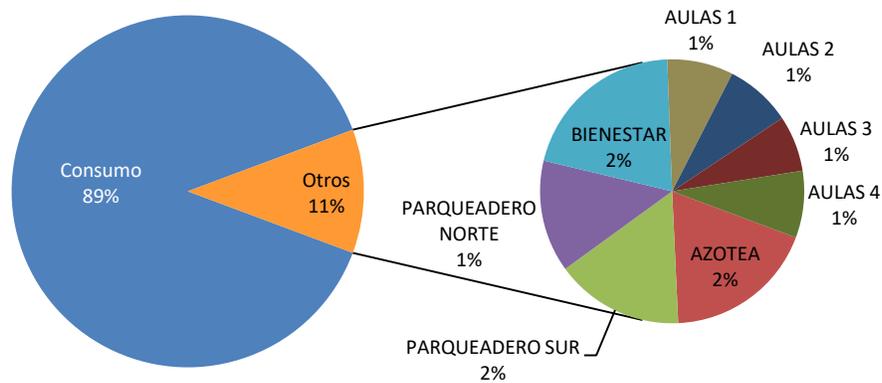


Figura 81. Distribución de la Generación de Energía SSFV 2017

Para el año 2018, el sistema solar fotovoltaico instalado en el campus universitario suplió el 15% del consumo de energía eléctrica, los sistemas con mayor participación fueron los instalados en el edificio de bienestar universitario, parqueadero sur, azotea del edificio central y los edificios de aulas 1 y 3 (Figuras 82 y 83).

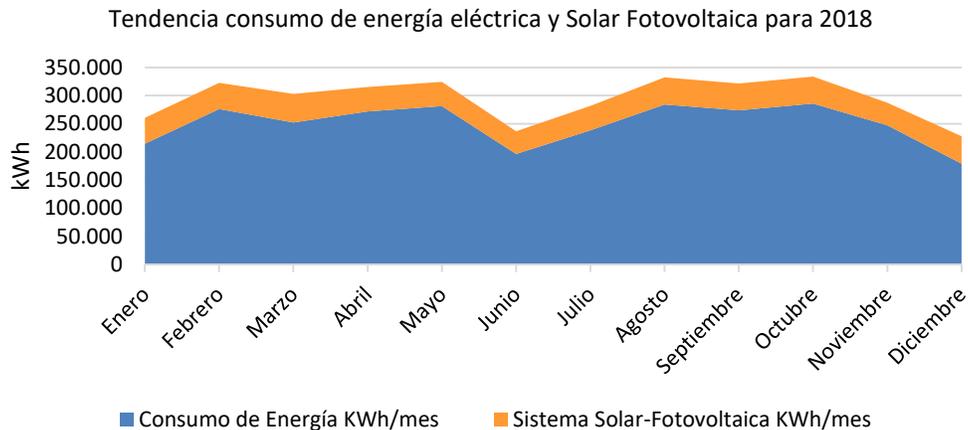


Figura 82. Tendencia de consumo de energía eléctrica y fotovoltaica 2018

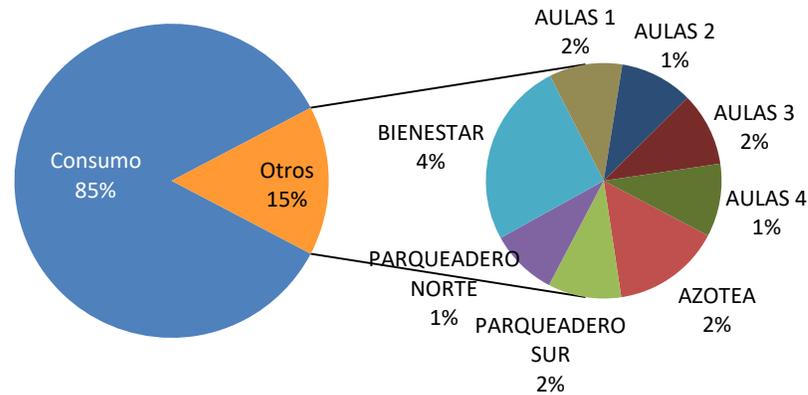


Figura 83. Distribución de la Generación de Energía SFV 2018

#### 4.3.3. Análisis del Consumo de energía eléctrica global de la UAO en los años 2014 – 2019

Se comparó el histórico de consumo de energía eléctrica (2014 – 2019) donde se estableció que los menores consumos se presentaron en los años 2014, 2015, 2016, 2018 y 2019 en los meses de enero, junio y diciembre; mientras que en el año 2017 se da en junio y julio; meses correspondientes a los periodos 2 y 4 de receso. Los mayores consumos se obtuvieron en agosto, septiembre y octubre para los años 2014 hasta 2016, en el año 2017 fueron en febrero y marzo, y en el 2018 y 2019 los consumos más altos se presentaron en mayo, agosto y octubre.

Al analizar el consumo de energía eléctrica y estableciendo el año anterior como base, se encontró que en el año 2015 se presentó un aumento del 6,20%, mientras que, en los años 2016, 2017 y 2018 se dieron reducciones del 2,98%, 19,25% y 9,45% respectivamente. En el año 2017 se evidenció reducción en el consumo de energía eléctrica en todos los meses con respecto al año 2016 el mes con mayor ahorro fue agosto con una disminución del 29%. El año 2018, también tuvo ahorros con respecto a 2017, principalmente en los meses de enero, febrero y marzo con reducciones del 19,3%, 15,8% y 24,4% respectivamente. En el año 2019 se evidencia que todos los meses tuvieron un incremento en el consumo de energía eléctrica con respecto al año anterior (2018), esto debido a las diversas modificaciones realizadas en sus instalaciones.

La Tabla 28 y la Figura 84, enseñan los históricos de consumo y la tendencia del consumo de energía eléctrica de los años 2014 – 2018.

Tabla 28. Histórico de consumo mensual de energía años 2014 – 2019

Meses / Año	Consumo kWh/mes 2014	Consumo kWh/mes 2015	Consumo kWh/mes 2016	Consumo kWh/mes 2017	Consumo kWh/mes 2018	Consumo kWh/mes 2019
Enero	256.624	319.206	267.644	265.880	214.535	237.635
Febrero	342.502	364.179	403.917	327.778	276.019	305.260
Marzo	358.117	374.795	335.299	333.408	252.125	328.690
Abril	336.394	370.267	385.732	278.846	271.791	290.152
Mayo	373.582	377.389	368.364	313.901	281.236	349.274
Junio	260.619	258.879	279.592	210.604	196.262	246.547
Julio	368.982	352.281	299.786	239.874	238.238	302.101
Agosto	366.459	398.638	418.899	297.252	284.049	351.491
Septiembre	380.562	423.916	409.230	315.568	273.716	345.877
Octubre	390.212	405.704	374.706	299.604	285.752	359.493
Noviembre	320.647	340.648	341.199	269.742	247.129	317.697
Diciembre	227.251	243.061	218.687	160.716	179.085	224.224

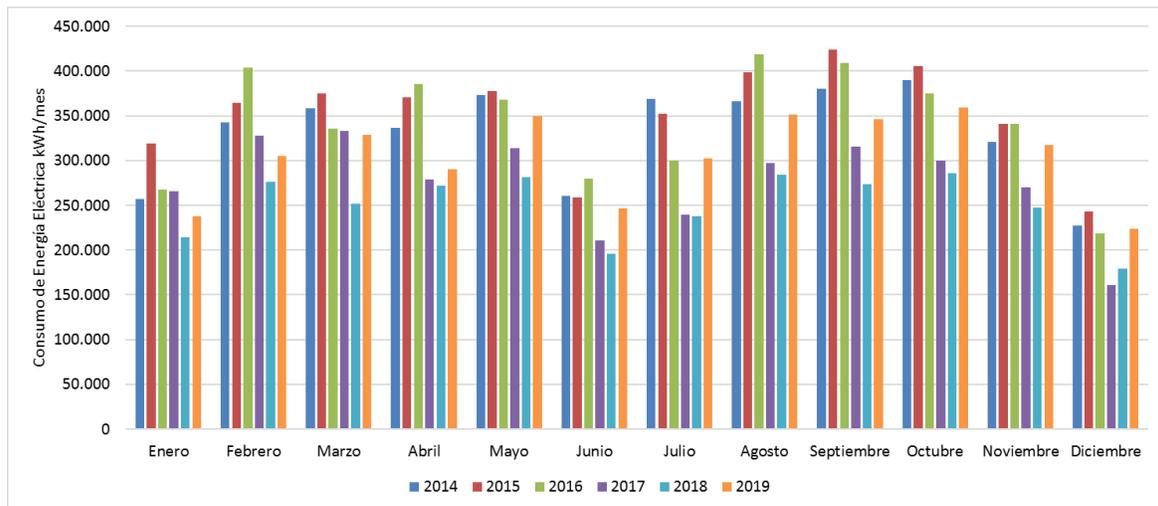


Figura 84. Tendencia de consumo de energía eléctrica mensual desde el año 2014-2019

#### 4.3.4. Análisis de consumo de energía eléctrica del campus UAO en una semana

La Figura 85, muestra el consumo de energía eléctrica en una semana de marzo del año 2017, mes establecido como de mayor consumo energético, y la Figura 86 corresponde al consumo de energía eléctrica global de la UAO en una semana del mes de junio como menor consumo energético, en donde se evidencia que los días de semana (lunes a viernes) poseen una tendencia de consumo similar, con un consumo más reducido de 168,55 kWh y 150 Kwh marcado entre las 23h y las 5h. Los sábados, el consumo disminuye significativamente y que el consumo de los domingos tiene un comportamiento constante equivalente al consumo más bajo.

Las figuras 87 y 88, enseñan el consumo energético de las mismas semanas analizadas en el 2017 para el año 2018. En la semana del mes de marzo de 2018 se evidencia que el consumo más alto fue de 858.7 kWh, mientras que en el 2017 fue de 888.8 kWh, el comportamiento

del consumo sigue una tendencia similar, donde el consumo empieza a crecer desde las 7 am, pero alcanza su nivel máximo alrededor de las 5pm, para el 2017 los consumos picos se alcanzaban 1 hora antes (4pm). Para el mes de junio, catalogado de menor consumo, se evidencia que el consumo es mucho menor (669 kWh consumo más alto 2017 vs. 164.6 kWh consumo más alto de 2018), el consumo total del mes de junio disminuyó en un 6.8% con respecto al 2017.

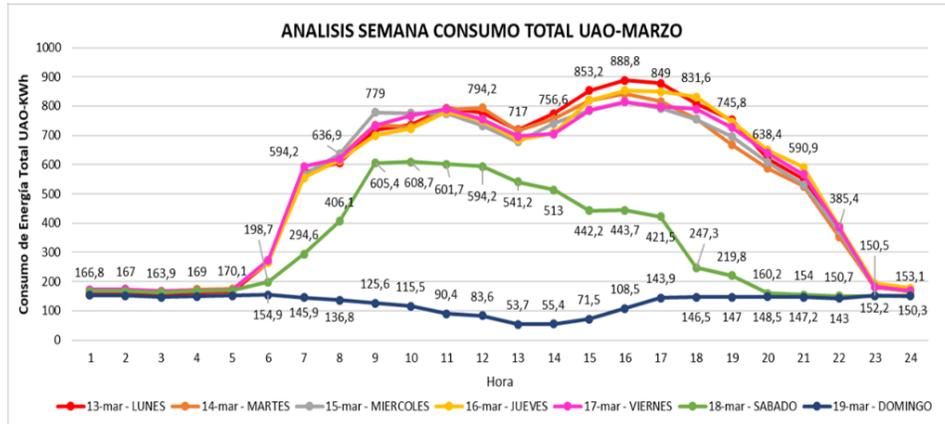


Figura 85. Análisis consumo de energía eléctrica global UAO en una semana de marzo 2017.

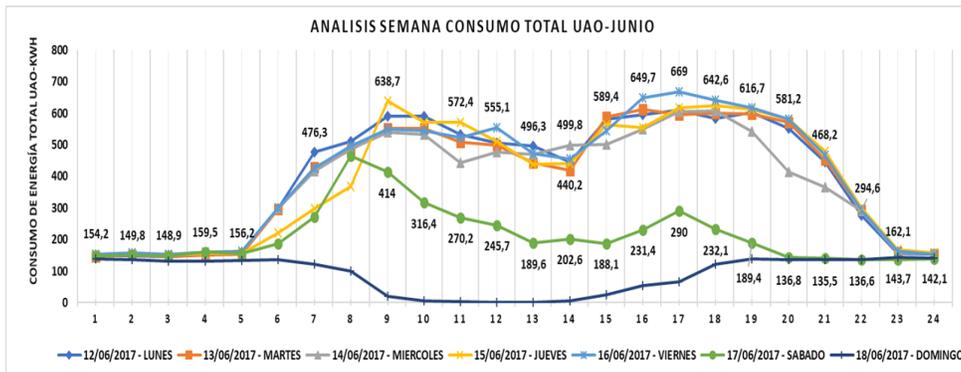


Figura 86. Análisis consumo de energía eléctrica global UAO en una semana de junio 2017

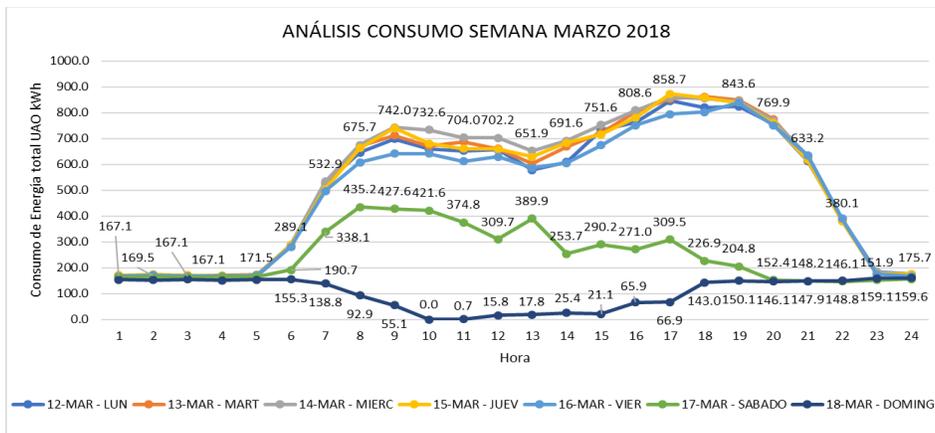


Figura 87. Análisis consumo de energía eléctrica global UAO en una semana de marzo 2018

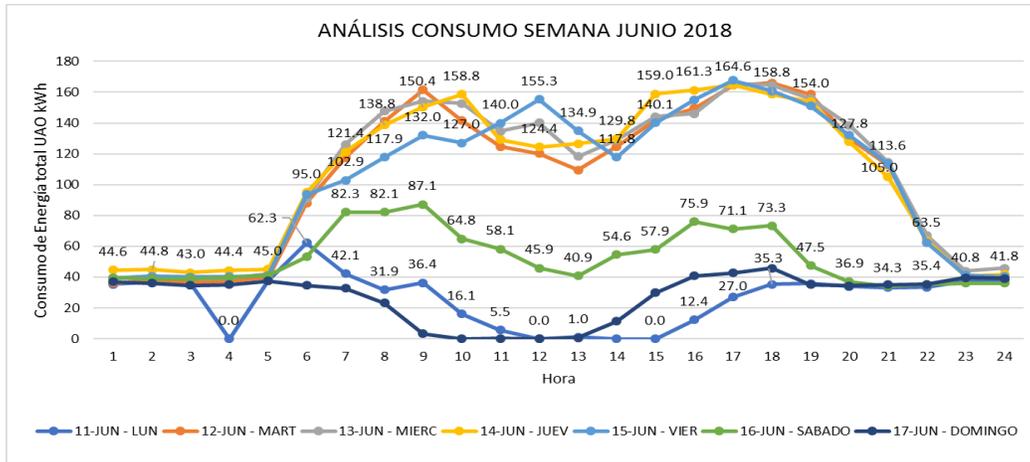


Figura 88. Análisis consumo de energía eléctrica global UAO en una semana de junio 2018

#### 4.3.5. Análisis del uso y consumo de la energía eléctrica por subestaciones

En el análisis de consumo por subestaciones se examinaron los consumos de energía eléctrica de los años 2016, 2017 y 2018 de los medidores de consumo instalados en las 3 subestaciones del campus. Es importante precisar que cada subestación está conformada por:

- **Subestación 1:** Provee la energía del edificio central y tiene una capacidad de 500 KVA.
- **Subestación 2:** Proporciona la energía a los cuatro edificios de Aulas, bienestar universitario, cafetería y plantas PTAR y PTAP; y es de 1000 KVA.
- **Subestación 3:** Tiene una capacidad de 800 KVA y alimenta eléctricamente los Chiller del edificio central, estos últimos que fueron cambiados de 738.54 kW a 879.21 kW.

Conforme los datos arrojados por los medidores de consumo de energía eléctrica y la generación de energía fotovoltaica anuales de cada subestación es posible afirmar que la subestación 2 es la que tiene mayor participación en el consumo con el 39%, 42% y 38% para los años 2016, 2017 y 2018 respectivamente, en segundo lugar, se encuentra la subestación 1 con una participación del 38% para los años en mención, y en el último lugar con una contribución del 23-20-24% está la subestación 3. En la Figura 89, se representa lo mencionado anteriormente.

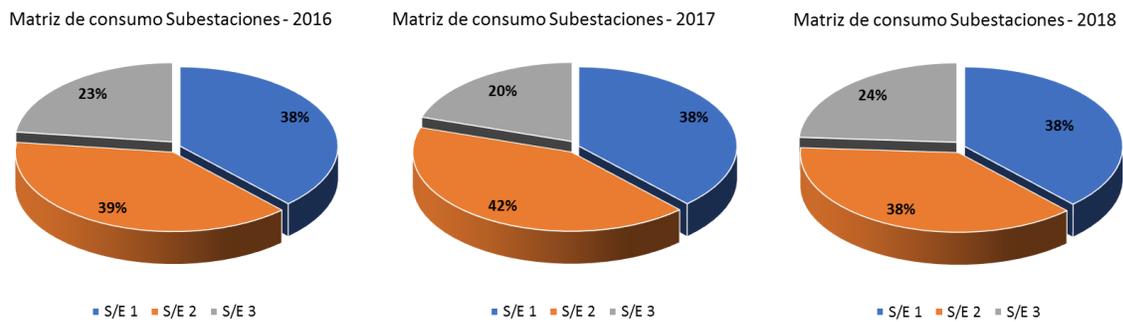


Figura 89. Participación de subestaciones en el consumo de energía eléctrica

#### 4.3.6. Matriz Energética del Campus

Para la elaboración de la matriz energética del año 2016, 2017 y 2018 se utilizaron datos de consumos mensuales de los principales energéticos del campus.

En relación al peso energético que tiene cada portador energético dentro de la matriz de consumo total, la energía eléctrica es el tipo de energía de mayor consumo, con una participación del 87.1 %, 84,1 % y 78.2% para el 2016, 2017 y 2018 respectivamente (Figura 90). En la Tabla 29 se detallan los porcentajes de participación y los consumos para cada uno de los años analizados. Se destaca la reducción del 32% que se ha presentado en el consumo total gracias a los cambios tecnológicos efectuados en la iluminación y el sistema de refrigeración.

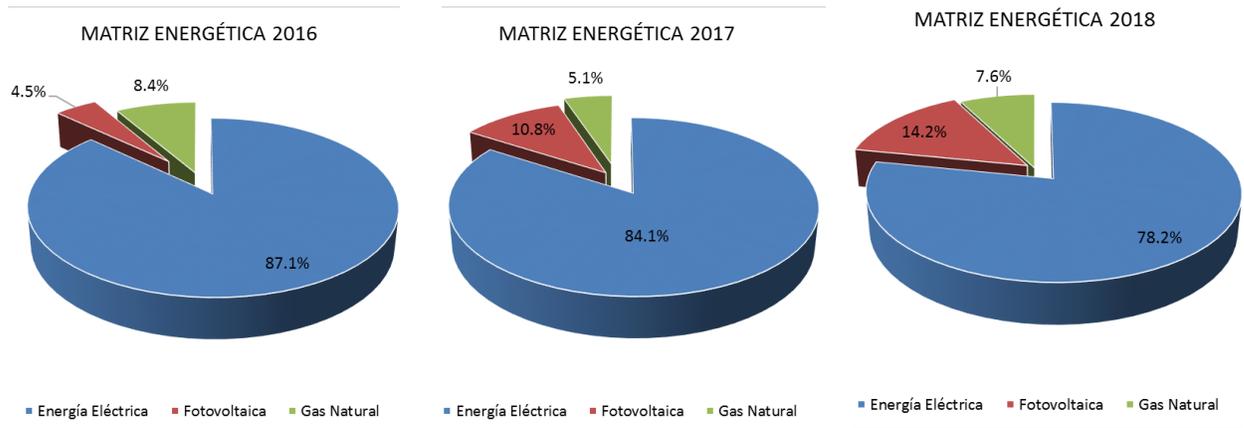


Figura 90. Matrices de consumo de energía años 2016 – 2018

Tabla 29. Datos de consumo por tipo de energía años 2016 – 2018.

Año / Energético	2016		2017		2018	
	Consumo kWh	% Participación	Consumo kWh	% Participación	Consumo kWh	% Participación
Energía Eléctrica	4,103,055	87.1%	3,313,173	84.1%	2,999,937	78.2%
Fotovoltaica	214,310	4.5%	424,450	10.8%	545,660	14.2%
Gas Natural	394,571	8.4%	200,585	5.1%	292,219	7.6%

La Figura 91 presenta el análisis del consumo de un día en la subestación 3 que alimenta a la enfriadora de agua y representa entre el 20 – 24% del total del consumo de la universidad. La Figura 92, presenta el análisis de una semana tipo en la subestación.

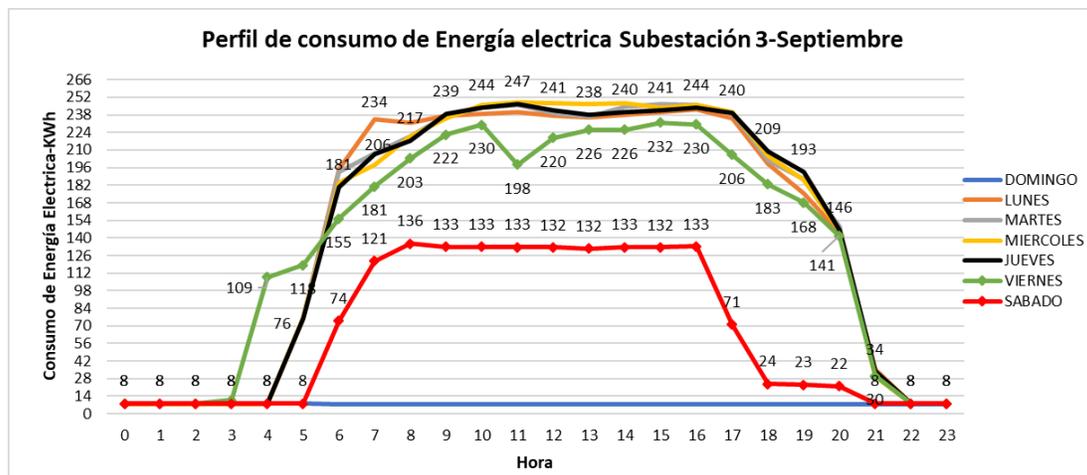


Figura 91. Perfil de consumo de energía en un día de la subestación 3

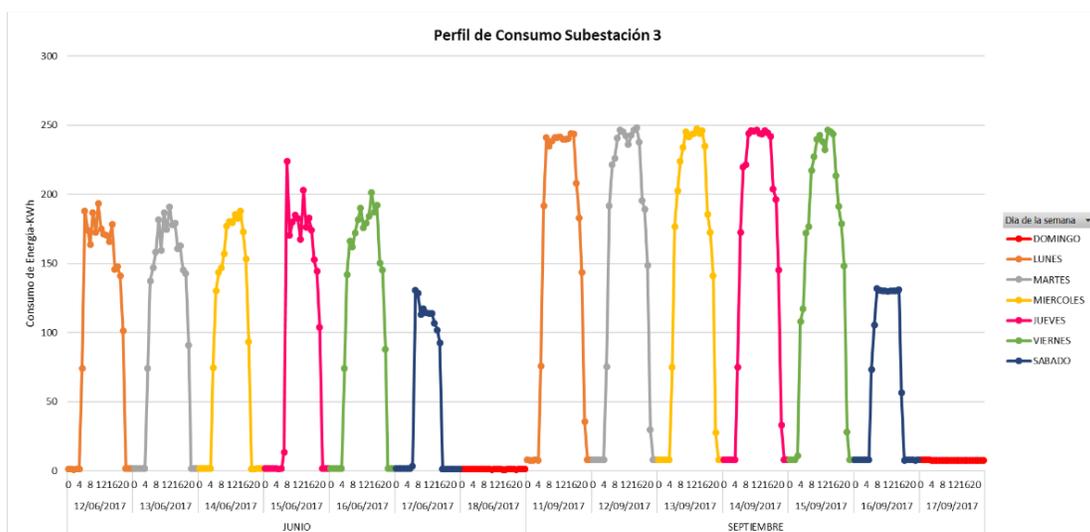


Figura 92. Perfil de consumo semanal subestación 3

#### 4.3.7. Análisis del Consumo de Energía de las Aulas

Para el presente análisis de consumo de energía mensual en las cuatro aulas se incluyó la generación de energía fotovoltaica en el consumo de energía eléctrica este último que se registra en los cuatro medidores que instaló la Universidad.

#### Matriz de consumo de energía Aulas

La mayor participación en el consumo total para los años 2016 y 2017 se presentó en el edificio de aulas 2; con un porcentaje del 27% y 28% respectivamente. En el año 2018 y 2019, el edificio con mayor participación en el consumo total fue el edificio de aulas 4 con un porcentaje del 29% (aumento de aproximadamente 2% debido a las labores de remodelación que se llevaron a cabo en el edificio) para el 2018 y del 30% para el 2019, la Figura 93 muestra las matrices de consumo de energía eléctrica para los edificios de aulas.

La

Tabla 30, recopila el consumo de energía eléctrica en kWh para los edificios y su porcentaje de reducción o aumento para cada aula con respecto al periodo anterior, donde se obtuvo que para el año 2017 el edificio de aulas 1 presentó una disminución del 2.9% consumo, mientras que los edificios de aulas 2 y 4 aumentaron su consumo en 5.2% y 5.3% respectivamente. Para el año 2018, el edificio de aulas 2 obtuvo una reducción del 10.7% del consumo de energía con respecto al 2017 y el de aulas 4 presentó un aumento del 8.9% en el consumo de energía. El año 2019, presentó un incremento en el consumo de energía eléctrica en todos sus edificios, el de menor aumento fue el edificio de aulas 1 con un incremento del 2,5% y el de mayor aumento fue el edificio de aulas 4 con un incremento del 10,6 %.

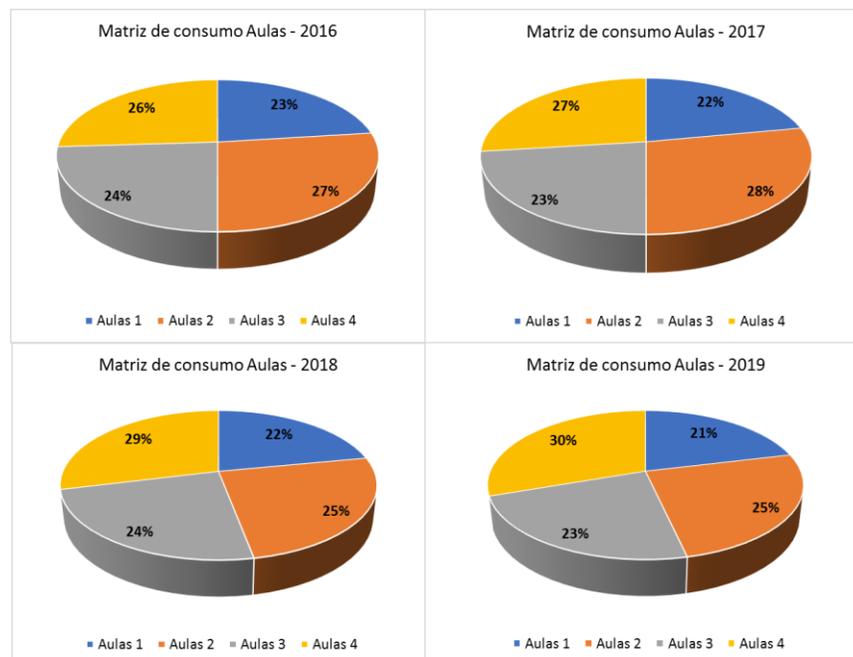


Figura 93. matriz de consumo de energía eléctrica de aulas 2016 – 2019

Tabla 30. Relacion de incremento o decremento en el consumo de energía eléctrica para las aulas en los años 2016 – 2019

Aulas / Consumo	2016	2017	% reducción/ aumento con respecto a 2016	2018	% reducción/ aumento con respecto a 2017	2019	% reducción/ aumento con respecto a 2018
Aulas 1	149.188	144.826	-2,9%	143.638	-0,8%	147.157	2,5%
Aulas 2	172.827	181.821	5,2%	162.440	-10,7%	179.001	10,2%
Aulas 3	154.042	154.756	0,5%	157.392	1,7%	165.337	5,0%
Aulas 4	164.358	173.063	5,3%	188.383	8,9%	208.376	10,6%

### Tendencia de consumo de energía en las cuatro aulas

El comportamiento de consumo mensual que presentan las cuatro aulas es semejante pues en los meses de enero, junio, julio y diciembre se presentan diferencias que fluctúan del 41% a 74% entre los meses de mayor consumo como lo muestra la Tabla 31. Además, se evidencia que en el año 2016 los meses de mayor consumo fueron febrero para aulas 2 y agosto para las aulas 1, 3 y 4; en el 2017 el mayor consumo también se presentó en los meses de febrero, agosto y septiembre; a excepción de aulas 4 en el que apareció en los meses de marzo y mayo. Para 2018 el consumo más alto se presentó en el mes de agosto para los 4 edificios de aula. Los mínimos consumos en los años 2016 y 2017 se presentan en los meses de enero y junio, mientras que en el 2018 los meses de menor consumo fueron junio y diciembre. En el 2019, el consumo más alto se dio en el mes de agosto para los 4 edificios de aulas, mientras que el mes de diciembre fue el de menor consumo para aulas 1, 2 y 3 y en aulas 4 el menor consumo se presentó en el mes de enero.

Tabla 31. Consumo de energía eléctrica promedio por mes edificios de aulas 2016 – 2019

Consumo / Mes	Aulas 1 [kWh/mes]				Aulas 2 [kWh/mes]			
	2016	2017	2018	2019	2016	2017	2018	2019
Enero	8.433	8.665	10.124	8.915	9.761	9.769	10.603	11.626
Febrero	16.478	15.748	14.957	14.120	20.416	20.165	16.503	18.084
Marzo	13.583	16.002	14.161	14.503	16.040	19.561	15.434	18.014
Abril	15.610	12.824	14.994	12.949	17.836	16.128	15.201	15.544
Mayo	14.778	15.621	14.221	14.198	16.841	18.355	14.216	17.386
Junio	6.365	8.710	7.317	8.122	7.160	10.680	9.728	10.044
Julio	8.536	11.316	10.238	10.114	9.755	14.137	11.151	11.614
Agosto	17.469	16.227	15.093	16.035	20.325	21.677	16.726	20.551
Septiembre	16.711	16.828	14.315	15.845	19.137	23.201	16.764	19.366
Octubre	13.857	11.083	11.270	15.174	15.241	15.425	14.667	17.684
Noviembre	12.256	8.718	8.843	11.209	14.022	10.030	11.733	12.427
Diciembre	5.112	3.085	8.104	5.976	6.293	2.693	9.714	6.663
<b>Total Aulas</b>	<b>149.188</b>	<b>144.826</b>	<b>143.638</b>	<b>147.159</b>	<b>172.827</b>	<b>181.821</b>	<b>162.440</b>	<b>179.003</b>
Consumo / Mes	Aulas 3 [kWh/mes]				Aulas 4 [kWh/mes]			
	2016	2017	2018	2019	2016	2017	2018	2019
Enero	8.511	10.330	11.877	11.396	7.517	8.621	11.945	8.157
Febrero	15.933	15.439	16.503	14.961	19.123	19.672	18.621	18.339
Marzo	13.467	15.871	15.372	15.406	15.921	20.782	17.860	19.271
Abril	15.361	13.371	15.978	13.721	18.948	17.120	18.972	15.445
Mayo	14.858	14.870	14.770	15.184	17.409	20.919	18.239	18.876
Junio	9.403	9.751	8.714	9.064	5.001	10.869	10.453	12.135
Julio	9.700	13.606	11.983	11.808	8.365	11.163	13.731	20.271
Agosto	17.337	17.725	16.402	18.167	19.859	18.805	19.144	24.242
Septiembre	16.147	17.724	15.245	17.916	18.579	18.509	18.292	22.723
Octubre	13.683	12.399	12.789	15.905	15.704	12.640	17.515	21.390
Noviembre	11.989	9.275	9.932	13.865	12.879	10.409	14.198	17.109
Diciembre	7.653	4.395	7.827	7.944	5.053	3.554	9.414	10.418
<b>Total Aulas</b>	<b>154.042</b>	<b>154.756</b>	<b>157.392</b>	<b>165.338</b>	<b>164.358</b>	<b>173.063</b>	<b>188.383</b>	<b>208.376</b>

### Perfil de Consumo aulas por Jornada

Conforme al perfil de consumo por jornada que se muestra en la Figura 94 permite evidenciar que en todas las aulas incrementan los consumos en la jornada diurna con porcentajes que varían del 48% al 74% y que equivalen en promedio a 46.938 KWh/mes en el primer periodo; 10.609 KWh/mes en el segundo periodo; 45.193 KWh/mes en el tercer periodo; y 9.437 KWh/mes en el cuarto periodo; mientras que los mínimos consumos se presentan en los periodos 1 y 3 en la jornada de madrugada; y en los periodos 2 y 4 de receso se alterna entre las jornadas de madrugada y nocturna. La Tabla 32, presenta el consumo de energía promedio en cada aula según la jornada de madrugada, diurna y nocturna para los años 2016 y 2017.

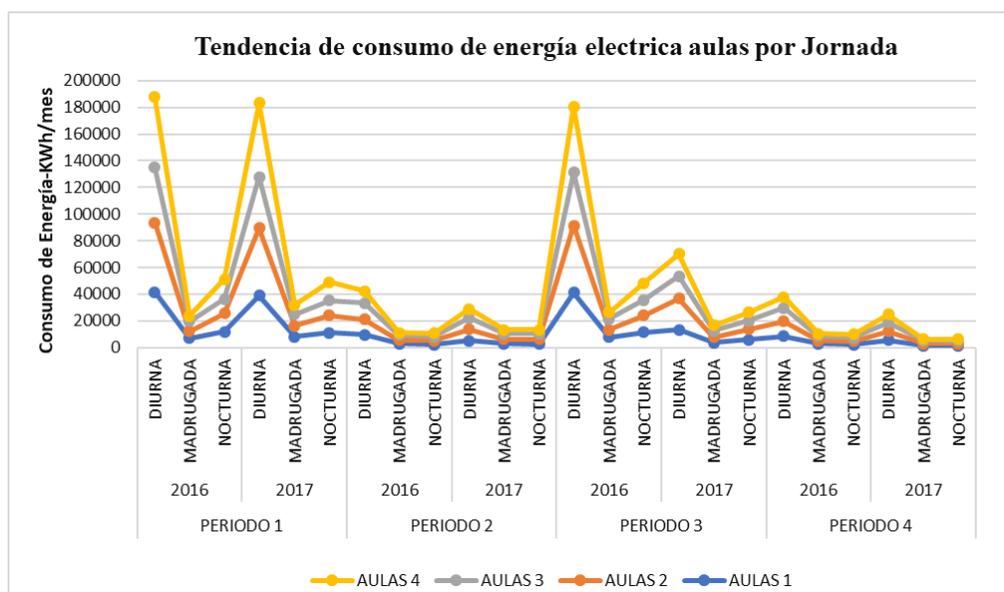


Figura 94. tendencia de consumo de energía eléctrica aulas por jornada-Años 2016 y 2017

Tabla 32. consumo de energía eléctrica promedio en cada aulas por jornada -2016 y 2017

Consumo Jornada	Aulas 1 kWh/mes	Aulas 2 kWh/mes	Aulas 3 kWh/mes	Aulas 4 kWh/mes	Aulas 1 kWh/mes	Aulas 2 kWh/mes	Aulas 3 kWh/mes	Aulas 4 kWh/mes
<b>Periodo</b>	<b>Periodo 1</b>				<b>Periodo 3</b>			
<b>Año</b>	<b>2016</b>							
<b>Diurna</b>	41.626	51.888	41.603	52.636	41.182	50.254	39.700	49.638
<b>Madrugada</b>	7.083	5.263	7.167	4.099	7.624	5.806	8.071	4.765
<b>Nocturna</b>	11.741	13.982	10.849	14.666	11.487	12.664	11.385	12.619
<b>Total 2016</b>	60.449	71.133	59.619	71.401	60.293	68.725	59.156	67.022
<b>Año</b>	<b>2017</b>							
<b>Diurna</b>	38.867	50.727	38.264	55.479	13.535	23.170	16.642	17.016
<b>Madrugada</b>	8.305	7.923	8.640	6.982	3.580	4.036	4.944	4.009
<b>Nocturna</b>	11.012	13.299	10.826	13.782	6.010	7.821	6.153	6.370
<b>Total 2017</b>	58.185	71.949	57.730	76.243	23.125	35.028	27.739	27.395

Periodo	Periodo 2				Periodo 4			
Año	2016							
Diurna	9.452	11.879	12.093	9.011	8.560	11.046	10.273	8.109
Madrugada	3.118	2.335	3.773	1.874	2.789	2.397	3.252	1.895
Nocturna	2.331	2.700	3.237	2.481	2.196	2.612	2.638	2.566
<b>Total 2016</b>	<b>14.901</b>	<b>16.915</b>	<b>19.103</b>	<b>13.366</b>	<b>13.545</b>	<b>16.054</b>	<b>16.163</b>	<b>12.570</b>
Año	2017							
Diurna	5.068	8.548	8.663	6.778	5.727	6.683	6.570	6.012
Madrugada	2.814	3.290	4.214	2.933	1.554	1.435	2.042	1.153
Nocturna	2.744	3.679	3.829	2.990	1.384	1.652	1.718	1.457
<b>Total 2017</b>	<b>10.626</b>	<b>15.517</b>	<b>16.707</b>	<b>12.701</b>	<b>8.665</b>	<b>9.769</b>	<b>10.330</b>	<b>8.621</b>

#### 4.3.8. Análisis de los usos significativos del Campus

Para el análisis de los usos significativos del campus y los edificios de aulas se utilizó la herramienta estadística diagrama de Pareto. La misma permitió clasificar gráficamente la información de mayor a menor relevancia, con el fin de reconocer las áreas de mayor consumo y establecer prioridades en cuanto a los sitios de mayor oportunidad para el logro de ahorros energéticos.

Para la elaboración de los paretos de consumo de energía eléctrica por área y global se utilizaron datos arrojados por los 19 medidores que están instalados la Universidad.

#### Pareto Usos significativos de energía eléctrica campus UAO

Se evidenció que el aire acondicionado es el que mayor participación tiene en el consumo de energía eléctrica total con un porcentaje del 40% y un valor de 126.967KWh/mes; seguido con el 32% de los Computadores, impresoras y equipos de laboratorio UAO como lo muestran las figuras 95 y 96.

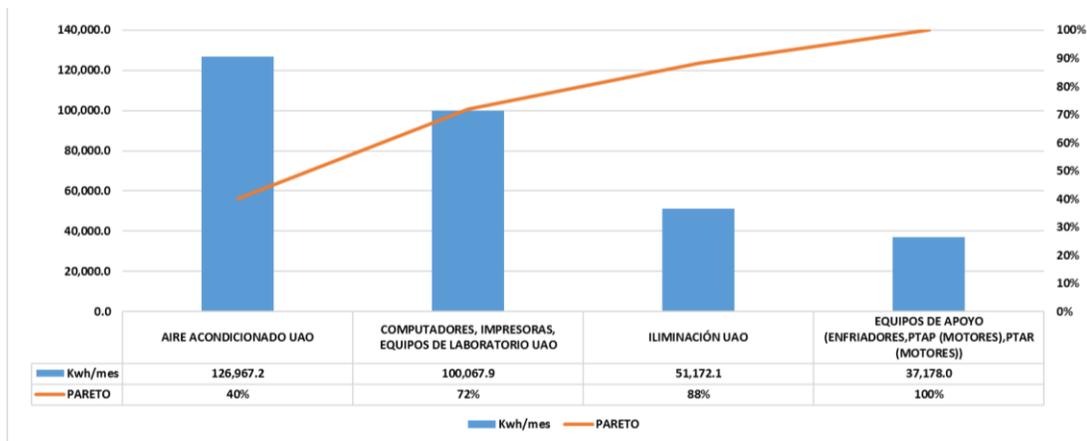


Figura 95. Pareto uso significativo de energía eléctrica UAO

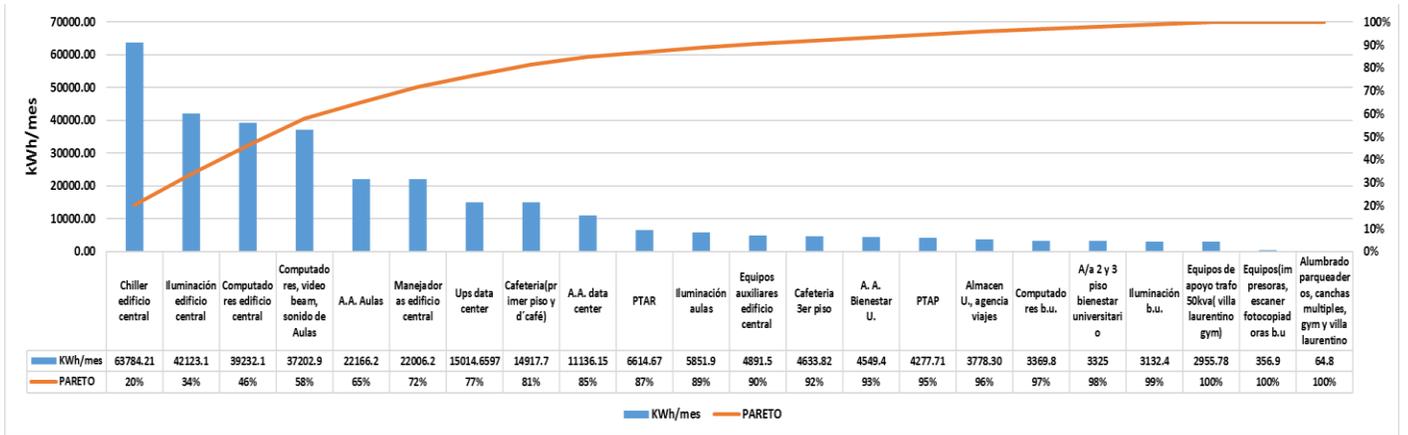


Figura 96. Pareto general de consumo de energía eléctrica UAO

Los equipos, sistemas y/o áreas que representan el 20% y tienen el 80% del consumo de energía eléctrica total son: el chiller del edificio central con un 20%; iluminación edificio central con el 14%; con el 12% están los computadores edificio central y computadores, videobeam y sistemas de sonidos de aulas; con el 7% se encuentran los aires acondicionado aulas y manejadores del edificio central; y con el 5% y 4% respetivamente está la UPS DATA CENTER y la cafetería primer piso y D'café como lo enseñan las figuras 97 – 102.

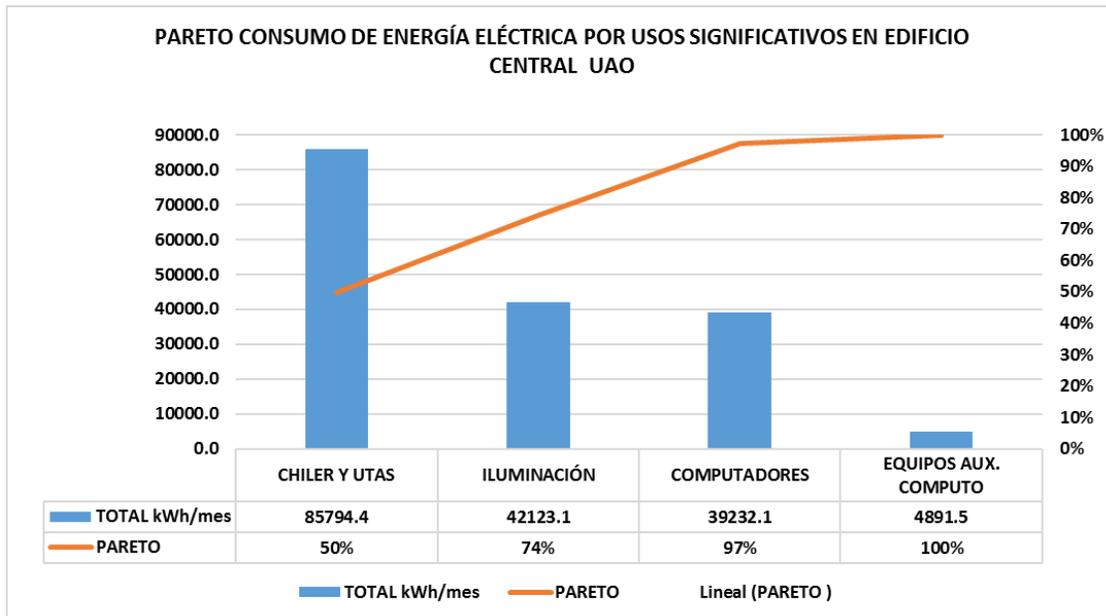


Figura 97. Pareto de consumo de energía eléctrica por usos significativos en edificio central UAO

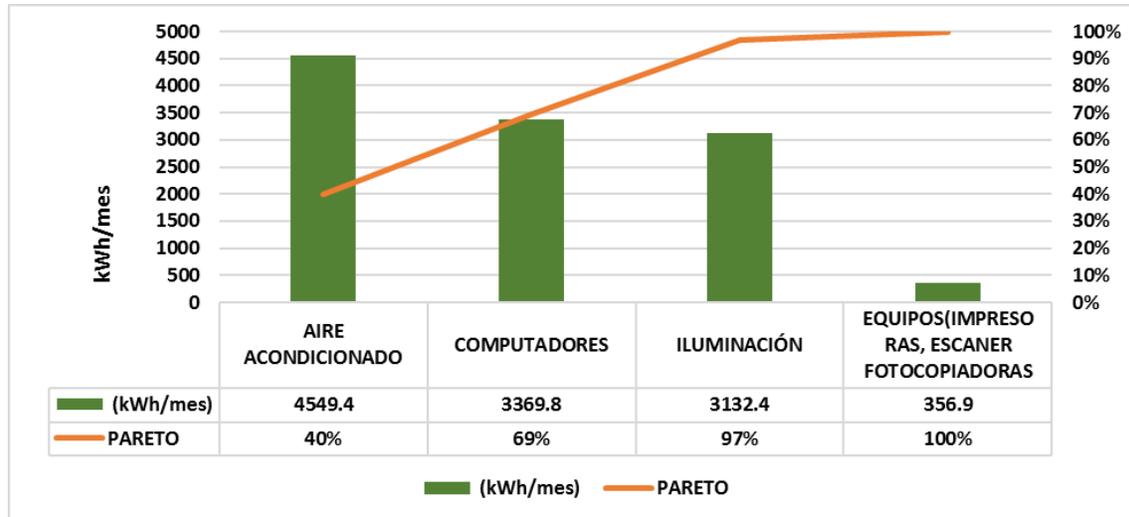


Figura 98. Pareto de consumo de energía eléctrica por usos significativos en bienestar universitario UAO

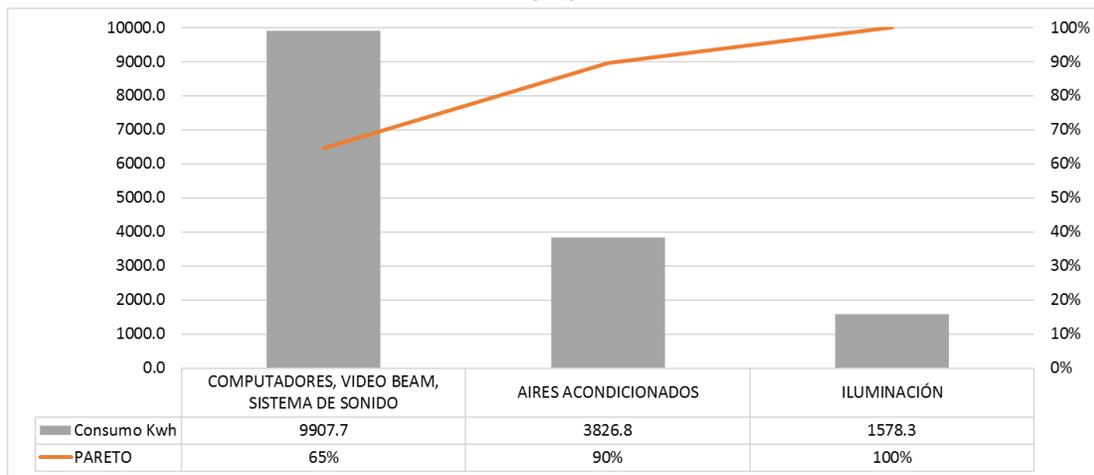


Figura 99. Pareto consumo de energía eléctrica por usos significativos aulas 1

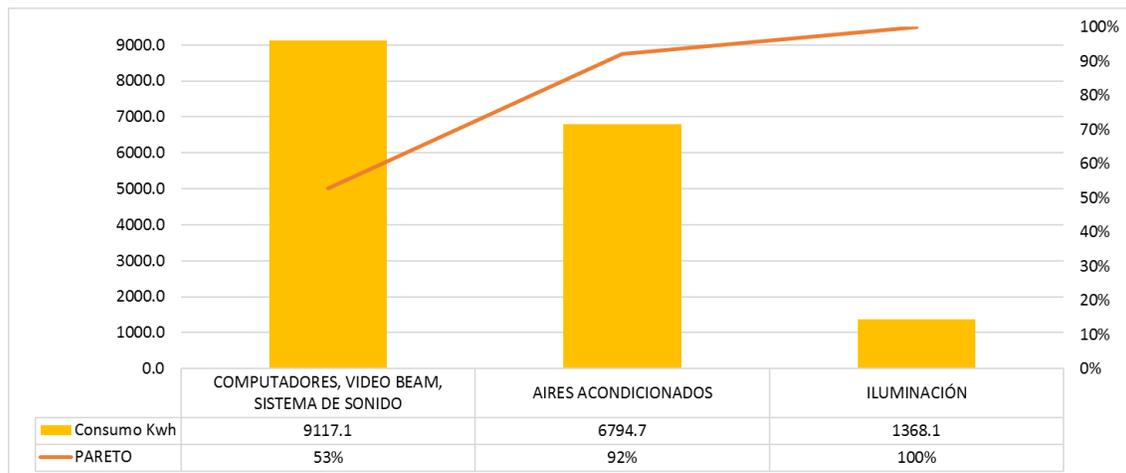


Figura 100. Pareto consumo de energía eléctrica por usos significativos aulas 2

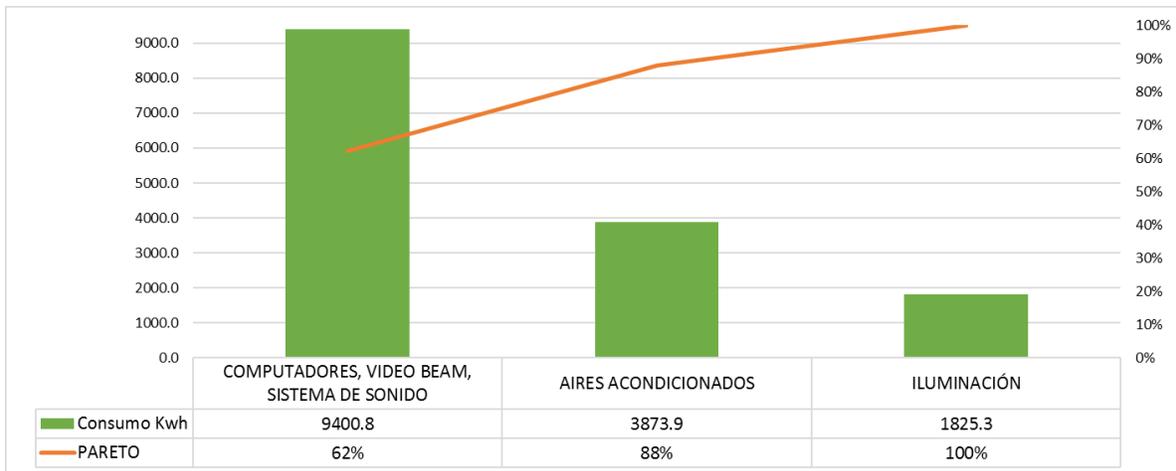


Figura 101. Pareto consumo de energía eléctrica por usos significativos aulas 3

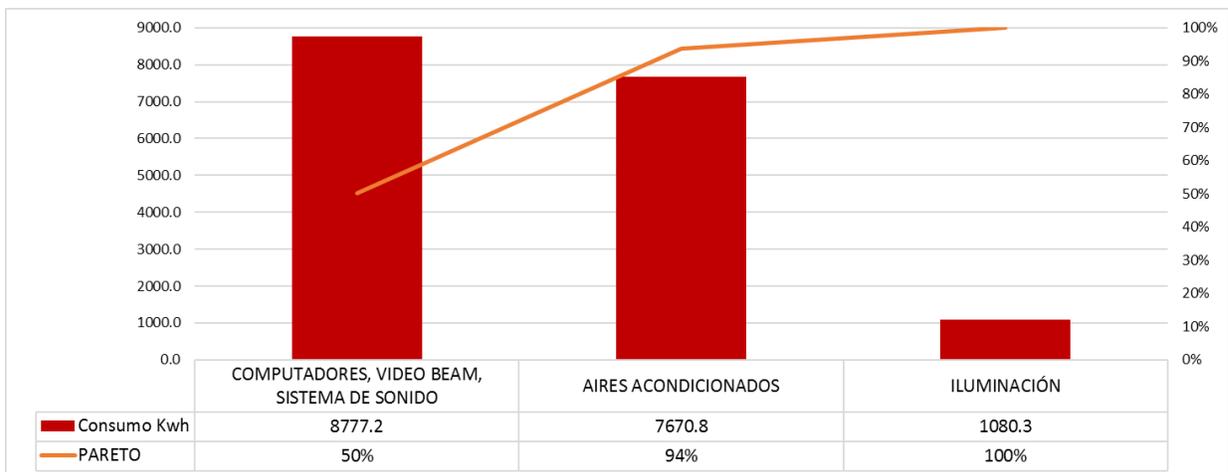


Figura 102. Pareto consumo de energía eléctrica por usos significativos aulas 4

## CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y ESTUDIO ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE AULAS 4 DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE

En este capítulo se realiza la simulación dinámica del edificio aulario 4 utilizando el software Design Builder y su motor de cálculo energy plus, con el propósito de conocer la situación energética del aulario y describir los aspectos de la eficiencia energética en la edificación, tanto en lo pasivo como activo. Lo anterior, teniendo en cuenta la calibración del modelo utilizando los datos de monitorización continua del Sistema BMS instalado en la edificación. El campus cuenta con cuatro edificios dedicados a las labores de docencia en pregrado y posgrado, todas las aulas son similares. El edificio Aulario 4 es usado principalmente en actividades de tipo académicas y administrativas, el 68% de los recintos del edificio (aulas y torreones) son usados para impartir clases de pregrado, posgrados y diversos eventos académicos. Su horario de funcionamiento es de 6:30 am a 9:30 pm de lunes a viernes y, de 7:30 am a 5:00 pm los sábados. Para el análisis energético se seleccionó este Aulario, dado que se tiene proyectado desde la administración hacer actualizaciones de tipo tecnológico.

En este sentido, la simulación energética se constituye en un aporte para evaluar los cambios proyectados, no solo desde medidas activas si no pasivas en aras de conseguir unas medidas de ahorro energético que contribuyan a optimizar la eficiencia, siendo extensivas a las demás edificaciones del campus.

### 5.1. SITUACIÓN

El edificio objeto de estudio energético es el correspondiente a aulas 4 de la Universidad Autónoma de Occidente de Cali, el cual se haya ubicado en el extremo noroeste ubicado en la longitud 3,354149, con latitud -76,520925 como puede observarse en la Figura 103, la Figura 104 presenta la localización del edificio de Aulas 4 dentro del campus.



Figura 103. Ubicación Campus Universitario Universidad Autónoma de Occidente  
Fuente: Google Maps



Figura 104. Localización del edificio de aulas 4

## 5.2. DESCRIPCIÓN GENERAL Y USO

El edificio es usado principalmente en actividades de tipo académicas y administrativas, el 68% de los recintos del edificio (aulas y torreones) son usados para impartir clases de pregrado, posgrados y diversos eventos académicos. Su horario de funcionamiento es de 6:30 am a 9:30 pm de lunes a viernes y, de 7:30 am a 5:00 pm los sábados.

El edificio cuenta con cuatro pisos, en el primer piso existen 3 torreones (aclimatados), dos baños y la oficina de egresados (aclimatada), el segundo piso se compone de 6 aulas, la oficina de TIC (aclimatada), 2 baños y un torreón (aclimatado), el tercer piso alberga la oficina de planta física (aclimatada), 6 aulas, 2 baños y un torreón (aclimatado) y el cuarto piso consta de una oficina (aclimatada), 10 aulas (aclimatadas), 2 baños y un torreón (aclimatado).

A continuación, se adjuntan algunas fotografías de la morfología del edificio (figuras 105 – 109).



Figura 105. Fachada este del edificio de aulas 4.



Figura 106. Fachada sureste del edificio de aulas 4.



Figura 107. Fachada escaleras del edificio.



Figura 108. Fachada sur del edificio de aulas 4.



Figura 109. Fachada norte del edificio de aulas 4.

### 5.3. DISTRIBUCIÓN

El edificio consta de cuatro pisos, en la Tabla 33 se expresan las áreas ocupadas por cada piso y su altura:

Tabla 33. Superficies por pisos.

Piso	Superficie (m <sup>2</sup> )	Altura (m)
1	878,95	2,6
2	869,71	2,6
3	690,74	2,6
4	648,45	2,6
<b>Total</b>	<b>3087,85</b>	<b>2,6</b>

En la Figura 110 y la Tabla 34, se describe el primer piso (planta baja del edificio) que se compone de 848,29 m<sup>2</sup>.

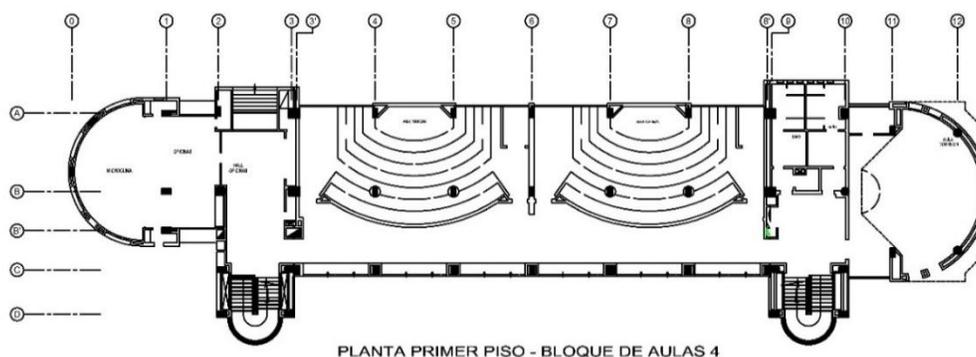


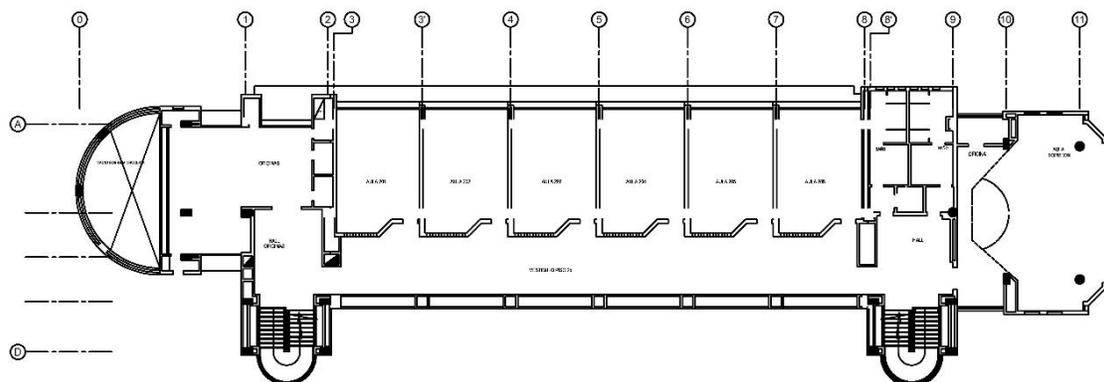
Figura 110. Primer piso.

Tabla 34. Superficies piso 1.

Recinto	Superficie (m <sup>2</sup> )
<b>Registro académico</b>	96,55
<b>A4t1</b>	111,16
<b>A4T1A</b>	136,61
<b>A4T1B</b>	136,59
<b>Baño mujeres p1</b>	26,98
<b>Baño hombres p1</b>	23,63
<b>Pasillo sur p1</b>	158,03
<b>Pasillo este p1</b>	40,11
<b>Pasillo oeste p1</b>	73,49
<b>Cm. A4T1</b>	8,17
<b>Cm. A4T1A</b>	6,09
<b>Cm. A4T1B</b>	5,51
<b>Escalera este p1</b>	10,71
<b>Escalera oeste p1</b>	23,52
<b>Baño mujeres r.a.</b>	2,83
<b>Baño hombres r.a.</b>	2,94

<b>Cuarto técnico p1</b>	<b>3,52</b>
<b>Cuarto multimedia</b>	<b>12,51</b>
<b>Total</b>	<b>878,95</b>

En la Figura 111 y la Tabla 35 , se describe el segundo piso (planta primera del edificio) que se compone de 874,90 m<sup>2</sup>.



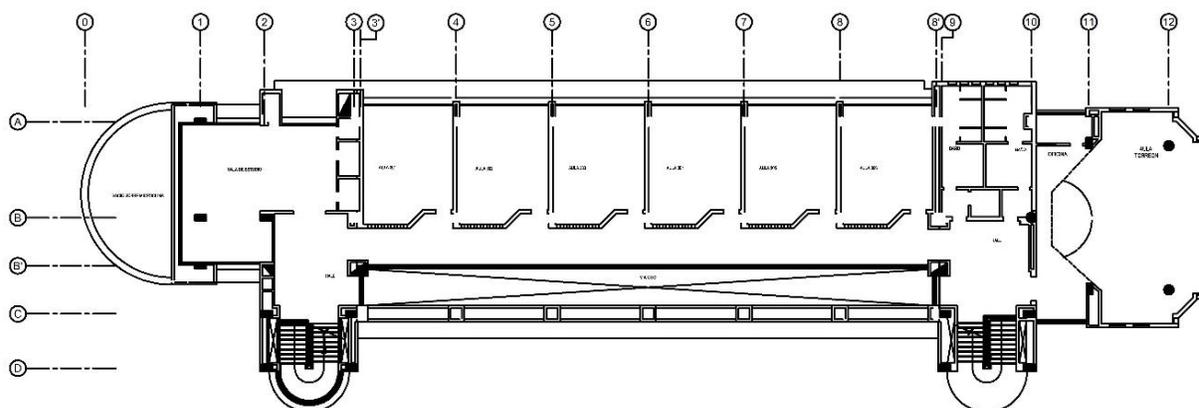
PLANTA SEGUNDO PISO - BLOQUE DE AULAS 4

Figura 111. Segundo piso.

Tabla 35. Superficies piso 2.

<b>Recinto</b>	<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>
<b>TIC norte</b>	<b>123,88</b>
<b>4201</b>	<b>45,55</b>
<b>4202</b>	<b>46,94</b>
<b>4203</b>	<b>46,94</b>
<b>4204</b>	<b>46,94</b>
<b>4205</b>	<b>47,08</b>
<b>4206</b>	<b>42,85</b>
<b>A4T2</b>	<b>126,88</b>
<b>Baño mujeres p2</b>	<b>26,97</b>
<b>Baño hombres p2</b>	<b>23,63</b>
<b>Pasillo sur p2</b>	<b>178,13</b>
<b>Pasillo este p2</b>	<b>40,13</b>
<b>Pasillo oeste p2</b>	<b>37,61</b>
<b>Cm. A4T2</b>	<b>7,98</b>
<b>C. T. TIC 1</b>	<b>2,89</b>
<b>C. T. Tic 2</b>	<b>3,46</b>
<b>C. T. Tic 3</b>	<b>1,49</b>
<b>Escalera este p2</b>	<b>12,8</b>
<b>Escalera oeste p2</b>	<b>0,03</b>
<b>Baño mujeres TIC</b>	<b>2,16</b>
<b>Baño hombres TIC</b>	<b>2,26</b>
<b>Baño auxiliar TIC</b>	<b>3,11</b>
<b>Total</b>	<b>869,71</b>

En la Figura 112 y la Tabla 36, se describe el tercer piso (planta segunda del edificio) que se compone de 694,25 m<sup>2</sup>.



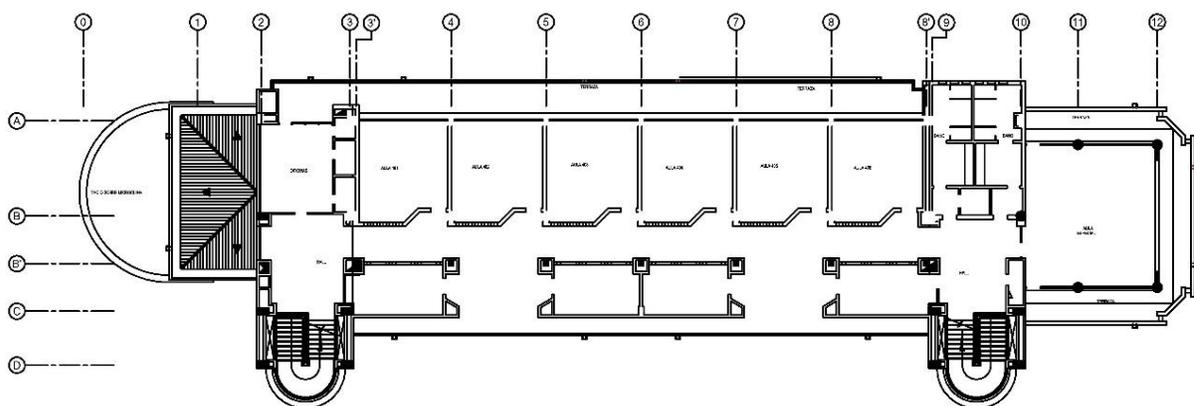
PLANTA TERCER PISO - BLOQUE DE AULAS 4

Figura 112. Tercer piso.

Tabla 36. Superficies piso 3.

Recinto	Superficie (m <sup>2</sup> )
<b>Planta Física</b>	68,68
<b>4301</b>	40,77
<b>4302</b>	40,98
<b>4303</b>	40,99
<b>4304</b>	40,99
<b>4305</b>	41,33
<b>4306</b>	37,45
<b>A4T3</b>	126,88
<b>Baño mujeres p3</b>	27
<b>Baño hombres p3</b>	23,63
<b>Pasillo sur p3</b>	91,65
<b>Pasillo este p3</b>	40,19
<b>Pasillo oeste p3</b>	37,69
<b>Cm. A4t3</b>	7,98
<b>C. T. Planta física 1</b>	2,89
<b>C. T. Planta física 2</b>	3,46
<b>C. T. Planta física 3</b>	1,49
<b>Escalera este p3</b>	0,04
<b>Escalera oeste p3</b>	0,02
<b>Baño auxiliar planta fi</b>	3,11
<b>Vacío p3</b>	13,52
<b>Total</b>	690,74

En la Figura 113 y la Tabla 37, se describe el cuarto piso (planta tercera del edificio) que se compone de 634,49 m<sup>2</sup>.



PLANTA CUARTO PISO - BLOQUE DE AULAS 4

Figura 113. Cuarto piso.

Tabla 37. Superficies piso 4.

Recinto	Superficie (m <sup>2</sup> )
Salón vacío	25,39
4401	34,93
4402	35,09
4403	35,1
4404	35,1
4405	35,39
4406	32,1
4407	15,6
4408	17,07
4409	17,07
4410	16,61
A4T4	75,97
Baño mujeres p4	27,01
Baño hombres p4	23,65
Pasillo sur p4	134,97
Pasillo este p4	39,9
Pasillo oeste p4	38,6
C. T. Salón vacío 1	3,22
C. T. Salón vacío 2	2,22
C. T. Salón vacío 3	0,27
Escalera este p4	0,06
Escalera oeste p4	0,02
Baño salón vacío	3,11
<b>Total</b>	<b>648,45</b>

## 5.4. MATERIALES

En la Tabla 38, se describen los materiales que componen el edificio, registrando sus espesores y en orden descendente, desde la cara más externa a la más interna, con ello se tiene que los cerramientos y particiones se hayan compuestos de la siguiente manera:

Tabla 38. Materiales de construcción de los espacios del Edificio

Espacio	Capas	Espesor (cm)	U (W/m <sup>2</sup> -K)
Fachadas	Ladrillo interior	13	1,636
	Concreto fundido	2	
	Ladrillo interior	13	
	Mortero	0,3	
Oficinas	Ladrillo interior	13	2,605
	Mortero	0,3	
Torreones	Concreto fundido	2	2,490
	Ladrillo interior	13	
	Mortero	0,3	
Balcones	Concreto fundido	2	2,409
	Ladrillo interior	13	
	Cemento	2	
Baños	Ladrillo interior	13	2,579
	Mortero	0,3	
	Cerámica	0,5	
Salones	Ladrillo interior	13	2,605
	Mortero	0,3	
Pasillos	Ladrillo interior	13	2,634

La Tabla 39 muestra las características de las ventanas del edificio, estas son todas del mismo tipo con dimensiones de acuerdo con cada abertura.

Tabla 39. Características acristalamientos edificio.

Características		U (W/M <sup>2</sup> -K)
Acrilamiento	Simple de 3 mm	3,835
Marco	Metálico	
Cemento	0,5	

## 5.5. OCUPACIÓN

Se dimensiona la ocupación de cada recinto de acuerdo con la cantidad de ocupantes por metro cuadrado, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 40.

Tabla 40. Ocupación del Edificio.

Piso	Recinto	Área de suelo (m <sup>2</sup> )	Cant. Personas	Densidad de ocupación (per/m <sup>2</sup> )
Primer piso – planta baja	A4T1A	136,61	35	0,2525
	A4T1B	136,59	35	0,2526
	A4T1	111,16	24	0,2151
	Escalera este p1	10,71	2	0,1681
	Multimedios	12,51	1	0,0480
	Escalera oeste p1	23,52	2	0,0765
	Baño hombres p1	23,63	2	0,0762
	Baño mujeres p1	26,98	2	0,0667
	Pasillo este p1	40,11	2	0,0449
	Pasillo oeste p1	73,49	2	0,0245
	Pasillo sur p1	158,03	3	0,0190
Registro	96,55	6	0,0622	
Segundo piso – planta primera	Aula 4201	45,55	24	0,5269
	Aula 4202	46,94	24	0,5113
	Aula 4203	46,94	24	0,5113
	Aula 4204	46,94	24	0,5113
	Aula 4205	47,08	24	0,5098
	Aula 4206	42,85	24	0,5601
	A4T2	126,88	27	0,2129
	Escalera este p2	12,80	2	0,1406
	Escalera oeste p2	0,03	2	60,0000
	Baño hombres p2	23,63	2	0,0762
	Baño mujeres p2	26,97	2	0,0667
	Pasillo este p2	40,13	2	0,0449
	Pasillo oeste p2	37,61	2	0,0479
	Pasillo sur p2	178,13	3	0,0168
TIC	144,74	23	0,159	
Tercer piso – planta segunda	Aula 4301	40,77	21	0,5223
	Aula 4302	40,98	21	0,5124
	Aula 4303	40,99	21	0,5123
	Aula 4304	40,99	21	0,5123
	Aula 4305	41,33	21	0,5081
	Aula 4306	37,45	21	0,5607
	A4T3	126,88	27	0,2129
	Escalera este p3	0,04	2	45,0000
	Escalera oeste p3	0,02	2	90,0000
	Baño hombres p3	23,63	2	0,0762
	Baño mujeres p3	27,00	2	0,0667

	Pasillo este p3	40,19	2	0,0448
	Pasillo oeste p3	37,69	2	0,0478
	Pasillo sur p3	91,65	3	0,0327
	Planta física	68,68	4	0,0524
	Vacío p3	13,52	0	0,0000
<b>Cuarto piso – planta tercera</b>	Aula 4401	34,93	14	0,4123
	Aula 4402	35,09	14	0,4104
	Aula 4403	35,10	14	0,4103
	Aula 4404	35,10	14	0,4103
	Aula 4405	35,39	14	0,4069
	Aula 4406	32,10	14	0,4486
	Aula 4407	15,60	6	0,3846
	Aula 4408	17,07	6	0,3515
	Aula 4409	17,07	6	0,3515
	Aula 4410	16,61	6	0,3612
	A4T4	75,97	8	0,1028
	Escalera este p4	0,06	2	30,0000
	Escalera oeste p4	0,02	2	90,0000
	Baño hombres p4	23,65	2	0,0761
	Baño mujeres p4	27,01	2	0,0666
	Pasillo este p4	39,90	2	0,0451
	Pasillo oeste p4	38,60	2	0,0466
	Pasillo sur p4	134,97	3	0,0222
Salón vacío	25,39	0	0,0000	

## 5.6. CONDICIONES DE DISEÑO EXTERIORES E INTERIORES

Para realizar el estudio energético, se tuvo en cuenta las condiciones climáticas de diseño interior y exterior del edificio de acuerdo a su ubicación geográfica, dicha información es arrojada por el software con respecto a los datos climáticos cargado por el programa de simulación dinámica Design Builder y su motor de cálculo Energy Plus, como lo presenta la Figura 114.

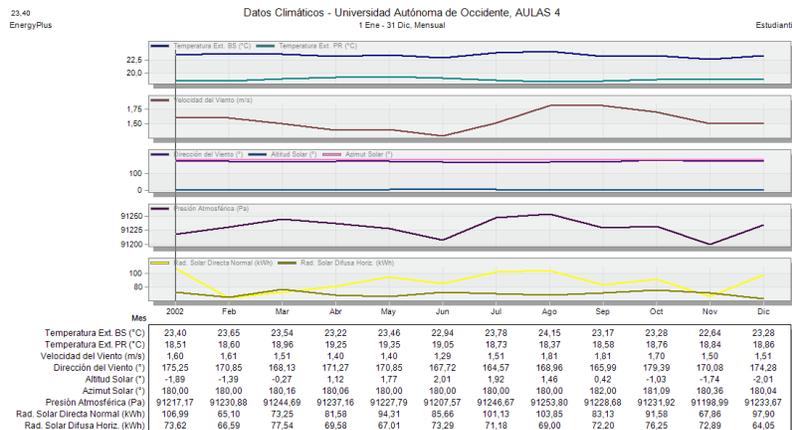


Figura 114. Condiciones de diseño exteriores anuales.

Las figuras 115 y 116, presentan los parámetros de control del confort para el edificio, en los cuales se tuvo en cuenta la humedad relativa y la temperatura del aire interior, a través del programa de simulación Design Builder.

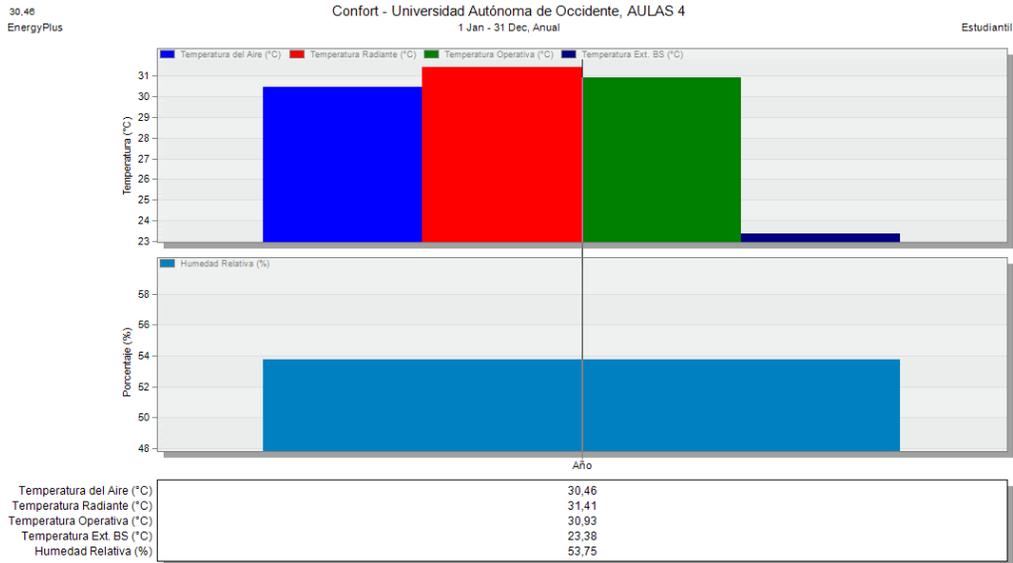


Figura 115. Condiciones de diseño interiores.

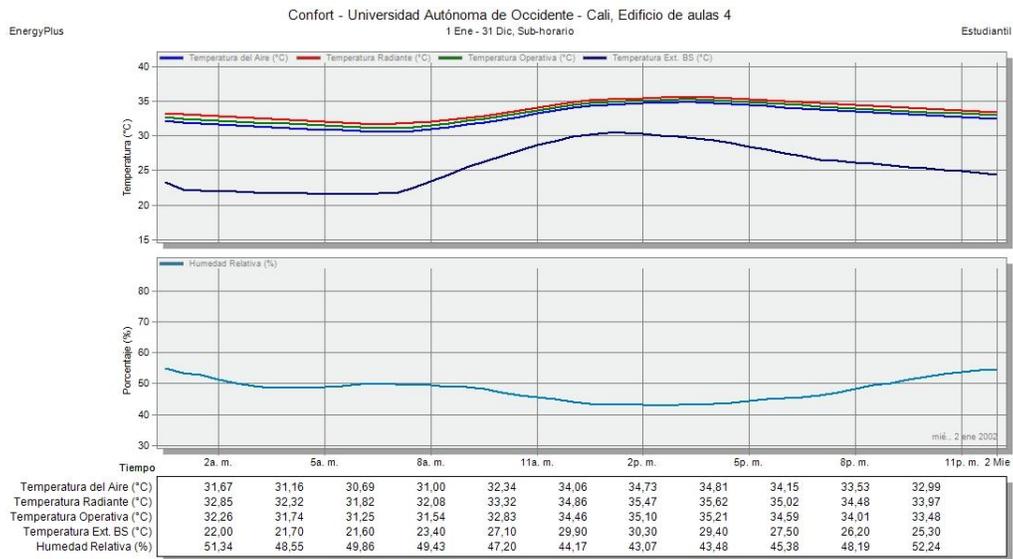


Figura 116. Condiciones de diseño exteriores sub-horario.

## 5.7. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES

El edificio de aulas 4 es uno de los 4 Aularios que dispone la Universidad Autónoma de Occidente, El edificio es usado para impartir clases de pregrado y postgrado, actividades académicas de estudiantes de doctorado y alberga las oficinas administrativas de Egresados en el primer piso, TICS en el segundo, y planta física en el tercer piso. El edificio de aulas cuenta con torreones, aulas de clase y oficinas administrativas.

El edificio se encuentra equipado con los equipos de uso final detallado en la Tabla 41. El sistema de iluminación está compuesto en su mayoría por tecnología LED, los equipos ofimáticos compuesto principalmente por computadores, poseen sello de consumo Energy Star que garantizan el uso eficiente de la energía eléctrica y protección del medio ambiente.

El sistema de iluminación de zonas comunes del edificio se encuentra automatizado, el horario de encendido es de 5:30 pm a 10:00 pm para los pasillos internos y de 6:00 pm a 10:00 pm para la iluminación exterior del edificio. Los baños poseen sensores de presencia que activan el encendido de la iluminación.

El sistema de refrigeración del edificio está compuesto por 19 sistemas de aire acondicionado distribuidos en torreones, oficinas y aulas de postgrado (piso 4). Los sistemas son configurados (Setpoints) según el espacio, para las oficinas y torreones la temperatura se configura establecida varía entre 22 y 23°C, para las aulas de clase el valor se personaliza según el requerimiento de sus ocupantes, estos valores varían de 21°C a 25°C.

Tabla 41. Equipos de uso final del Edificio

Iluminación			
Referencia	Cantidad	Potencia [W]	Recintos
Bala LED luz cálida – Philips	8	28	Egresados
Bala LED luz blanca – Philips	12	28	Egresados
Panel Cuadrado LED – Sylvana	160	45	Egresados, TIC, Planta física, Salones de Clase, pasillos
Bombilla Ahorradora	104	15	Torreones
Tubo Fluorescente	20	32	Torreones
Bala LED luz cálida - Pequeña	72	12	Salones de clase piso 4
Cinta LED	20	5	Salones de clase piso 4
Tubos LED	68	17	Salones de clase piso 4
Equipos Ofimáticos			
Referencia	Cantidad	Potencia [W]	Recintos
Computador DELL Optiplex 7450 AIO	79	65	Egresados, TIC, Planta física, Salones de Clase, torreones
Scannerjet Interprise 7500	1	50	TIC

Impresora LaserJet P2015dn	2	350	Egresados, Planta física
Impresora Laserjet 600 M603	1	950	TIC
Pantalla interactiva SMART board 6000 pro	10	130	Salones de clase piso 4
Parlantes Behringer MS 16	19	16	Salones de clase, torreones
Parlantes BOSE	10	40	Salones de clase piso 4
Televisor Samsung 55"	5	220	Egresados, TIC, Planta física
Videobeam EPSON Power lite 2250u	18	429	Torreones, salones de clase
<b>Equipos de Aire Acondicionado</b>			
<b>Referencia</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Potencia [W]</b>	<b>Recintos</b>
YORK - YNVFYC060BAQDB-X	1	6950	Egresados
Carrier - 4ORR014	2	1079	T1A – T1B
Carrier - 4ORR012	1	1034	T1C
Carrier - 4ORR008	2	900	T2 – T3
Carrier - 38CK060540	2	2240	TIC – Planta Física
Carrier – E50DJ008	1	5970	T4
Blue line – MUB36CR	6	3300	4401 al 4406
Blue line – MUB24CR	4	2560	4407 al 4410

La energía eléctrica consumida por el edificio proviene de la Red y de energía renovable puesto que, en el techo del edificio se encuentra instalado un sistema solar fotovoltaico compuesto por 144 paneles marca Jinko Solar de 265Wp cada uno, 2 inversores Fronius Symo 17.5 – 3M, para un total de 38,2 kWp instalados. La Figura 117, presenta el plano del SSFV instalado en el techo del edificio.

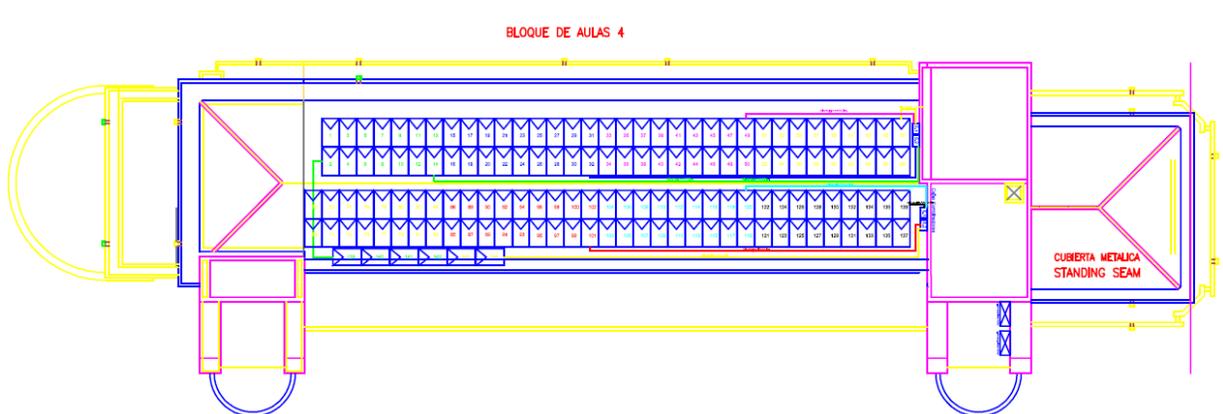


Figura 117. SSFV instalado en el Edificio de aulas 4

### 5.7.1. Consumo de Energía Eléctrica del Edificio

El edificio posee un medidor de energía eléctrica (Figura 118) que registra su consumo cada 15 minutos, se recopilaron los históricos de consumos del edificio con ayuda del software “Power Monitoring Expert” de la marca “Schneider Electric” de los años 2016, 2017 y 2018.

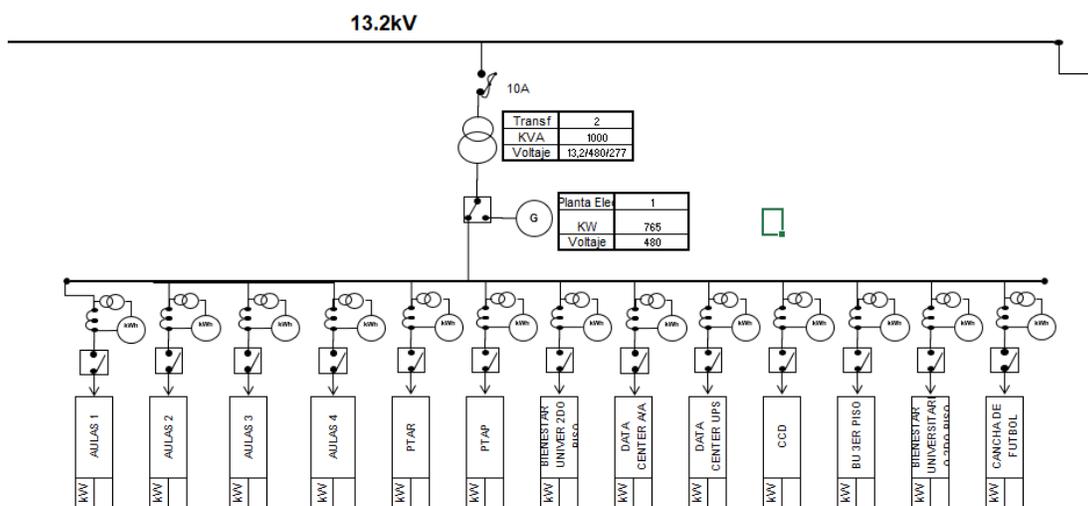


Figura 118. Diagrama Unifilar de subestación 2 con ubicación del medidor del aula 4

La Tabla 42 y las figuras 119 y 120, enseñan el histórico de consumo de energía eléctrica recopilado del edificio de aulas 4.

Tabla 42. Histórico de consumos de Energía Eléctrica

Mes	Consumo Eléctrico kWh			
	2016	2017	2018	2019
Enero	7.511	8.621	11.968	8.157
Febrero	19.493	19.672	18.612	18.339
Marzo	16.221	20.782	17.855	19.271
Abril	18.945	17.120	18.971	15.445
Mayo	17.404	20.919	18.237	18.876
Junio	4.998	10.869	10.451	12.135
Julio	8.360	11.163	13.730	20.271
Agosto	19.853	18.805	19.142	24.242
Septiembre	18.574	18.620	18.290	22.723
Octubre	16.817	17.007	17.515	21.390
Noviembre	12.879	14.861	14.198	17.109
Diciembre	5.053	8.023	9.414	10.418
Consumo Año	166.108	186.462	188.383	208.376

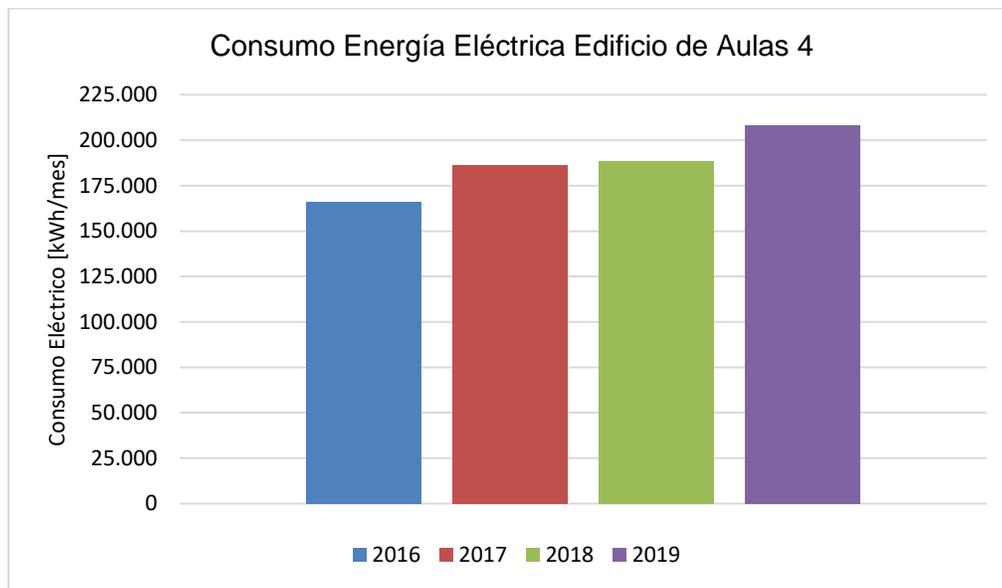


Figura 119. Consumo de Energía Eléctrico anual

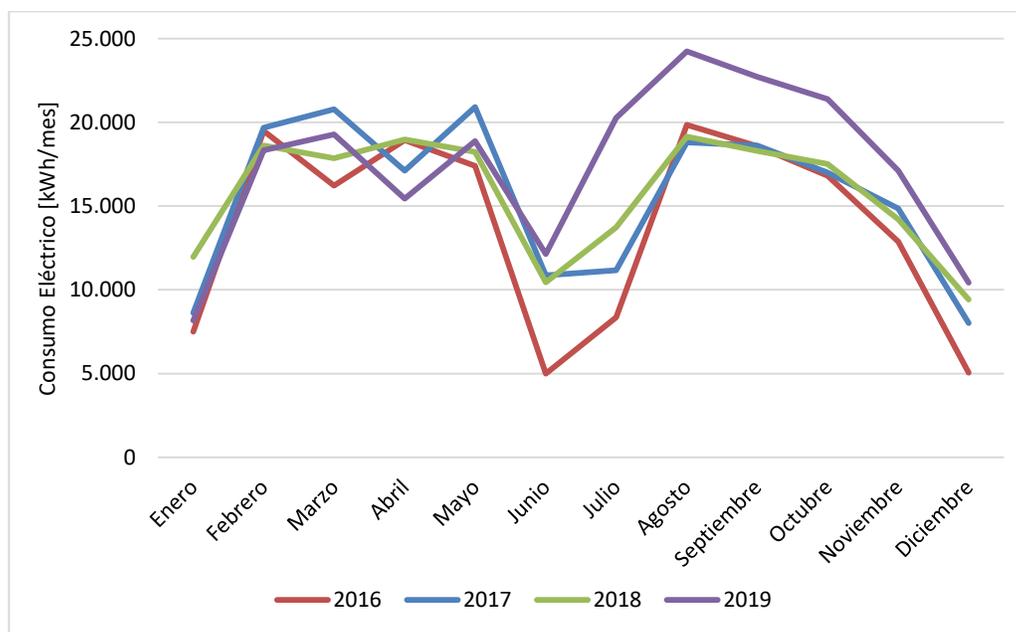


Figura 120. Histórico de consumo de energía eléctrica mensual 2016 – 2019

Analizando el histórico de consumo de energía eléctrica del edificio, se evidencia que el consumo de energía eléctrica en el edificio ha aumentado. El aumento responde a los cambios operativos en el uso de los recintos (uso libre de los torreones desde el 2017) y a cambios constructivos y de mejora adelantados en el mismo (remodelación de aulas de posgrado, de oficinas de egresados y planta física, cambio y adición de equipos de climatización, ascensores, etc.). En el histórico de consumo mensual, se aprecia que el año 2017 tuvo 2 periodos de incremento en el consumo de energía en los meses de marzo y mayo. Los periodos que habitualmente era considerados de bajo consumo, por ser periodo de vacaciones académicas (Junio – Julio y Diciembre – Enero), presentaron incrementos en

el consumo en 2017 y 2018, dado que en estos periodos se realizaron actividades de remodelación de los espacios del edificio aprovechando su baja o nula ocupación al corresponder a periodos de vacaciones. En el 2019 son normalizadas las actividades del edificio (junio), y con ello se evidencia un aumento en el consumo de energía eléctrica del 10,6% con respecto al año anterior, debido a la ocupación normal del edificio y a la remodelación y climatización de todos sus espacios.

## 5.8. SISTEMAS Y EQUIPOS DEL EDIFICIO

### 5.8.1. Sistema de Aire Acondicionado

Los sistemas de aire acondicionado del edificio están compuestos por mini Split con sistema de enfriamiento independiente ubicados en la cubierta del edificio con tuberías de conducción de aire directo a las fan coil al interior de cada recinto aclimatado. La Tabla 43 presenta la capacidad de refrigeración instalada en el edificio.

Tabla 43. Potencia de refrigeración kW unidades split

PISO	RECINTO	CAPACIDAD DE REFRIGERACIÓN (kW)
Primer piso – planta baja	A4T1A	46,77
	A4T1B	46,77
	A4T1	30,6
	Escalera este P1	N.A.
	Escalera oeste P1	N.A.
	Baño hombres P1	N.A.
	Baño mujeres P1	N.A.
	Pasillo este P1	N.A.
	Pasillo oeste P1	N.A.
	Pasillo sur P1	N.A.
	Registro académico	N.A.
Segundo piso – planta primera	Aula 4201	N.A.
	Aula 4202	N.A.
	Aula 4203	N.A.
	Aula 4204	N.A.
	Aula 4205	N.A.
	Aula 4206	N.A.
	A4T2	28,13
	Escalera este P2	N.A.
	Escalera oeste P2	N.A.
	Baño hombres P2	N.A.
	Baño mujeres P2	N.A.
	Pasillo este P2	N.A.
	Pasillo oeste P2	N.A.
	Pasillo sur P2	N.A.
	TIC	17,58
	Aula 4301	N. A

<b>Tercer piso – planta segunda</b>	Aula 4302	N.A.
	Aula 4303	N.A.
	Aula 4304	N.A.
	Aula 4305	N.A.
	Aula 4306	N.A.
	A4T3	28,13
	Escalera este P3	N.A.
	Escalera oeste P3	N.A.
	Baño hombres P3	N.A.
	Baño mujeres P3	N.A.
	Pasillo este P3	N.A.
	Pasillo oeste P3	N.A.
	Pasillo sur P3	N.A.
	Planta física	17,58
	Vacío P3	N.A.
<b>Cuarto piso – planta tercera</b>	Aula 4401	10,55
	Aula 4402	10,55
	Aula 4403	10,55
	Aula 4404	10,55
	Aula 4405	10,55
	Aula 4406	10,55
	Aula 4407	7,03
	Aula 4408	7,03
	Aula 4409	7,03
	Aula 4410	7,03
	A4T4	24,62
	Escalera este P4	N.A.
	Escalera oeste P4	N.A.
	Baño hombres P4	N.A.
	Baño mujeres P4	N.A.
	Pasillo este P4	N.A.
	Pasillo oeste P4	N.A.
	Pasillo sur P4	N.A.
	Salón vacío	N.A.

### 5.8.2. Sistemas de Iluminación

La iluminación de los recintos del edificio está instalada de forma superficial y compuesta principalmente por tecnología LED y fluorescente, los recintos poseen diferentes luminarias instaladas (potencia y cantidad) según el requerimiento del espacio, como lo muestra la Tabla 44.

Tabla 44. Sistemas de Iluminación del Edificio.

Piso	Recinto	Área de suelo (m <sup>2</sup> )	Potencia total (w)	Densidad normalizada (w/m <sup>2</sup> )
<b>Primer piso – planta baja</b>	A4T1A	136,61	625	4,575
	A4T1B	136,59	670	4,905
	A4T1	111,16	401	3,607

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y ESTUDIO ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE AULAS 4 DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE

	Escalera este P1	10,71	N.A.	N.A.
	Cuarto multimedios	12,51	64	5,116
	Escalera oeste P1	23,52	N.A.	N.A.
	Baño hombres P1	23,63	244	10,326
	Baño mujeres P1	26,98	244	9,044
	Pasillo este P1	40,11	612	15,258
	Pasillo oeste P1	73,49	612	8,328
	Pasillo sur P1	158,03	612	3,873
	Registro académico	96,55	550	5,697
<b>Segundo piso – planta primera</b>	Aula 4201	45,55	270	5,928
	Aula 4202	46,94	270	5,752
	Aula 4203	46,94	270	5,752
	Aula 4204	46,94	270	5,752
	Aula 4205	47,08	270	5,735
	Aula 4206	42,85	270	6,301
	A4T2	126,88	394	3,105
	Escalera este P2	12,80	N.A.	N.A.
	Escalera oeste P2	0,03	N.A.	N.A.
	Baño hombres P2	23,63	224	9,479
	Baño mujeres P2	26,97	224	8,306
	Pasillo este P2	40,13	612	15,250
	Pasillo oeste P2	37,61	612	16,272
	Pasillo sur P2	178,13	612	3,436
TIC	144,74	1687	13,618	
<b>Tercer piso – planta segunda</b>	4301	40,77	225	5,519
	4302	40,98	225	5,490
	4303	40,99	225	5,489
	4304	40,99	225	5,489
	4305	41,33	225	5,444
	4306	37,45	225	6,008
	A4T3	126,88	401	3,160
	Escalera este P3	0,04	N.A.	N.A.
	Escalera oeste P3	0,02	N.A.	N.A.
	Baño hombres P3	23,63	224	9,479
	Baño mujeres P3	27,00	224	8,296
	Pasillo este P3	40,19	612	15,228
	Pasillo oeste P3	37,69	612	16,238
	Pasillo sur P3	91,65	612	6,678
Planta física	68,68	360	5,242	
Vacío P3	13,52	N.A.	N.A.	
<b>Cuarto piso – planta tercera</b>	Aula 4401	34,93	180	5,153
	Aula 4402	35,09	180	5,130
	Aula 4403	35,10	180	5,128
	Aula 4404	35,10	180	5,128
	Aula 4405	35,39	180	5,086
	Aula 4406	32,10	180	5,607

	Aula 4407	15,60	90	5,769
	Aula 4408	17,07	180	10,545
	Aula 4409	17,07	180	10,545
	Aula 4410	16,61	180	10,837
	A4T4	75,97	158	2,080
	Escalera este P4	0,06	N.A.	N.A.
	Escalera oeste P4	0,02	N.A.	N.A.
	Baño hombres P4	23,65	224	8,293
	Baño mujeres P4	27,01	224	5,614
	Pasillo este P4	39,90	680	17,617
	Pasillo oeste P4	38,60	680	5,038
	Pasillo sur P4	134,97	680	26,782
	Salón vacío	25,39	N.A.	N.A.

### 5.8.3. Equipos Ofimáticos

Para el inventario de equipos se han tenido en cuenta los aparatos de computación y equipos de oficina para cada recinto, obteniendo así los datos que se muestran en la Tabla 45.

Tabla 45. Equipos de uso ofimático del Edificio.

Piso	Recinto	Área de suelo (m <sup>2</sup> )	Potencia total (w)	Densidad potencia equipos (w/m <sup>2</sup> )	Climatizado
Primer piso – planta baja	A4T1A	136,61	800	5,856	Si
	A4T1B	136,59	800	5,857	Si
	A4T1	111,16	800	7,197	Si
	Escalera este P1	10,71	0	0,000	No
	Cuarto multimedia	12,51	591	47,242	No
	Escalera oeste P1	23,52	0	0,000	No
	Baño hombres P1	23,63	0	0,000	No
	Baño mujeres P1	26,98	0	0,000	No
	Pasillo este P1	40,11	0	0,000	No
	Pasillo oeste P1	73,49	0	0,000	No
	Pasillo sur P1	158,03	0	0,000	No
	Registro académico	96,55	3350	34,697	Si
Segundo piso – planta primera	Aula 4201	45,55	800	17,563	No
	Aula 4202	46,94	800	17,043	No
	Aula 4203	46,94	800	17,043	No
	Aula 4204	46,94	800	17,043	No
	Aula 4205	47,08	800	16,992	No
	Aula 4206	42,85	800	18,670	No
	A4T2	126,88	800	6,305	Si
	Escalera este P2	12,8	0	0,000	No
	Escalera oeste P2	0,03	0	0,000	No

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y ESTUDIO ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE AULAS 4 DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE

	Baño hombres P2	23,63	0	0,000	No
	Baño mujeres P2	26,97	0	0,000	No
	Pasillo este P2	40,13	0	0,000	No
	Pasillo oeste P2	37,61	0	0,000	No
	Pasillo sur P2	178,13	0	0,000	No
	TIC	144,74	10118	81,676	Si
<b>Tercer piso – planta segunda</b>	Aula 4301	40,77	800	19,622	No
	Aula 4302	40,98	800	19,522	No
	Aula 4303	40,99	800	19,517	No
	Aula 4304	40,99	800	19,517	No
	Aula 4305	41,33	800	19,356	No
	Aula 4306	37,45	800	21,362	No
	A4T3	126,88	800	6,305	Si
	Escalera este P3	0,04	0	0,000	No
	Escalera oeste P3	0,02	0	0,000	No
	Baño hombres P3	23,63	0	0,000	No
	Baño mujeres P3	27	0	0,000	No
	Pasillo este P3	40,19	0	0,000	No
	Pasillo oeste P3	37,69	0	0,000	No
	Pasillo sur P3	91,65	0	0,000	No
	Planta física	68,68	4390	63,920	Si
	Vacío P3	13,52	0	0,000	No
<b>Cuarto piso – planta tercera</b>	Aula 4401	34,93	800	22,903	Si
	Aula 4402	35,09	800	22,796	Si
	Aula 4403	35,1	800	22,790	Si
	Aula 4404	35,1	800	22,794	Si
	Aula 4405	35,39	800	22,609	Si
	Aula 4406	32,1	800	24,928	Si
	Aula 4407	15,6	800	51,283	Si
	Aula 4408	17,07	800	46,871	Si
	Aula 4409	17,07	800	46,866	Si
	Aula 4410	16,61	800	48,165	Si
	A4T4	75,97	395	5,201	Si
	Escalera este P4	0,06	0	0,000	No
	Escalera oeste P4	0,02	0	0,000	No
	Baño hombres P4	23,65	0	0,000	No
	Baño mujeres P4	27,01	0	0,000	No
	Pasillo este P4	39,9	0	0,000	No
	Pasillo oeste P4	38,6	0	0,000	No
	Pasillo sur P4	134,97	0	0,000	No
Salón vacío	25,39	0	0,000	No	

#### 5.8.4. Régimen de Ocupación y Usos

Una vez conocidos los elementos y equipos de uso final que generan demanda energética en el edificio, es necesario establecer horarios para las distintas actividades que se realizan en el edificio con el fin de lograr una mayor aproximación y calibración del diseño realizado en el software de simulación dinámica Energy Plus. Las actividades administrativas son llevadas a cabo de lunes a viernes de 7:00 am a 5:00 pm, y las académicas de lunes a viernes de 6:30 am a 9:30 pm y los sábados de 7:30 am a 5:00 pm.

### 5.9. COSTE ECONÓMICO DEL CONSUMO ENERGÉTICO E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

Para obtener el coste económico que genera el consumo de energía eléctrica en el edificio de Aulas 4, se usará la tarifa económica que se tiene pactada con la empresa comercializadora de energía eléctrica CELSIA, donde se factura con una tarifa de \$ 322,3 COP/kWh de energía FV consumida y de \$ 358 COP/kWh de energía de la RED. Las tarifas son fijas a lo largo del año y fueron establecidas desde el año 2017 que entró en funcionamiento el SSFV del edificio. Para calcular el impacto medioambiental del consumo de energía eléctrica de la Red, se empleará el factor de CO<sub>2</sub> para Colombia de 0.0818 [Kg CO<sub>2</sub>/kWh]. La Tabla 46 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, muestra los costes económicos y el impacto medioambiental del consumo de energía eléctrica en el edificio en los últimos 3 años (2017, 2018, 2019).

Tabla 46. Costes Económicos e Impacto medioambiental Edificio de Aulas 4

Año	Mes / Consumo	Consumo de Energía (kWh/mes)	Costo energía consumida de la RED (COP)	Consumo Energía Generada por el SSFV (kWh/mes)	Costo energía consumida generada por el SSFV (COP)	Costo Total (COP)	Impacto Ambiental (Kg CO <sub>2</sub> )
2017	Enero	8.621	3.086.318	0	0	3.086.318	705,2
	Febrero	19.672	7.042.576	0	0	7.042.576	1.609,2
	Marzo	20.782	7.439.956	0	0	7.439.956	1.700,0
	Abril	17.120	6.128.960	0	0	6.128.960	1.400,4
	Mayo	18.666	6.682.428	2.253	726.142	7.408.570	1.526,9
	Junio	6.475	2.318.050	4.394	1.416.186	3.734.236	529,7
	Julio	6.218	2.226.044	4.945	1.593.774	3.819.818	508,6
	Agosto	13.872	4.966.176	4.933	1.589.906	6.556.082	1.134,7
	Septiembre	13.622	4.876.676	4.998	1.610.855	6.487.531	1.114,3
	Octubre	12.636	4.523.688	4.371	1.408.773	5.932.461	1.033,6
	Noviembre	10.400	3.723.200	4.461	1.437.780	5.160.980	850,7
	Diciembre	3.546	1.269.468	4.477	1.442.937	2.712.405	290,1
<b>Total Año</b>		<b>151.630</b>	<b>54.283.540</b>	<b>34.832</b>	<b>11.226.354</b>	<b>65.509.894</b>	<b>12.403</b>

2018	Enero	7.513	2.689.677	4.455	1.435.847	4.125.523	614,6
	Febrero	14.092	5.044.807	4.520	1.456.796	6.501.603	1.152,7
	Marzo	12.991	4.650.840	4.864	1.567.667	6.218.507	1.062,7
	Abril	14.559	5.212.207	4.413	1.422.310	6.634.517	1.190,9
	Mayo	13.861	4.962.143	4.376	1.410.385	6.372.528	1.133,8
	Junio	6.119	2.190.551	4.332	1.396.204	3.586.755	500,5
	Julio	9.149	3.275.305	4.582	1.476.779	4.752.083	748,4
	Agosto	14.143	5.063.108	4.999	1.611.178	6.674.286	1.156,9
	Septiembre	13.619	4.875.514	4.671	1.505.463	6.380.977	1.114,0
	Octubre	12.870	4.607.460	4.645	1.497.084	6.104.544	1.052,8
	Noviembre	10.208	3.654.285	3.990	1.285.977	4.940.262	835,0
	Diciembre	4.593	1.644.151	4.821	1.553.808	3.197.959	375,7
<b>Total Año</b>	<b>133.715</b>	<b>47.870.048</b>	<b>54.668</b>	<b>17.619.496</b>	<b>65.489.544</b>	<b>10.938</b>	
2019	Enero	3.828	1.370.459	4.329	1.395.330	2.765.789	313,1
	Febrero	14.162	5.069.909	4.177	1.346.196	6.416.105	1.158,4
	Marzo	15.825	5.665.265	3.446	1.110.675	6.775.940	1.294,5
	Abril	12.317	4.409.544	3.128	1.008.190	5.417.733	1.007,5
	Mayo	14.751	5.280.716	4.125	1.329.517	6.610.232	1.206,6
	Junio	7.974	2.854.809	4.160	1.340.829	4.195.639	652,3
	Julio	15.415	5.518.624	4.856	1.564.976	7.083.600	1.261,0
	Agosto	19.352	6.928.045	4.890	1.576.108	8.504.153	1.583,0
	Septiembre	18.121	6.487.212	4.603	1.483.447	7.970.659	1.482,3
	Octubre	16.500	5.907.138	4.890	1.576.050	7.483.188	1.349,7
	Noviembre	13.038	4.667.740	4.071	1.312.022	5.979.762	1.066,5
	Diciembre	6.272	2.245.257	4.146	1.336.285	3.581.542	513,0
<b>Total Año</b>	<b>157.555</b>	<b>56.404.718</b>	<b>50.821</b>	<b>16.379.624</b>	<b>72.784.342</b>	<b>12.888</b>	

## 5.10. REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA DEL EDIFICIO EN DESIGNBUILDER

En las figuras 121 – 139, se muestra la representación geográfica, los pisos o plantas construidas y las diferentes vistas del edificio simulado en Design Builder.

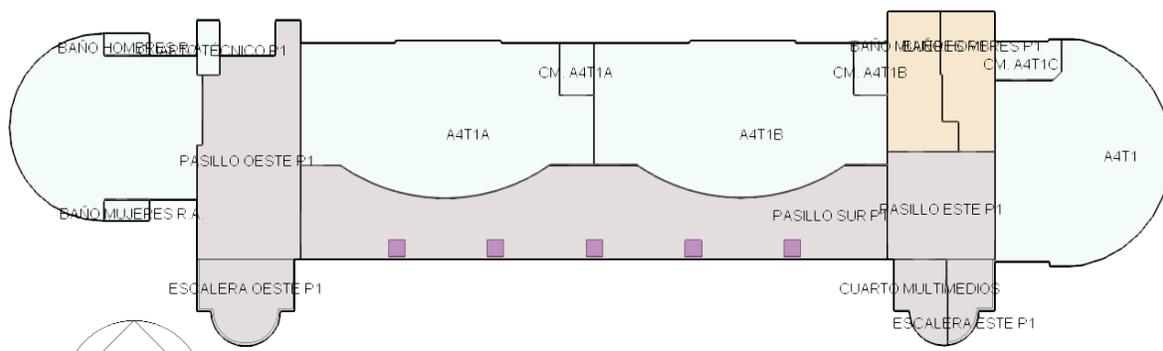


Figura 121. Plantilla de diseño piso 1.

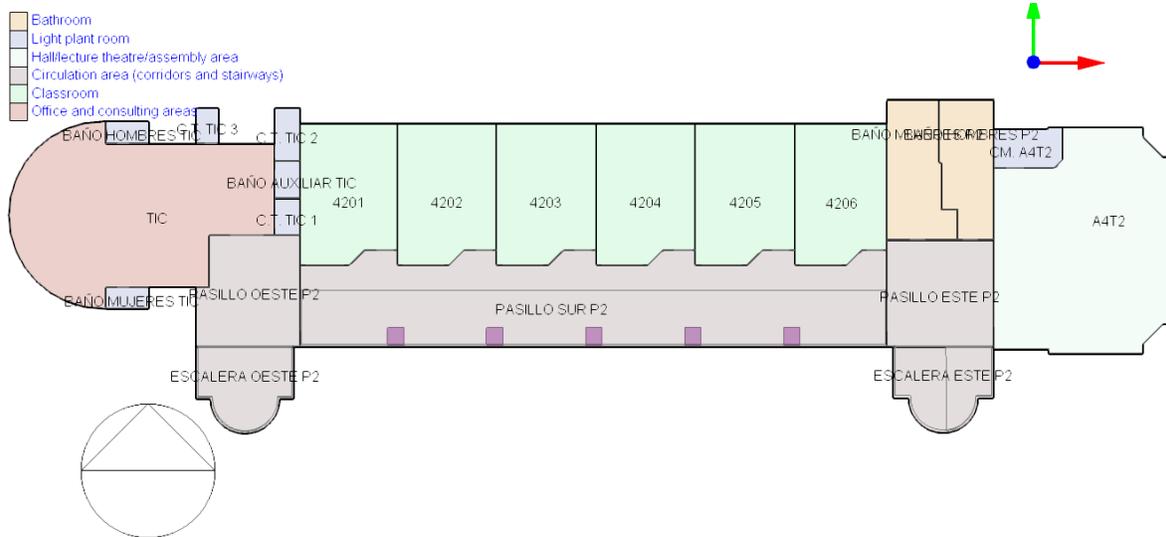


Figura 122. Plantilla de diseño piso 2.

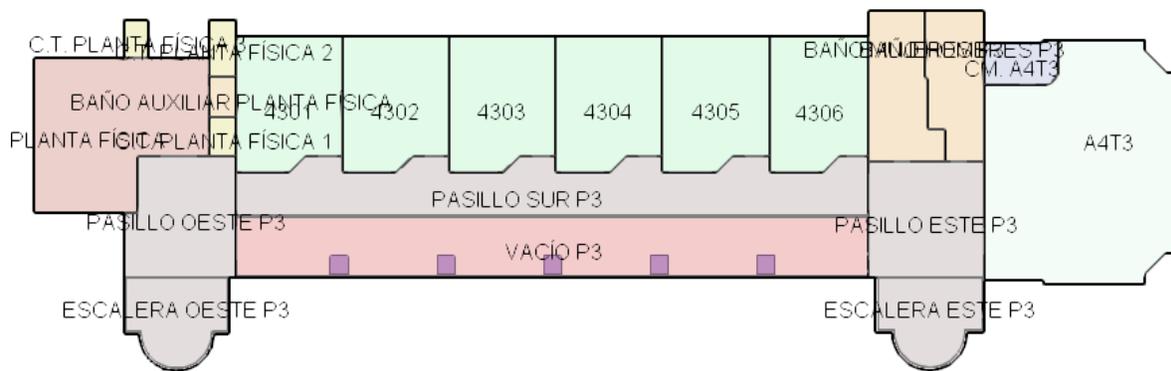


Figura 123. Plantilla de diseño piso 3.

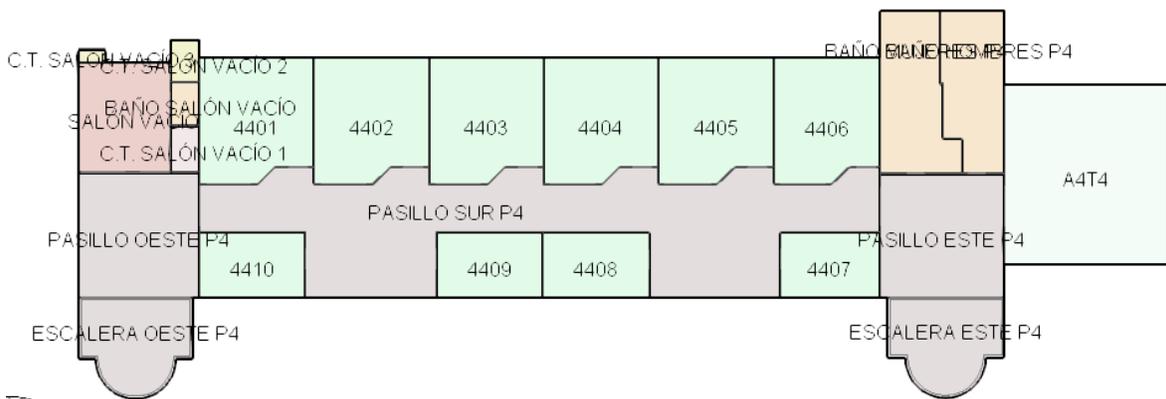


Figura 124. Plantilla de diseño piso 4.

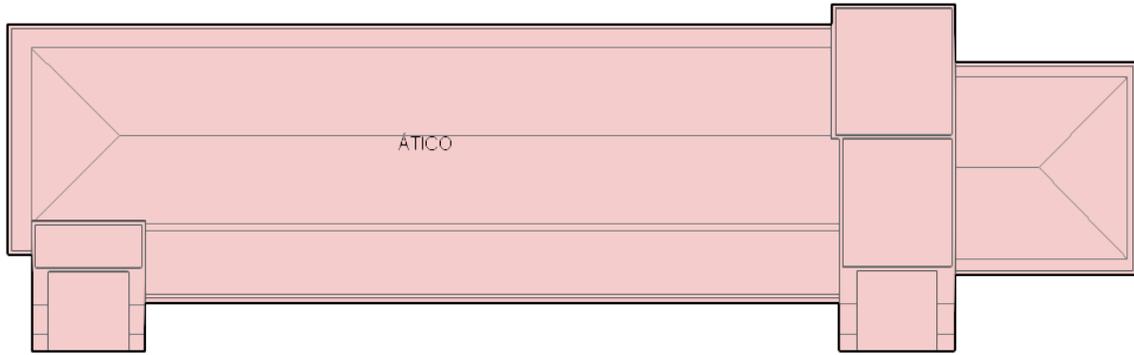


Figura 125. Plantilla de diseño techo.

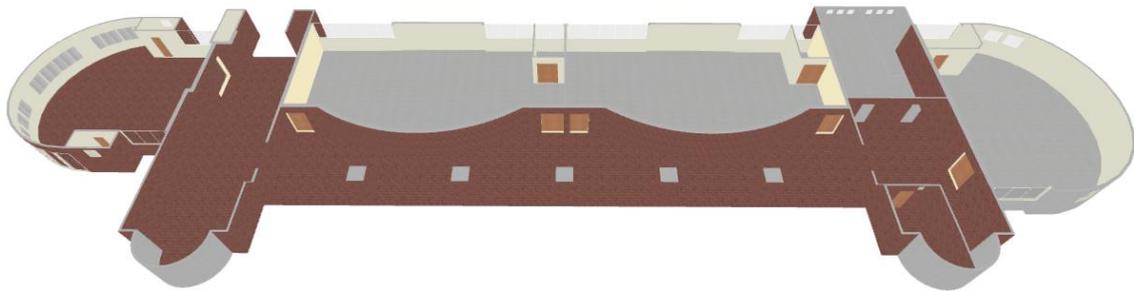


Figura 126. Piso 1.

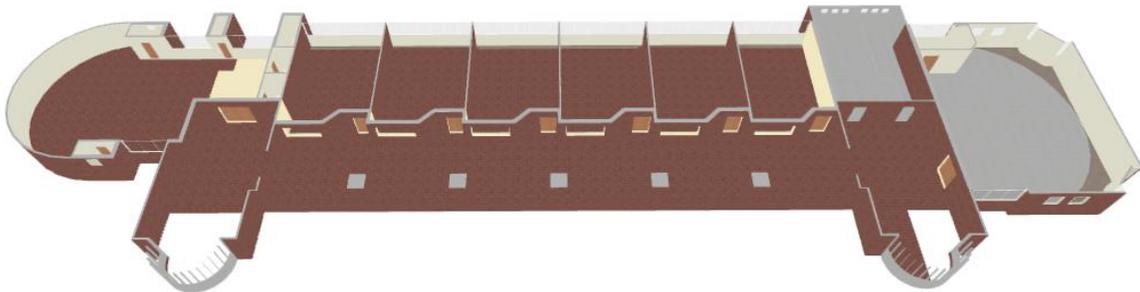


Figura 127. Piso 2.

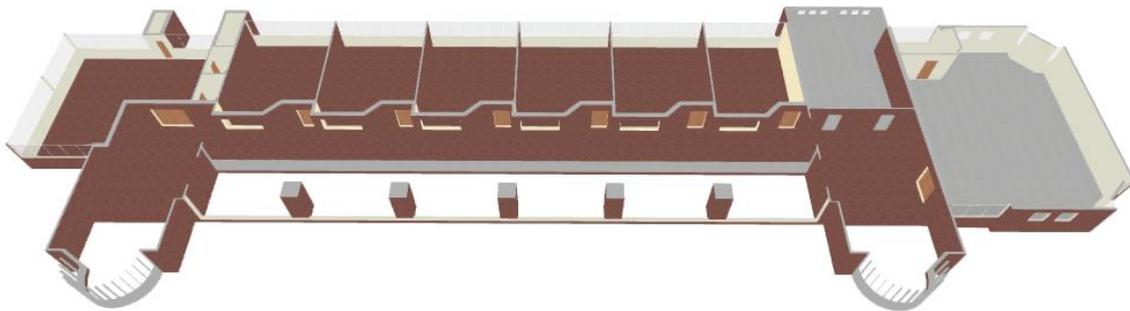


Figura 128. Piso 3.

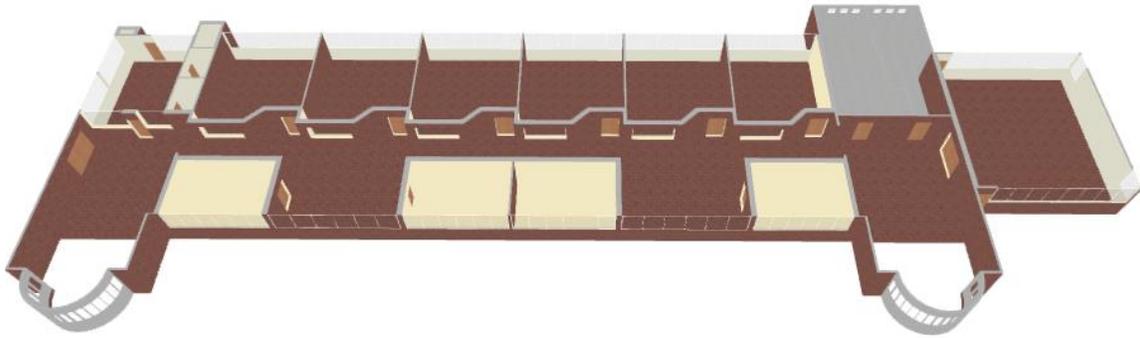


Figura 129. Piso 4.

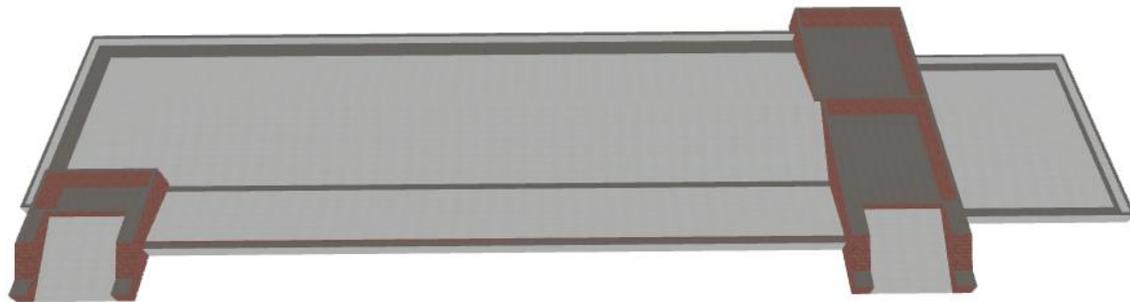


Figura 130. Techo.



Figura 131. Vista norte del edificio.



Figura 132. Vista sur del edificio.



Figura 133. Vista oeste del edificio.



Figura 134. Vista este del edificio.

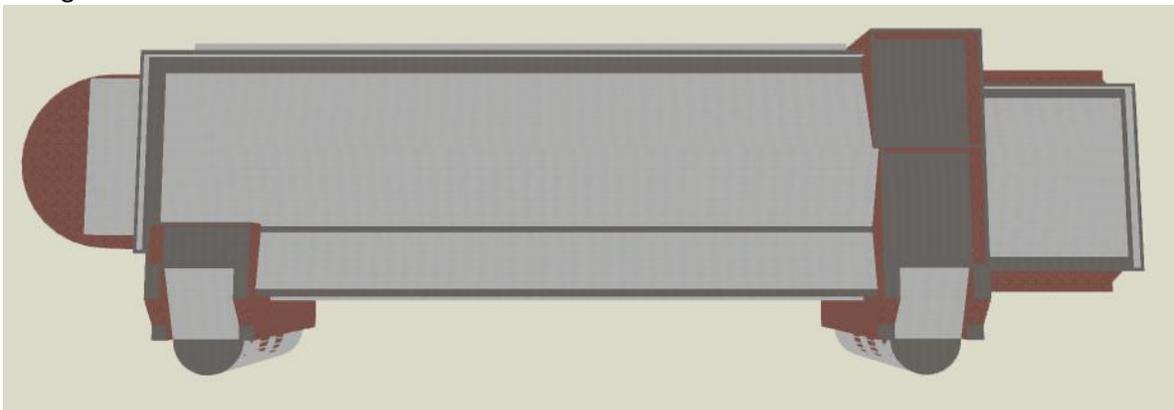


Figura 135. Vista de planta del edificio.



Figura 136. Vista suroeste del edificio.



Figura 137. Vista noreste del edificio.

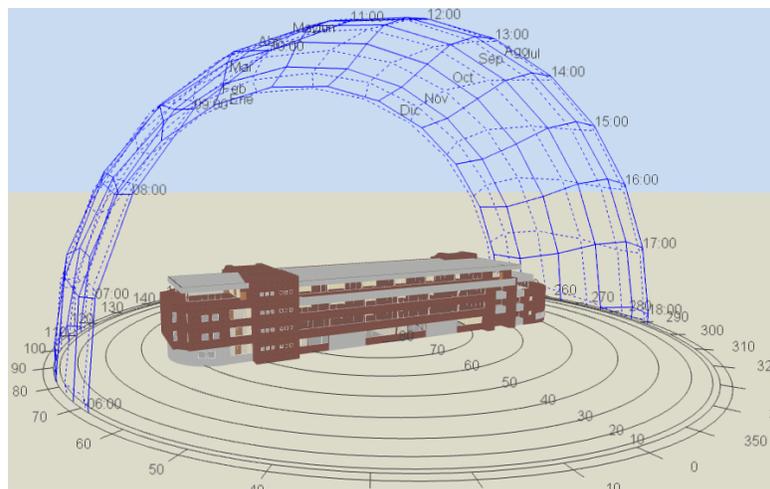


Figura 138. Vista suroeste del edificio con diagrama solar.

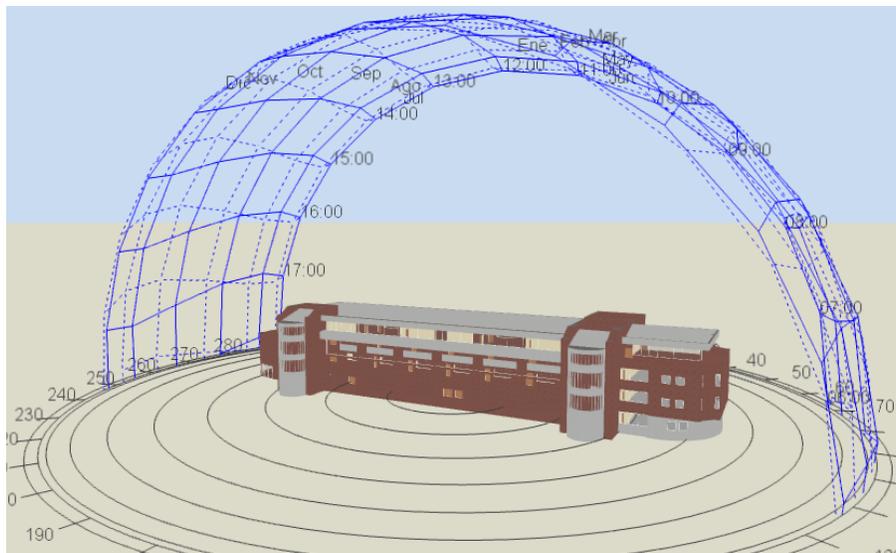


Figura 139. Vista noroeste del edificio con diagrama solar.

## 5.11. COMPARACIÓN DE LOS CONSUMOS ENERGÉTICOS MEDIDOS Y SIMULADOS

La demanda de energética del edificio se satisface mediante energía eléctrica final, una parte generada con el sistema renovable PV y otra suministrada a través de la red eléctrica. El consumo energético del edificio es únicamente de energía eléctrica, a continuación, se presenta el histórico de consumos del edificio de los años 2016, 2017 y 2018, datos obtenidos a través de la plataforma virtual de los medidores marca SCHNEIDER, instalados en el edificio que permiten una monitorización continua. La Tabla 47 presenta los datos obtenidos al calibrar el modelo simulado en Energy Plus del Edificio.

Tabla 47. Valores de consumo eléctrico reales y simulados

Mes	Consumo real año 2017	Consumo simulado año tipo	Error
Enero	8621	8120	5.81%
Febrero	19672	20661	5.03%
Marzo	20782	23918	15.09%
Abril	17120	17903	4.57%
Mayo	20919	18995	9.20%
Junio	10869	10040	7.63%
Julio	11163	9565	14.32%
Agosto	18805	20482	8.92%
Septiembre	18620	18943	1.74%
Octubre	17007	18807	10.59%
Noviembre	14861	13418	9.71%
Diciembre	8023	7086	11.67%
<b>Total</b>	<b>186462</b>	<b>187938</b>	<b>0.79%</b>

### 5.11.1. Consumo Total de Energía

Una vez introducidos los datos de materiales constructivos, geometría, orientación, actividades y sistemas de climatización. Se realizó la simulación energética donde se obtiene el consumo total de energía final anual del edificio. El dato obtenido por simulación fue de 187.938 kWh, mientras que el consumo real para el año 2017 (registrado por los medidores) fue de 186.462 kWh, la diferencia es de 0.79%, por encima valor aceptable a pesar de que en algunos meses el error se acepta entre 10 y 15%, el valor de diferencia es bastante aceptable, ya que el edificio ha sido simulado para el caso de mayor carga térmica y eléctrica y es por esto que el valor se encuentra por encima del real, ya que para este edificio el sistema operó durante un tiempo a cargas parciales.

Tabla 48. Energía total consumida.

Energía total [kwh]	Energía total por área construida [kwh/m <sup>2</sup> ]	Energía total por área climatizada construida [kwh/m <sup>2</sup> ]
<b>187.938</b>	68,63	159,17

Si comparamos el indicador de consumo de energía kWh/m<sup>2</sup>, considerando la superficie en un caso el área total del edificio útil y en otro caso sólo la superficie climatizada del edificio se comprueba que este último es el doble.

En la Tabla 48., se comprueba que el consumo energético es más del doble solo teniendo en cuenta el área total climatizada. Sin embargo esta es la situación más real porque el resto de superficie no climatizada son espacios abiertos.

En la Figura 140 se muestra la evolución del consumo de energía del edificio por meses, en un año meteorológico tipo comparado con el real del año 2017 y observándose que los meses de menor consumo energético corresponden a enero, junio y diciembre debido a una época vacacional.

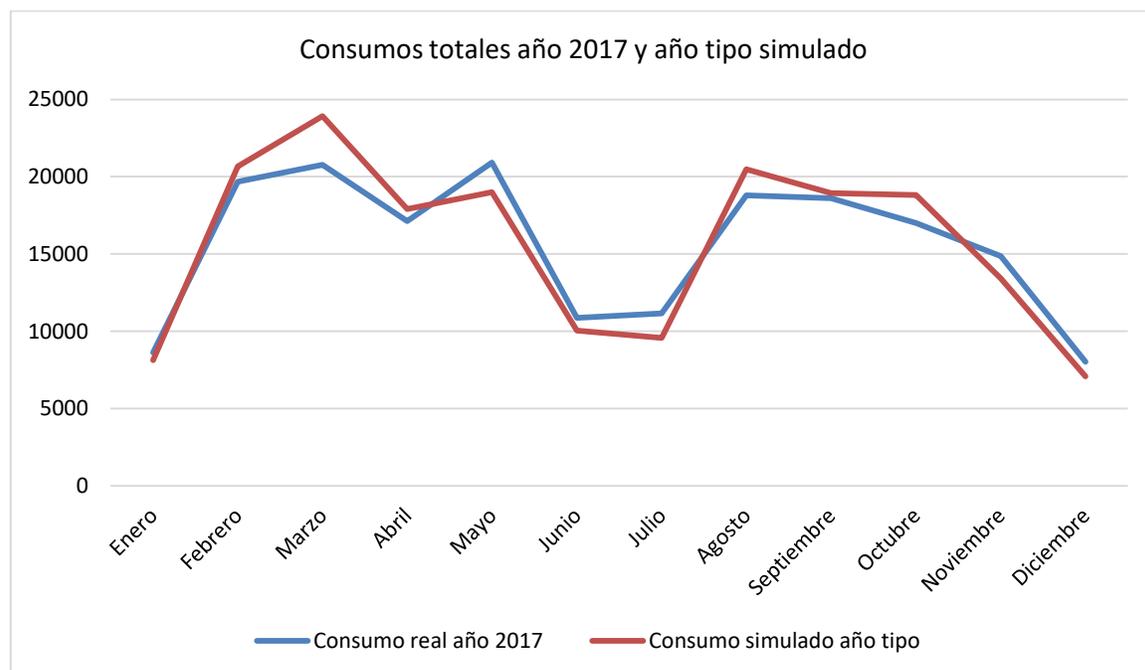


Figura 140. Consumo energético anual simulado y real.

### 5.11.2. Consumo de Energía por Usos

A continuación, se desglosa el consumo total anual de energía final simulado del edificio de acuerdo con el tipo de uso como lo presentan la Tabla 49 y la Table 50. Se observa que el porcentaje de consumo mayor es la refrigeración, seguido de los equipos ofimáticos.

Tabla 49. Distribución de consumos energéticos por uso.

Tipo de uso	Electricidad (Kwh)	Porcentaje de carga (%)
Enfriamiento	91558,35	48,72
Iluminación interior	10014,02	5,33
Iluminación exterior	1735,82	0,92
Equipos interiores	84630,13	45,03
<b>Consumo Total (Kwh)</b>	<b>187938,32</b>	<b>100</b>

Tabla 50. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.

Mes	Refrigeración	Iluminación interior	Iluminación exterior	Equipos	Total (kwh)	Consumo kwh/día	% consumo mes
Enero	3561.25	341.51	53.58	4163.75	8120.09	261.94	4.3%
Febrero	10437.90	1149.70	214.30	8859.06	20660.96	737.89	11.0%
Marzo	12164.65	1326.59	246.44	10179.94	23917.62	771.54	12.7%
Abril	9586.68	1184.71	214.30	6916.94	17902.63	596.75	9.5%
Mayo	9463.18	962.87	160.72	8407.74	18994.51	612.73	10.1%
Junio	2433.77	144.42	0.00	7461.88	10040.07	334.67	5.3%
Julio	4330.96	380.47	53.58	4799.50	9564.51	308.53	5.1%
Agosto	11388.65	1316.33	246.44	7531.07	20482.49	660.73	10.9%
Septiembre	10267.62	1238.83	225.01	7211.90	18943.36	631.45	10.1%
Octubre	9995.76	1272.47	235.73	7303.31	18807.27	606.69	10.0%
Noviembre	6357.02	602.63	85.72	6373.07	13418.44	432.85	7.1%
Diciembre	1570.91	93.49	0.00	5421.97	7086.37	236.21	3.8%

Las figuras 141 y 142., muestran la distribución de consumo anual simulado y la distribución porcentual por consumos para el año 2017 respectivamente.

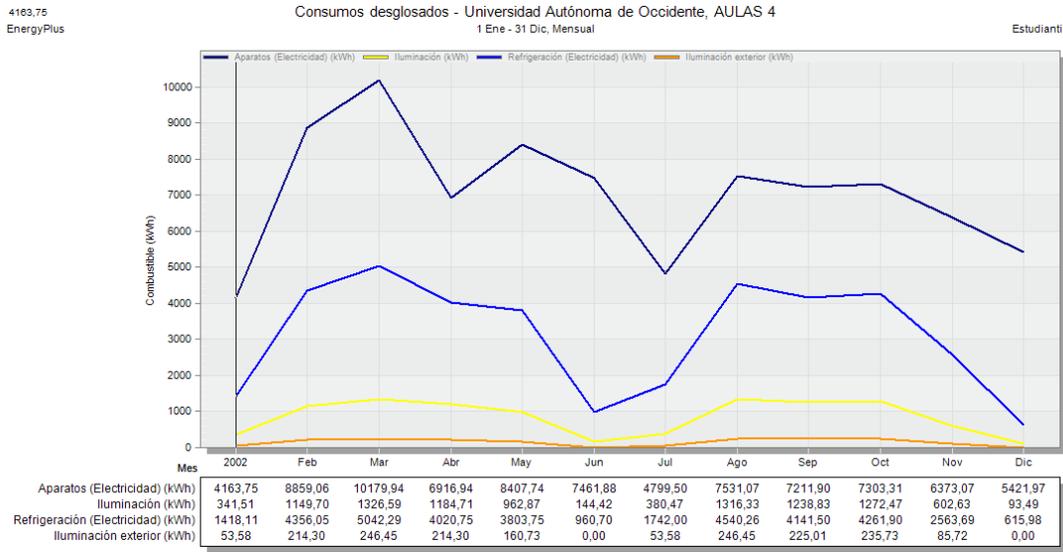


Figura 141. Distribución de consumo energético mensual desglosado por uso final.

### Consumo Energético por Uso Final

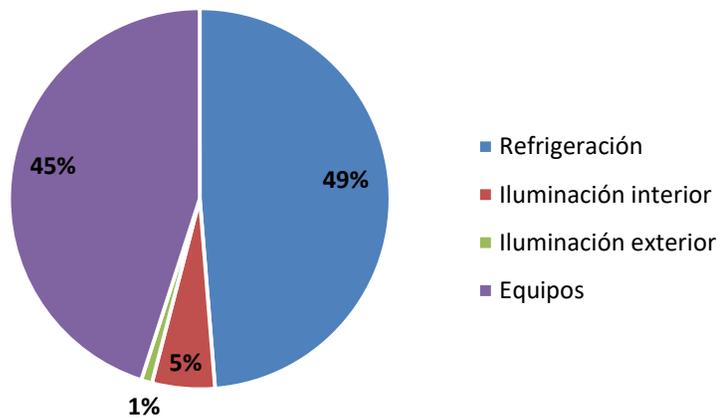


Figura 142. Distribución porcentual de consumo energético por uso final.

Como se observa en la Figura 143 los consumos energéticos del edificio se encuentran distribuidos en: iluminación exterior con 1.735,83 kWh (0,92%), iluminación interior con 10.014,03 kWh (5,33%), equipos ofimáticos con 84630,14 kWh (45,03%), climatización con 91.558,35 kWh (48,72%).

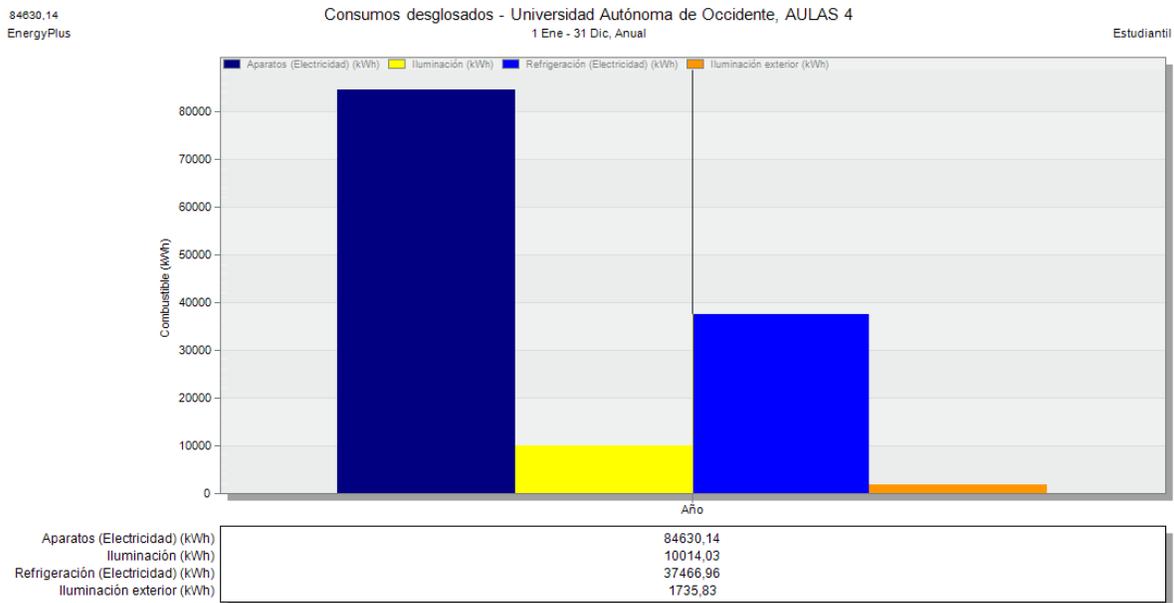


Figura 143. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual.

### 5.11.3. Impacto Medioambiental – Emisiones de CO<sub>2</sub>

Se obtienen las emisiones de kg de CO<sub>2</sub> generados por las instalaciones, presentado de forma mensual y anual en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y la ¡Error! se encuentra el origen de la referencia.**

Tabla 51. Producción mensual y anual de kg de CO<sub>2</sub>

Mes	kg de CO <sub>2</sub>
Enero	3622,03
Febrero	8834,94
Marzo	10177,92
Abril	7476,04
Mayo	8081,05
Junio	5191,60
Julio	4227,17
Agosto	8262,26
Septiembre	7767,25
Octubre	7922,48
Noviembre	5832,81
Diciembre	3715,65
<b>Total</b>	<b>81111,2</b>

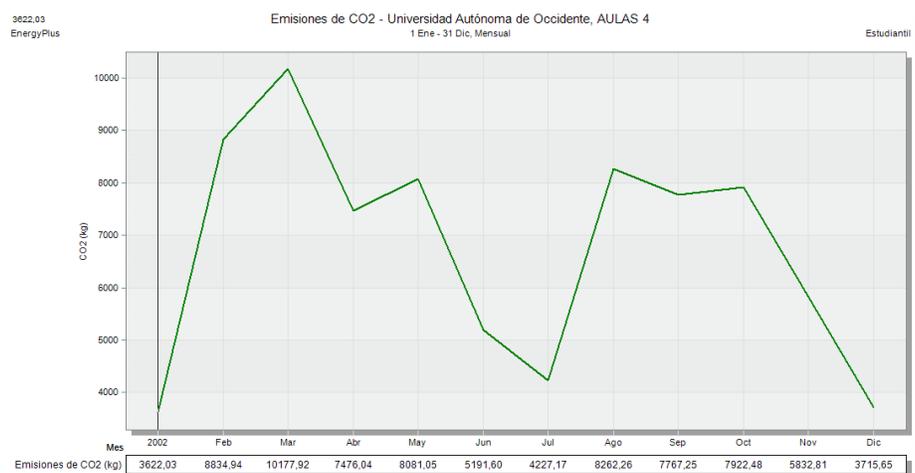


Figura 144. Emisiones de CO<sub>2</sub> mensual para el edificio

## CAPÍTULO 6: PROPUESTAS DE MAE'S PARA EL EDIFICIO DE AULAS 4 MEDIANTE SIMULACIÓN ENERGÉTICA

Las medidas de ahorro energético MAE's que se proponen en este capítulo, son unas de tipo pasivo que afectan a la reducción de la demanda de energía del edificio y otras activas que se aplican a las instalaciones térmicas y eléctricas.

El tipo de MAE's propuestas son:

1. Sistemas de Aire Acondicionado más eficiente energéticamente
2. Rediseño del sistema de iluminación interior
3. Filtros Solares y sombras
  - Vidrio electrocrómico
  - Voladizos
  - Persianas reflectivas
  - Películas Protectoras
4. Implementación de todas las MAE's propuestas
5. Sistema de respaldo de baterías para el sistema de iluminación

### 6.1. MAE I – SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO MÁS EFICIENTE.

En este apartado se analiza y simula energéticamente el edificio de aulas 4 implementando la propuesta de acondicionamiento de los recintos del edificio, en la cual se mejoran los sistemas de aire acondicionado del edificio, reemplazando los equipos existentes por equipos de tecnología VRF, en aras de incrementar la eficiencia energética del edificio por medio de la reducción del consumo de energía eléctrica. Además, se propone la adición de refrigeración a recintos no aclimatados, esto con el fin de mejorar el confort en cada una de las áreas del edificio. Las tablas 52 – 54, presentan las características técnicas de los equipos a instalar, el listado de los recintos a acondicionar junto con el flujo y las características técnicas de los equipos interiores y exteriores de aire acondicionado.

Tabla 52. Características técnicas extractores

Recinto	Aumento de presión (Pa)	Caudal máximo (m <sup>3</sup> /s)
Baño hombres r.a.	49,8	0,0472
Baño mujeres r.a.	49,8	0,0472
Baño hombres p1	104,5	0,2737
Baño mujeres p1	102	0,2265
Baño auxiliar TIC	49,8	0,0472
Baño hombres TIC	49,8	0,0472
Baño mujeres TIC	49,8	0,0472
Baño hombres p2	104,5	0,2737

Baño mujeres p2	102	0,2265
Baño auxiliar planta física	49,8	0,0472
Baño hombres p3	104,5	0,2737
Baño mujeres p3	102	0,2265
C.t. Salón vacío 3	49,8	0,0566
Baño hombres p4	104,5	0,2737
Baño mujeres p4	102	0,2265

Tabla 53. Características técnicas de los equipos de acondicionamiento de recintos

Condensadora de aire	Capacidad (btu/h)	Cant. Módulos	Capacidad refrigeración (kW)	Fan-coil asociados	Piso	Caudal (m³/s)	Temperatura referencia (°c)
UCA # 1-B4-N1	408000	2	119,6	A4T1A	1	1,557	25
				A4T1B	1	1,557	25
UCA # 2-B4-N2	408000	3	119,6	TIC Sur	2	0,649	25
				4201	2	0,649	25
				4202	2	0,649	25
				4203	2	0,649	25
				4204	2	0,649	25
				4205	2	0,649	25
				4206	2	0,649	25
UCA # 3-B1-N3	432000	3	126,6	Planta Física	3	0,765	24
				Planta Física	3	0,649	25
				4301	3	0,649	25
				4302	3	0,649	25
				4303	3	0,649	25
				4304	3	0,649	25
				4305	3	0,649	25
				4306	3	0,649	25
UCA # 4-B4-N4	408000	3	119,6	Salón vacío	4	0,316	24
				Salón vacío	4	0,316	24
				4401	4	0,765	24
				4402	4	0,765	24
				4403	4	0,765	24
				4404	4	0,765	24
				4405	4	0,765	24
				4406	4	0,765	24
UCA # 5-B1-N4-2	360000	3	105,5	4407	4	0,533	24
				4408	4	0,533	24
				4409	4	0,533	24
				4410	4	0,533	24
				A4T4	4	1,586	24
UCA # 6-B4-SALONES TORREONES N1-N2-N3	408000	3	119,6	A4T1	1	1,472	24
				A4T2	2	1,472	24
				A4T3	3	1,699	24

Tabla 54. Resumen datos recintos climatizados actualizados del edificio.

Nivel	Recinto	Área (m2)	Volumen (m3)	Climatizado
Primer piso – planta baja	Egresados	96,55	251,04	No
	A4t1	111,16	289,01	Si
	A4t1A	136,61	355,19	Si
	A4t1B	136,59	355,13	Si
	Baño mujeres p1	26,98	70,14	Si
	Baño hombres p1	23,63	61,45	Si
	Pasillo sur p1	158,03	410,88	No
	Pasillo este p1	40,11	104,29	No
	Pasillo oeste p1	73,49	191,07	No
	Cm. A4t1	8,17	21,24	No
	Cm. A4t1A	6,09	15,84	No
	Cm. A4t1B	5,51	14,32	No
	Escalera este p1	10,71	27,84	No
	Escalera oeste p1	23,52	61,16	No
	Baño mujeres egresados	2,83	7,35	Si
	Baño hombres egresados	2,94	7,65	Si
	Cuarto tecnico p1	3,52	9,14	No
	Cuarto multimedios	12,51	32,53	No
Segundo piso – planta primera	TIC sur	72,41	167,99	Si
	TIC norte	49,8	115,54	Si
	4201	45,55	105,67	Si
	4202	46,94	108,89	Si
	4203	46,94	108,89	Si
	4204	46,94	108,89	Si
	4205	47,08	109,22	Si
	4206	42,85	99,41	Si
	A4T2	126,88	310,85	Si
	Baño hombres p2	23,63	56,01	Si
	Baño mujeres p2	26,97	63,93	Si
	Pasillo sur p2	178,13	413,26	No
	Pasillo este p2	40,13	93,1	No
	Pasillo oeste p2	37,61	87,25	No
	Cm. A4T2	7,98	19,55	No
	C. T. TIC 1	2,89	6,66	No
	C. T. TIC 2	3,46	7,99	No
	C. T. TIC 3	1,49	3,46	No
	Escalera este p2	12,8	55,1	No
	Escalera oeste p2	0,03	54,57	No
	Baño mujeres TIC	2,16	5,02	Si
	Baño hombres TIC	2,26	5,25	Si
Baño auxiliar TIC	3,11	7,18	Si	
Tercer piso –	Planta física sur	34	78,88	Si
	Planta física norte	33,67	78,11	Si
	4301	40,77	94,59	Si

<b>planta segunda</b>	4302	40,98	95,08	Si
	4303	40,99	95,1	Si
	4304	40,99	95,1	Si
	4305	41,33	95,88	Si
	4306	37,45	86,88	Si
	A4t3	126,88	310,85	Si
	Baño hombres p3	23,63	56,01	Si
	Baño mujeres p3	27	64	Si
	Pasillo sur p3	91,65	212,63	No
	Pasillo este p3	40,19	93,23	No
	Pasillo oeste p3	37,69	87,45	No
	Cm. A4t3	7,98	19,55	No
	C. T. Planta física 1	2,89	6,7	No
	C. T. Planta física 2	3,46	8,03	No
	C. T. Planta física 3	1,49	3,46	No
	Escalera este p3	0,04	55,1	No
	Escalera oeste p3	0,02	54,57	No
	Baño auxiliar planta física	3,11	7,22	Si
	Vacío p3	13,52	253,96	No
	<b>Cuarto  piso –  planta  tercera</b>	Investigadores norte	13,04	30,25
Investigadores sur		11,87	27,54	Si
4401		34,93	81,04	Si
4402		35,09	81,42	Si
4403		35,1	81,44	Si
4404		35,1	81,44	Si
4405		35,39	82,1	Si
4406		32,1	74,47	Si
4407		15,6	36,01	Si
4408		17,07	39,4	Si
4409		17,07	39,4	Si
4410		16,61	38,33	Si
A4t4		75,97	176,25	Si
Baño mujeres p4		27,01	64,02	Si
Baño hombres p4		23,65	56,05	Si
Pasillo sur p4		134,97	313,14	No
Pasillo este p4		39,9	92,56	No
Pasillo oeste p4		38,6	89,54	No
C. T. Investigadores 1		3,22	7,46	No
C. T. Investigadores 2		2,22	5,15	No
C.t. Investigadores 3		0,27	0,62	Si
Escalera este p4		0,06	55,1	No
Escalera oeste p4		0,02	54,57	No
Baños investigadores	3,11	7,22	No	
<b>Techo</b>	Techo: Ático	836,74	258,17	No

A continuación, se presentan los datos obtenidos al realizar la simulación energética de esta propuesta de mejora. La Figura 145 muestra la evolución del consumo de energía del edificio por meses, en un año meteorológico tipo y observándose que los meses de menor consumo energético corresponden a enero, junio, Julio y diciembre debido a una época vacacional.

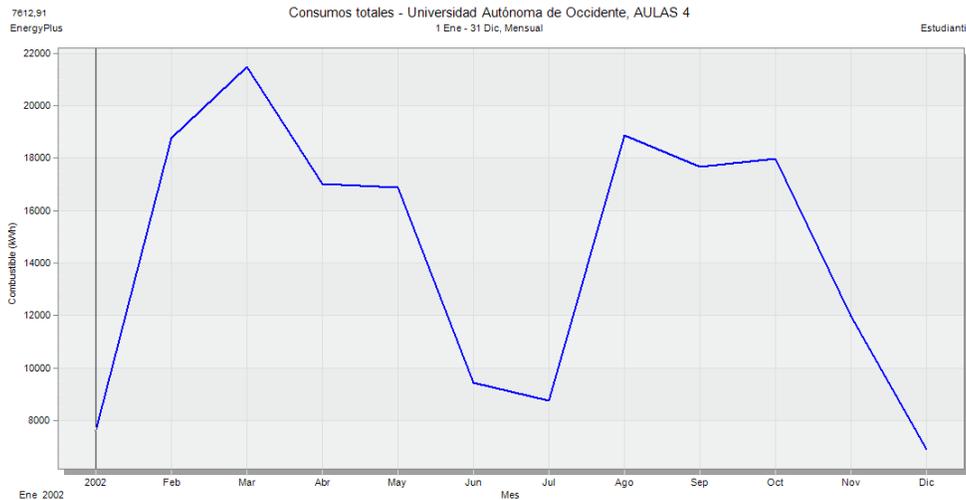


Figura 145. Distribución de consumo energético anual.

A continuación, se desglosa el consumo total anual de energía del edificio con el nuevo sistema VRF de acuerdo con el tipo de uso, como lo muestra la Tabla 55. La Tabla 56, presenta la distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes, donde se observa que el porcentaje de consumo mayor es de equipos ofimáticos, seguido de la refrigeración.

Tabla 55. Distribución de consumos energéticos por uso.

TIPO DE USO	ELECTRICIDAD (kWh)	PORCENTAJE DE CARGA (%)
Enfriamiento	71088,69	41,26
Iluminación interior	10014,02	5,81
Iluminación exterior	1735,82	1,01
Equipos interiores	84633,13	49,12
Extractores	7836,77	2,81
<b>CONSUMO TOTAL (kWh)</b>	<b>172308,43</b>	<b>100</b>

Tabla 56. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.

Mes	Refrigeración	Iluminación interior	Iluminación exterior	Equipos	Extractores	Total (kwh)	Consumo kwh/día	Consumo mes
Enero	2867.76	341.51	53.58	4163.75	168.33	7594.93	245.00	4.4%
Febrero	7786.41	1149.70	214.30	8859.06	601.00	18610.47	664.66	10.8%
Marzo	8893.91	1326.59	246.44	10179.94	686.25	21333.13	688.17	12.4%
Abril	7947.96	1184.71	214.30	6919.94	623.19	16890.10	563.00	9.8%
Mayo	6812.15	962.87	160.72	8407.74	484.01	16827.49	542.82	9.8%
Junio	1793.86	144.42	0.00	7461.88	48.06	9448.22	314.94	5.5%

<b>Julio</b>	3325.46	380.47	53.58	4799.50	181.27	8740.28	281.94	5.1%
<b>Agosto</b>	9102.03	1316.33	246.44	7531.07	683.23	18879.10	609.00	11.0%
<b>Septiembre</b>	8325.95	1238.83	225.01	7211.90	650.09	17651.78	588.39	10.2%
<b>Octubre</b>	8290.90	1272.47	235.73	7303.31	658.26	17760.67	572.92	10.3%
<b>Noviembre</b>	4591.34	602.63	85.72	6373.07	21.99	11674.75	376.60	6.8%
<b>Diciembre</b>	1350.96	93.49	0.00	5421.97	31.09	6897.51	229.92	4.0%

Las figuras 146 y 147, muestran la distribución de consumo anual simulado y la distribución porcentual por consumos para el año 2017 respectivamente.

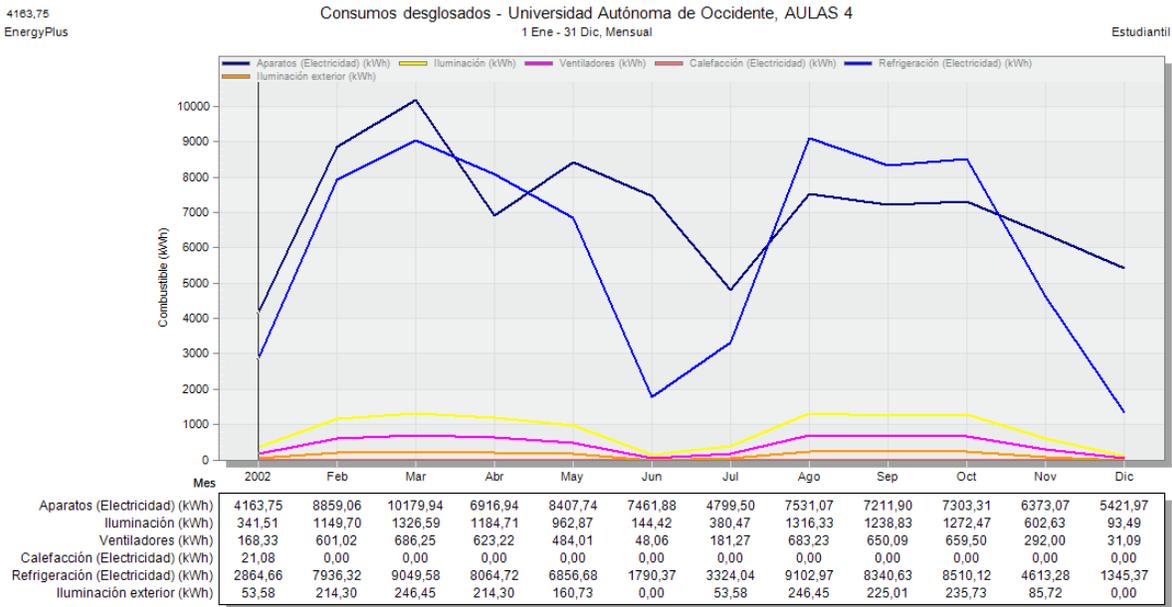


Figura 146. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE I

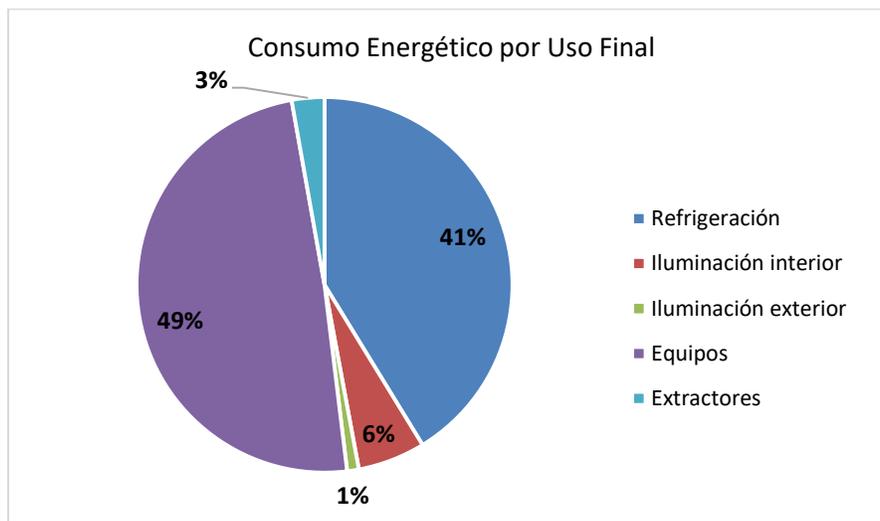


Figura 147. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE I

La Figura 148 presenta los consumos energéticos del edificio según cada uso final y su porcentaje de participación, de donde se obtiene que el consumo por iluminación exterior es de 1.735,82 kWh (1,01%), iluminación interior 10.014,02 kWh (5,81%), consumo por equipos ofimáticos de 84.633,13 kWh (49,12%), y el consumo por climatización de 71.088,69 kWh y extractores de 4.836,77 kWh que supone un 44,06%.

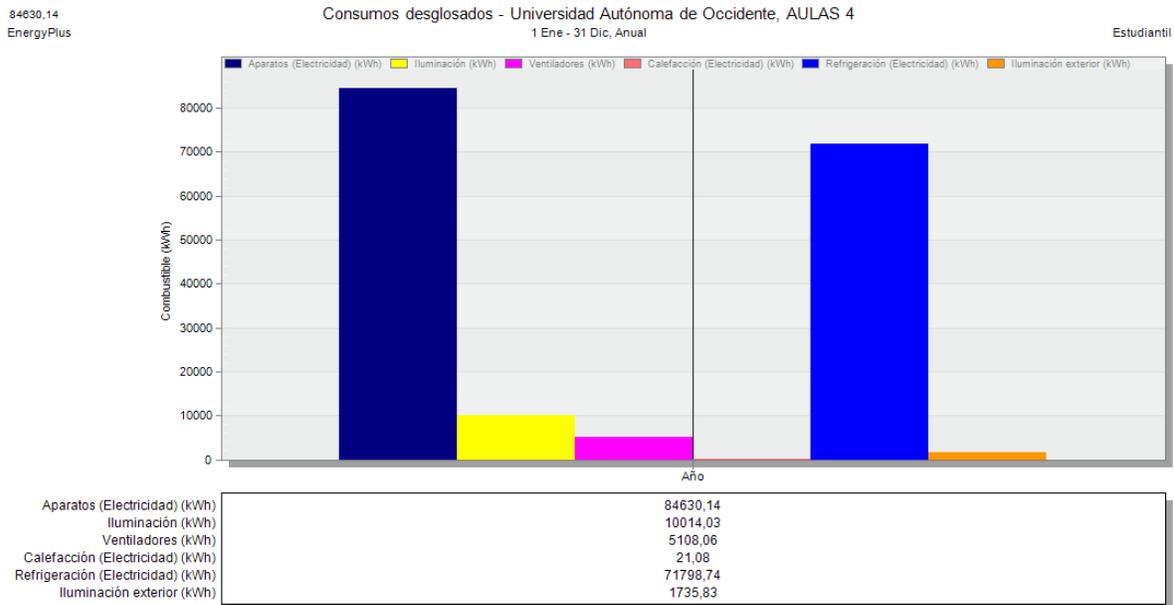


Figura 148. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual.

### Impacto Medioambiental – Emisiones de CO<sub>2</sub>

Se obtienen las emisiones de kg de CO<sub>2</sub> generados por las instalaciones, presentado de forma mensual y anual en la tabla 57 y la Figura 149.

Tabla 57. Producción mensual y anual de kg de CO<sub>2</sub> con MAE I

Mes	kg de CO <sub>2</sub>
Enero	4613,42
Febrero	11368,8
Marzo	13022,2
Abril	10304,35
Mayo	10224,44
Junio	5723,5
Julio	5295,74
Agosto	11441,29
Septiembre	10705,87
Octubre	10896,56
Noviembre	7251,81
Diciembre	4176,5
<b>Total</b>	<b>105024,48</b>

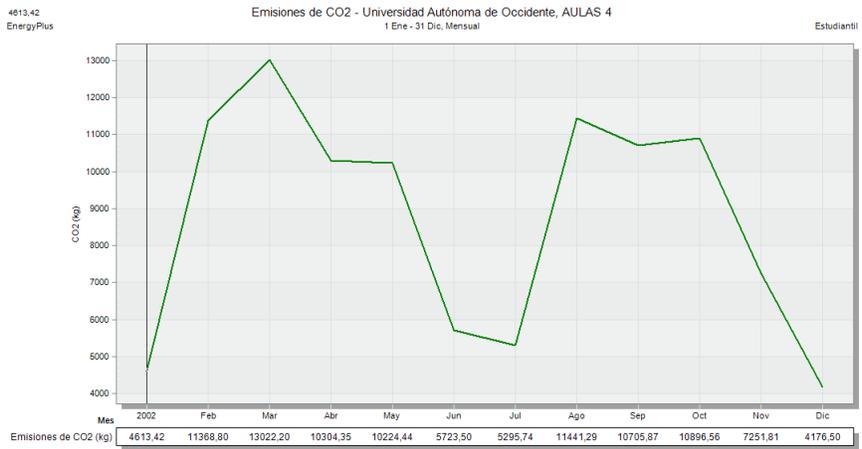


Figura 149. Emisiones de CO<sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE I

**6.1.1. Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE I**

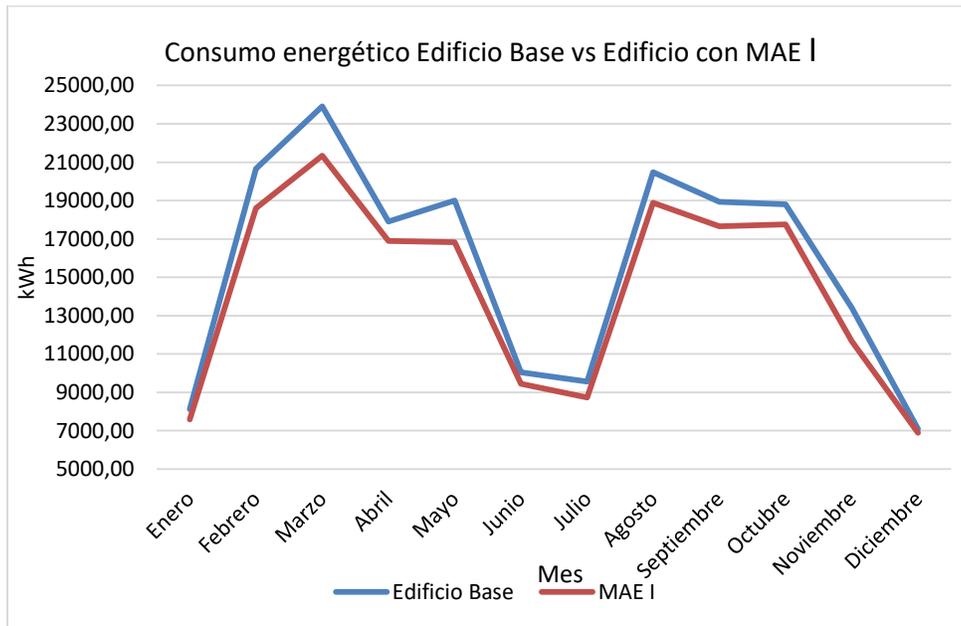


Figura 150. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con MAE I.

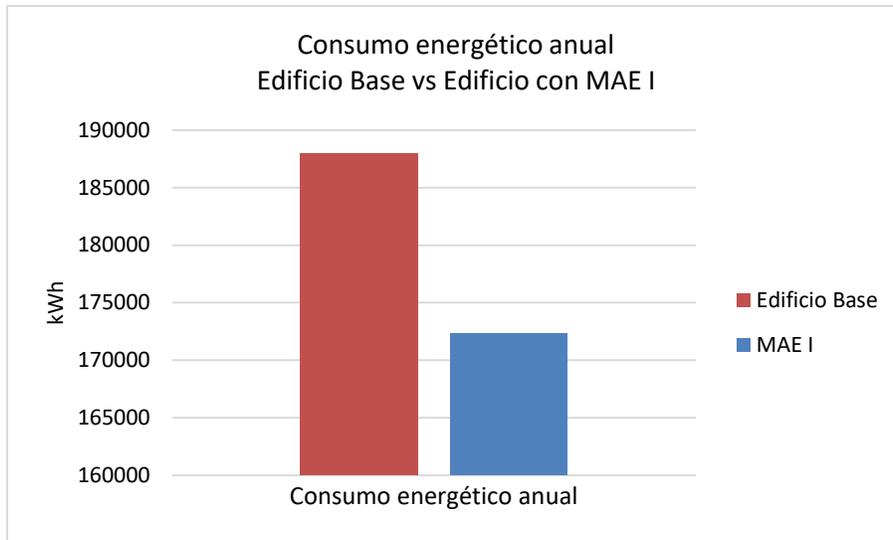


Figura 151. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con MAE I

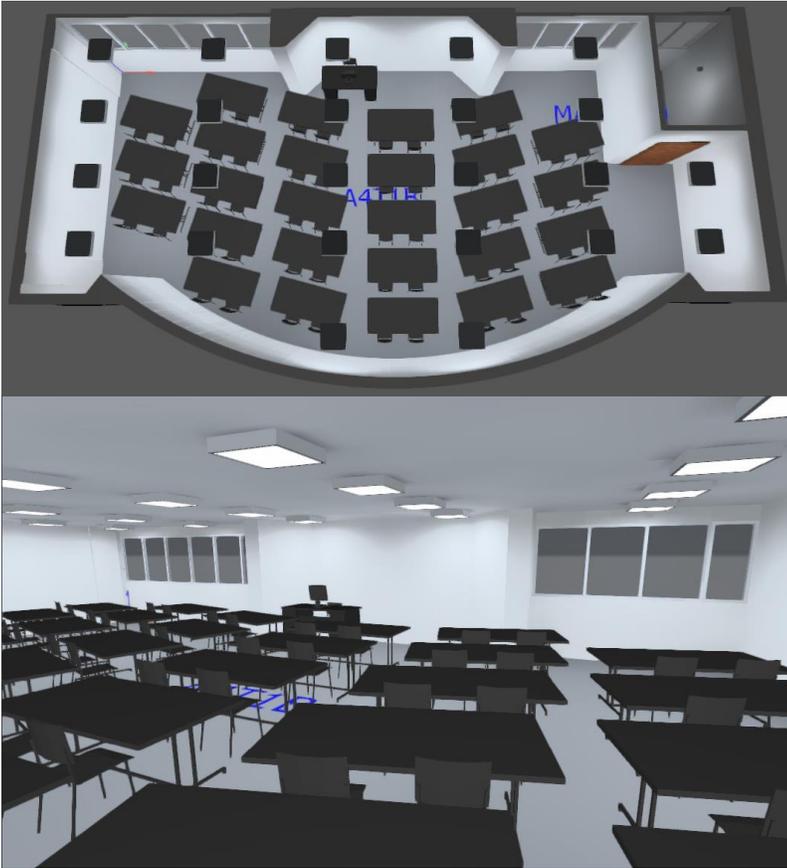
Comparando los datos obtenidos del Edificio base y el Edificio con la Medida de Ahorro Energético I, se puede destacar que en el edificio con el MAE I (nuevo sistema VRF) son integrados y climatiza todos los recintos del edificio, con cambio de tecnología en los sistemas de refrigeración y se logra una disminución de consumo energético anual del 8,316%. En la Figura 150 se observa la evolución del consumo anual de energía en el edificio es el mismo, pero con un consumo menor del HVAC, en la Figura 151 se puede observar que debido a que solo se realizó un rediseño del sistema de HVAC para el edificio, todos los otros consumos conservan su comportamiento y consumo anual, mientras que el consumo por refrigeración se reduce en un 22,36% (20469,66 kWh) con respecto al consumo energético del antiguo HVAC, generando así una reducción considerable y tomando como referencia esta como una muy buena estrategia de mejora de la eficiencia energética en el edificio.

## 6.2. MAE II – REDISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN INTERIOR.

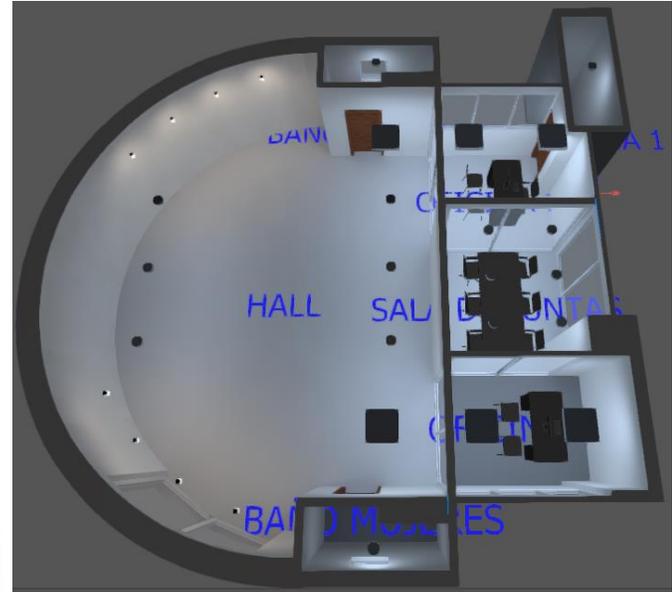
En este caso se realiza el diseño de iluminación en el software Dialux con el fin de que los nuevos diseños cumplieran con la reglamentación colombiana, este es un software gratuito de que permite crear proyectos de iluminación profesionales. Este software es reconocido internacionalmente en iluminación, y facilita la tarea de diseñar sistemas de iluminación tanto para interiores como exteriores.

A continuación, se presenta la relación de recintos a los que se le realizó diseño previo de simulación en el software Dialux.

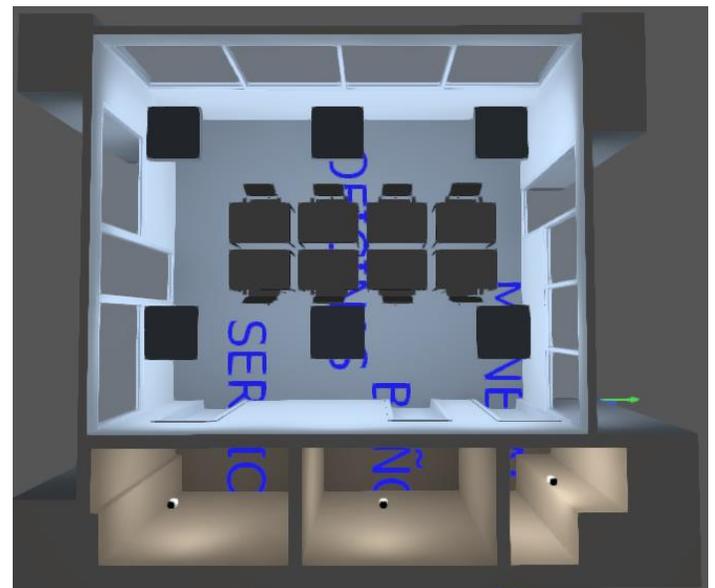
**TORREONES A4T1B Y A4T1C**



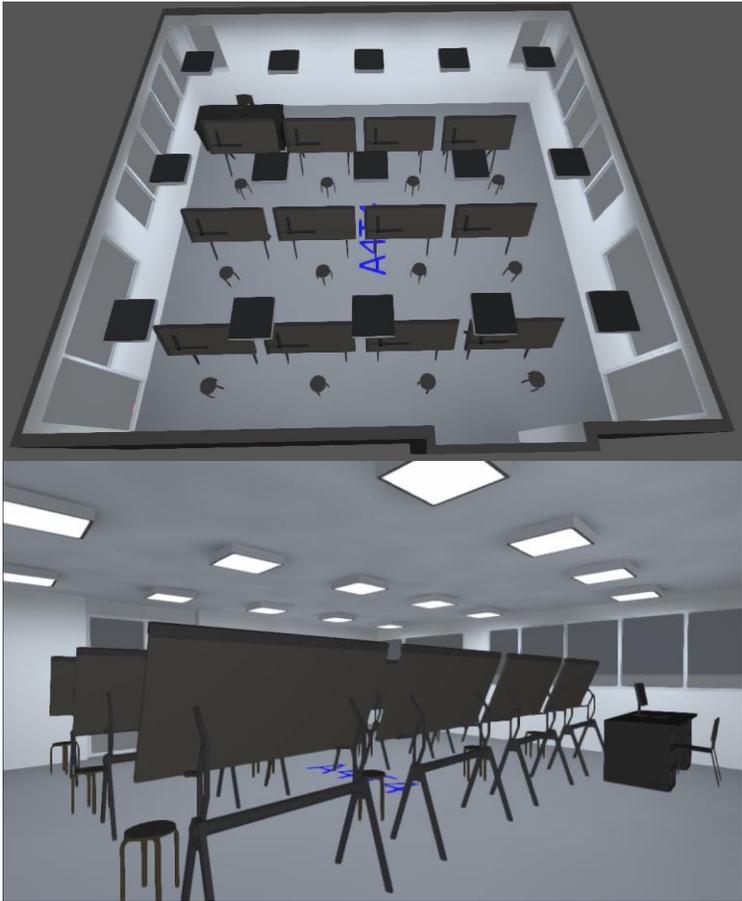
**OFICINA DE EGRESADOS**



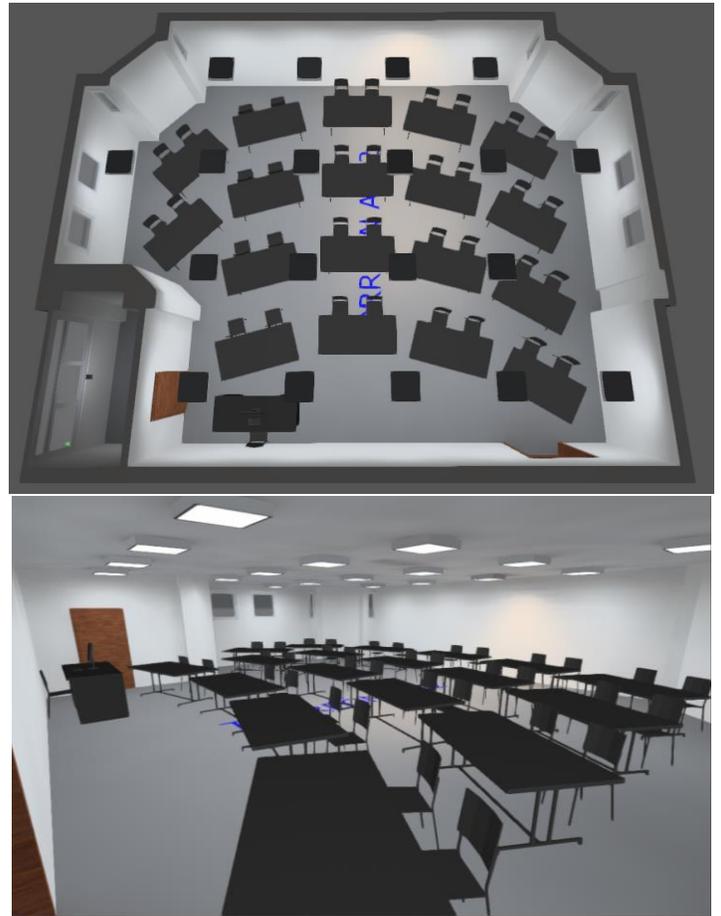
**Oficina Investigadores**



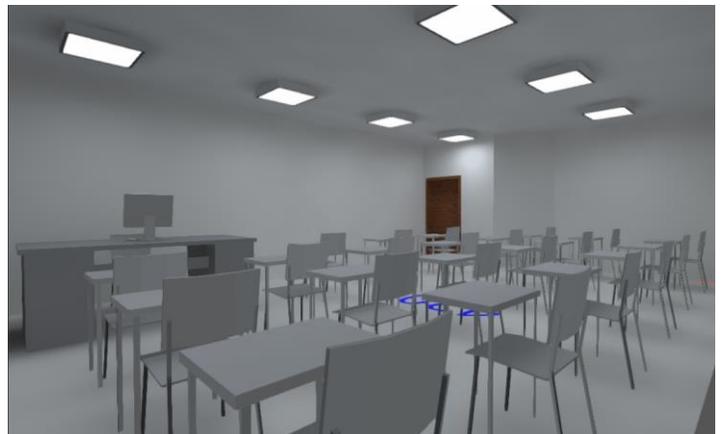
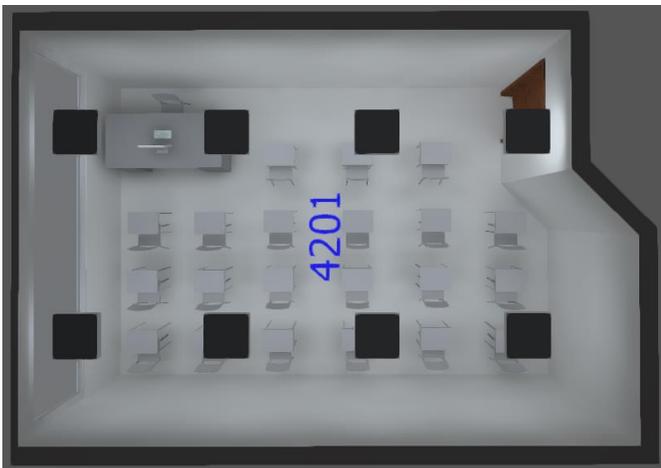
**Torreón A4T4**



**Torreones 4AT1, A4T2, A4T3**



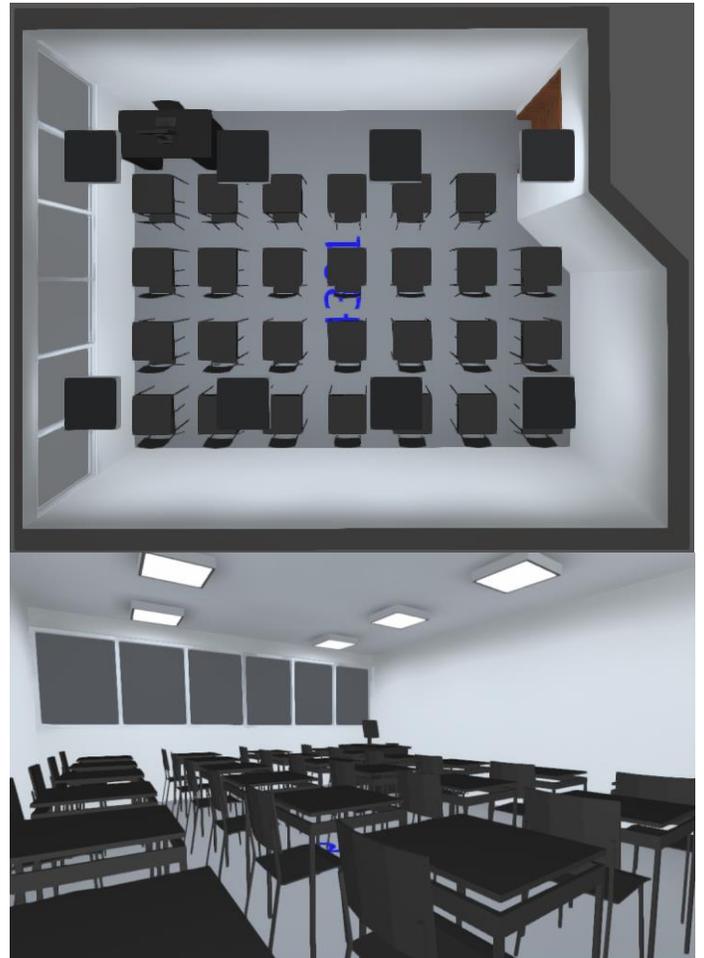
**Aulas Piso 2**



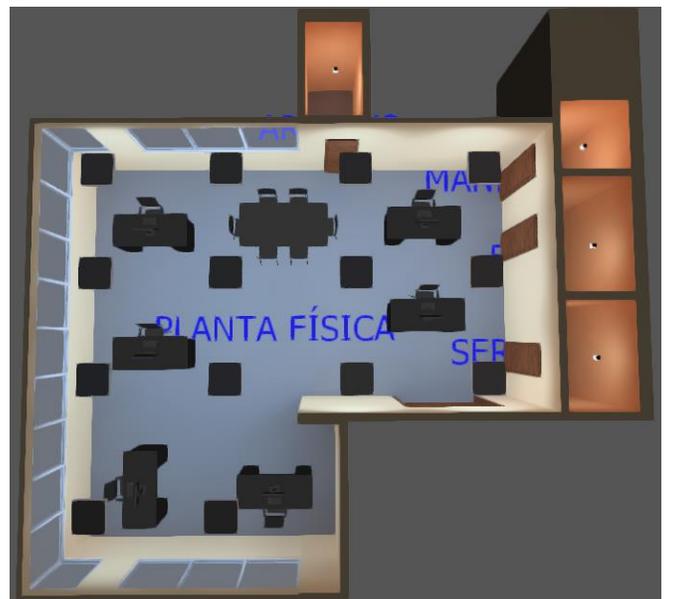
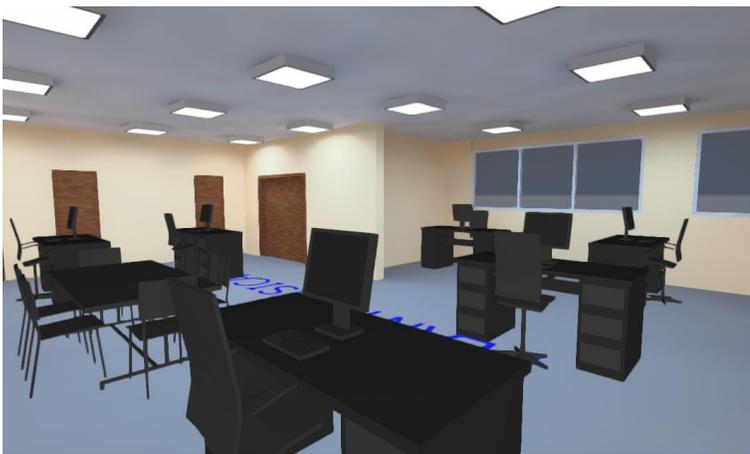
Oficinas TIC



Aulas Piso 3



Planta Física



**AULAS 4401 a 4406**



**AULAS 4407 a 4410**



En la Tabla 58, se presenta el resumen de luminarias usadas en el rediseño de iluminación.

Tabla 58. Resumen de luminarias

Recinto	Marca luminaria	Referencia luminaria	Potencia luminaria (W)	Cantidad	Potencia total luminarias (W)
Torreones A4T1A y B	Sylvania	Start panel led 625 nw 0047573	45	24	1080
Torreones A4T1, 2 y 3	Sylvania	Start panel led 625 nw 0047573	45	19	855
Aulas piso 2	Sylvania	Start panel led 625 nw 0047573	45	8	360
TIC	Sylvania	Start panel led 625 nw 0047573	45	24	1080
Aulas piso 3	Sylvania	Start panel led 625 nw 0047573	45	8	360
Planta física	Sylvania	Start panel led 625 nw 0047573	45	14	630
Aulas 4401 a 4406	Sylvania	Start panel led 625 nw 0047573	45	8	360
Aulas 4407 a 4410	Sylvania	Start panel led 625 nw 0047573	45	4	180

La Tabla 59, presenta los niveles de iluminancia obtenidos en cada recinto a partir del rediseño del sistema de iluminación.

Tabla 59. Niveles de iluminancia con la propuesta de diseño de iluminación

Recinto	Tipo de recinto	Iluminancia según normativa (lux)	Nivel de iluminancia obtenido (lux)	Estado de normativa
Torreón A4TA	Torreón	500	597	Si cumple
Oficina egresados	Hall	100	327	Si cumple
	Oficina 1	500	558	Si cumple
	Oficina 2	500	552	Si cumple
	Sala juntas	500	544	Si cumple
Torreones A4T1A y B	Torreón	500	563	Si cumple
Torreones A4T1, 2 y 3	Torreón	500	578	Si cumple
Aulas piso 2	Aula	500	562	Si cumple
TIC	Oficina	500	568	Si cumple
Aulas piso 3	Aula	500	556	Si cumple
Planta física	Oficina	500	551	Si cumple
Aulas 4401 a 4406	Aula	500	619	Si cumple
Aulas 4407 a 4410	Aula	500	610	Si cumple

En la Tabla 60, se comparan los consumos de energía mes a mes simulado en Design Builder entre el Edificio Base y el edificio con el nuevo diseño de iluminación.

Tabla 60. Consumo Kwh diseño de iluminación nuevo vs actual

Mes	Consumo en iluminación Edificio Base (kWh)	Consumo en iluminación Edificio con MAE II (kWh)	Diferencia (kWh)
Enero	8120.09	8251.52	131.43
Febrero	20660.96	21309.50	648.54
Marzo	23917.62	24656.94	739.32
Abril	17902.63	18582.32	679.69
Mayo	18994.51	19521.40	526.89
Junio	10040.07	10054.81	14.74
Julio	9564.51	9694.65	130.14
Agosto	20482.49	21220.60	738.11
Septiembre	18943.36	19659.58	716.22
Octubre	18807.27	19525.75	718.48
Noviembre	13418.44	13703.60	285.16
Diciembre	7086.37	7092.87	6.5
<b>Total anual</b>	<b>187938.32</b>	<b>193273.54</b>	<b>5335.22</b>

### Impacto Medioambiental – Emisiones de CO<sub>2</sub>

Se obtienen las emisiones de kg de CO<sub>2</sub> generados por las instalaciones, presentado de forma mensual y anual en la Tabla 61 y la Figura 152.

Tabla 61. Producción mensual y anual de kg de CO<sub>2</sub> con MAE II

Mes	kg de CO <sub>2</sub>
Enero	3687.59
Febrero	9139.86
Marzo	10532.22
Abril	7800.63
Mayo	8329.05
Junio	5195.78
Julio	4292.76
Agosto	8610.47
Septiembre	8104.60
Octubre	8262.96
Noviembre	5970.00
Diciembre	3714.64
<b>Total</b>	<b>83640.56</b>

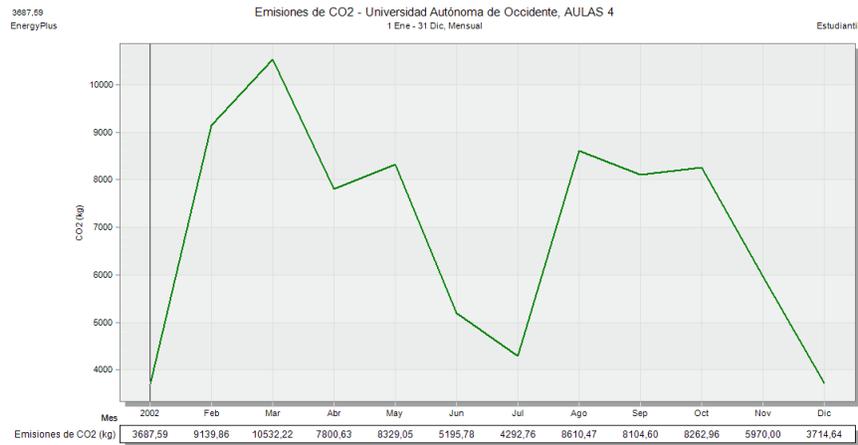


Figura 152. Emisiones de CO<sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE II

En el desarrollo de esta MAE se optó inicialmente por la sustitución tecnológica de los sistemas de iluminación actuales por sistemas de iluminación más eficiente. Sin embargo, se buscó no solo realizar una actualización tecnológica, si no, cumplir con la normatividad colombiana que exige niveles mínimos de iluminación para promover una buena calidad ambiental interior y confort lumínico, lo cual dio como resultado que el edificio bajo este escenario tuviera un consumo de energía mayor. Finalmente, no se presentan ahorros energéticos (menor consumo de energía eléctrica), pero se está teniendo confort visual para los usuarios del edificio.

### 6.3. MAE III – FILTROS SOLARES Y SOMBRAS – LAMAS

Otra estrategia que implementar en aras de la mejora de la eficiencia energética es la implementación de sistemas de lamas en la cubierta exterior del edificio. Las Figuras 153 – 156, presentan la simulación energética del edificio con la implementación de lamas.

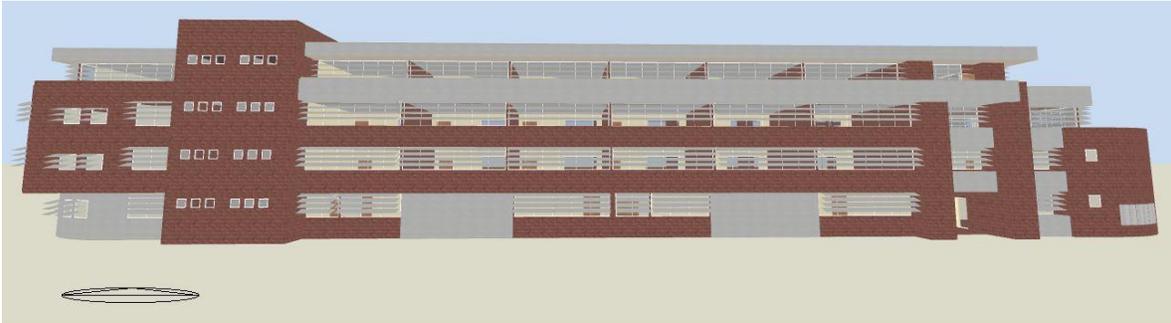


Figura 153. Vista norte del edificio con implementación de lamas



Figura 154. Vista sur del edificio con implementación de lamas

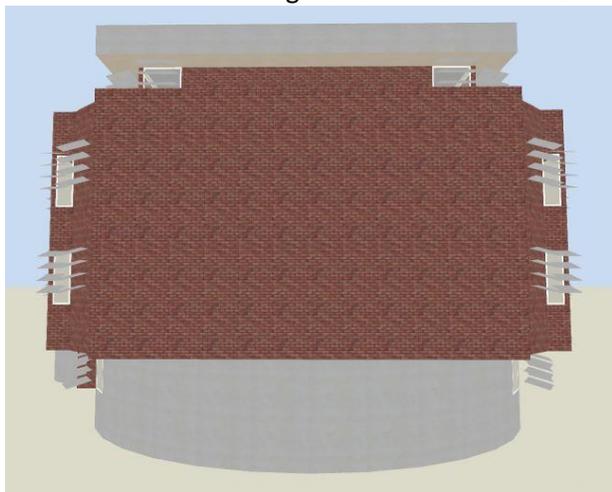


Figura 155. Vista este del edificio con implementación de lamas



Figura 156. Vista oeste del Edificio con implementación de lamas

A continuación, se presentan los datos obtenidos al realizar la simulación energética de esta propuesta de mejora. La Figura 157 muestra la evolución del consumo de energía del edificio por meses, en un año meteorológico tipo y observándose que los meses de menor consumo energético corresponden a enero, junio, julio y diciembre debido a una época vacacional.

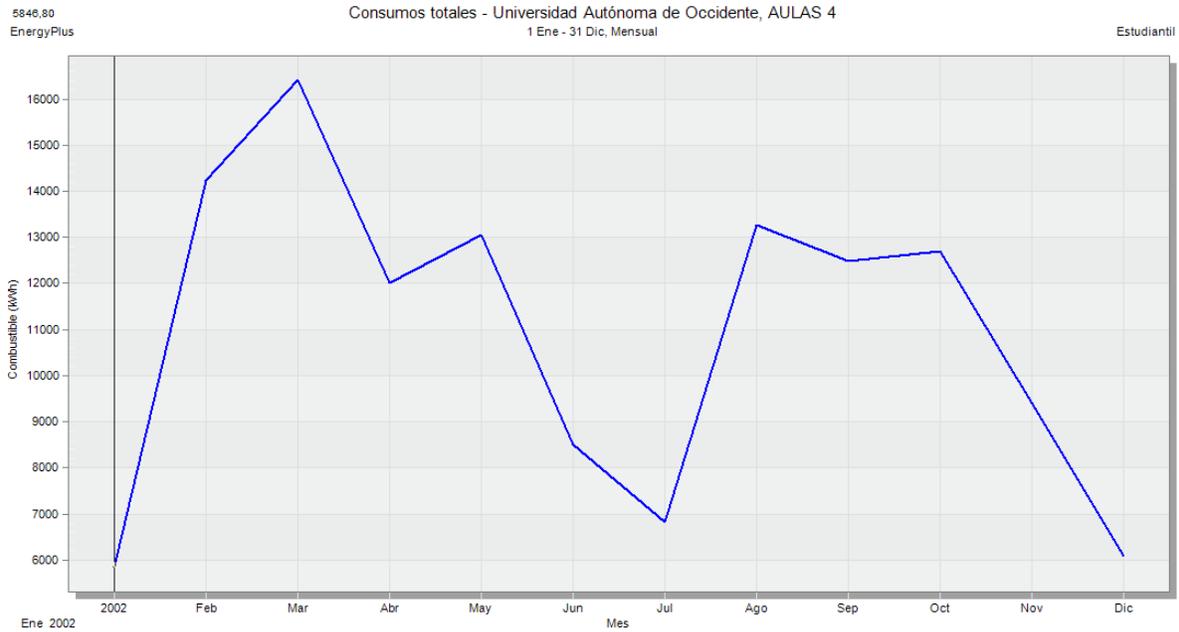


Figura 157. Distribución de consumo energético anual edificio con MAE III.

A continuación, se desglosa el consumo total anual de energía del edificio con la implementación de lamas de acuerdo con el tipo de uso, como lo muestra la Tabla 62. La Tabla 63, presenta la distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes, donde se observa que el porcentaje de consumo de equipos ofimáticos es casi igual al consumo de refrigeración, y son los mayores.

Tabla 62. Distribución de consumos energéticos por uso.

TIPO DE USO	ELECTRICIDAD (kWh)	PORCENTAJE DE CARGA (%)
Refrigeración	84056,58	46,59
Iluminación interior	10014,02	5,55
Iluminación exterior	1735,82	0,96
Equipos interiores	84633,13	46,90
<b>CONSUMO TOTAL (kWh)</b>	<b>180436,55</b>	<b>100</b>

Tabla 63. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.

Mes	Refrigeración	Iluminación interior	Iluminación exterior	Equipos	Total (kwh)	Consumo kwh/día	consumo mes
Enero	3229.77	341.51	53.58	4163.75	7788.61	251.25	4.3%
Febrero	9626.16	1149.70	214.30	8859.06	19849.22	708.90	11.0%
Marzo	11271.52	1326.59	246.44	10179.94	23024.49	742.73	12.8%
Abril	8748.89	1184.71	214.30	6916.94	17064.84	568.83	9.5%
Mayo	8757.48	962.87	160.72	8407.74	18288.81	589.96	10.1%
Junio	2264.14	144.42	0.00	7461.88	9870.44	329.01	5.5%
Julio	3961.91	380.47	53.58	4799.50	9195.46	296.63	5.1%

<b>Agosto</b>	10499.10	1316.33	246.44	7531.07	19592.94	632.03	10.9%
<b>Septiembre</b>	9384.40	1238.83	225.01	7211.90	18060.14	602.00	10.0%
<b>Octubre</b>	9040.71	1272.47	235.73	7303.31	17852.22	575.88	9.9%
<b>Noviembre</b>	5788.15	602.63	85.72	6373.07	12849.57	414.50	7.1%
<b>Diciembre</b>	1484.35	93.49	0.00	5421.97	6999.81	233.33	3.9%

Las Figuras 158 y 159., muestran la distribución de consumo anual simulado y la distribución porcentual por consumos para el año 2017 respectivamente del edificio con MAE III.

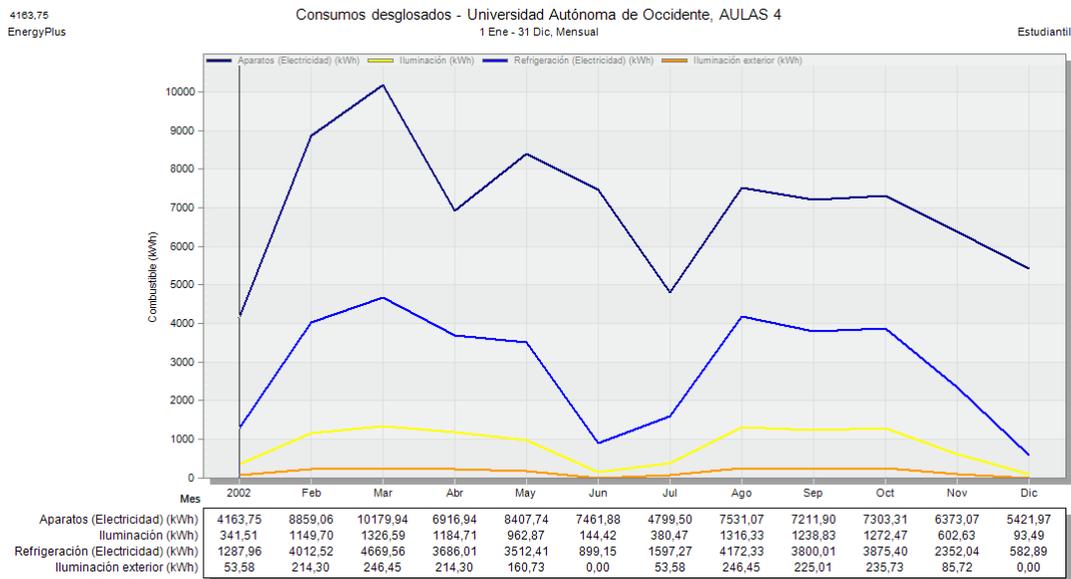


Figura 158. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE III

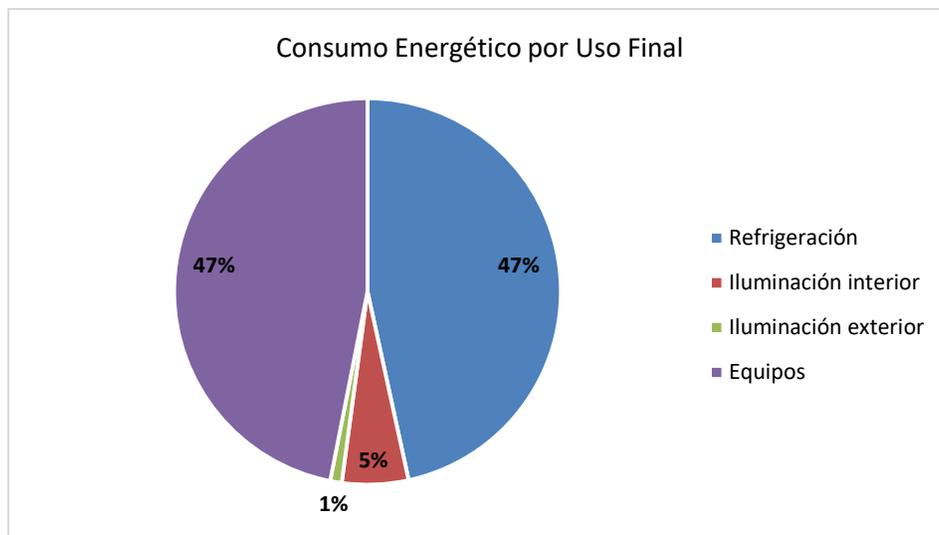


Figura 159. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE III

La Figura 160 presenta los consumos energéticos del edificio según cada uso final y su porcentaje de participación, de donde se obtiene que el consumo por iluminación exterior es de 1.735,82 kWh (0,96%), iluminación interior 10.014,02 kWh (5,55%), consumo por equipos ofimáticos de 84.630,13 kWh (46,90%), y el consumo por climatización de 84.056,58 kWh (46,59%).

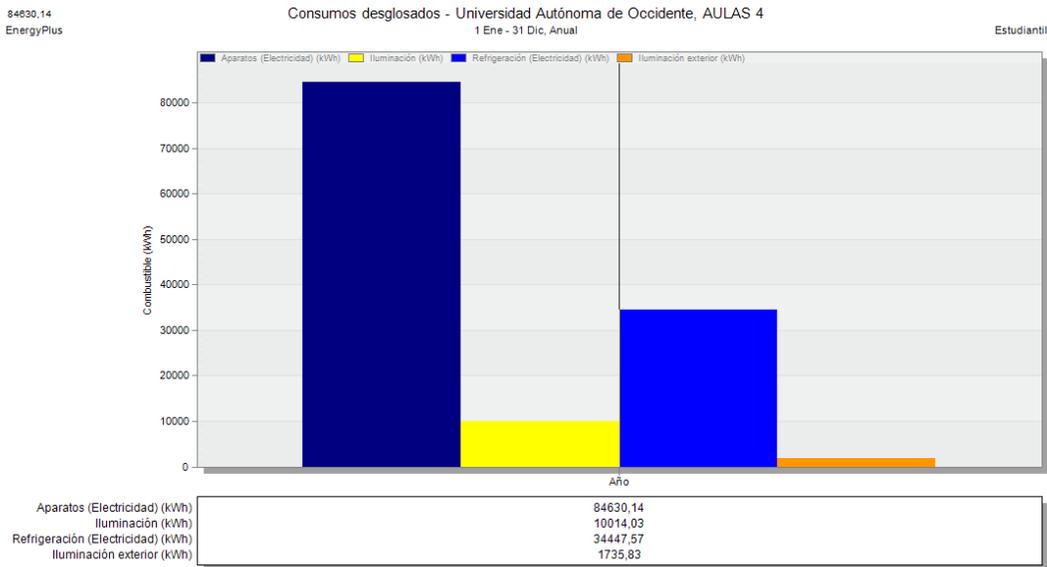


Figura 160. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual con MAE III.

### Impacto Medioambiental – Emisiones de CO<sub>2</sub>

Se obtienen las emisiones de kg de CO<sub>2</sub> generados por las instalaciones, presentado de forma mensual y anual en la Tabla 64 y la Figura 161.

Tabla 64. Producción mensual y anual de kg de CO<sub>2</sub> con MAE III

Mes	kg de CO <sub>2</sub>
Enero	3543.16
Febrero	8626.76
Marzo	9952.05
Abril	7273.19
Mayo	7904.5
Junio	5154.3
Julio	4139.47
Agosto	8039.29
Septiembre	7560.31
Octubre	7688.26
Noviembre	5704.55
Diciembre	3695.6
<b>Total</b>	<b>79281.44</b>

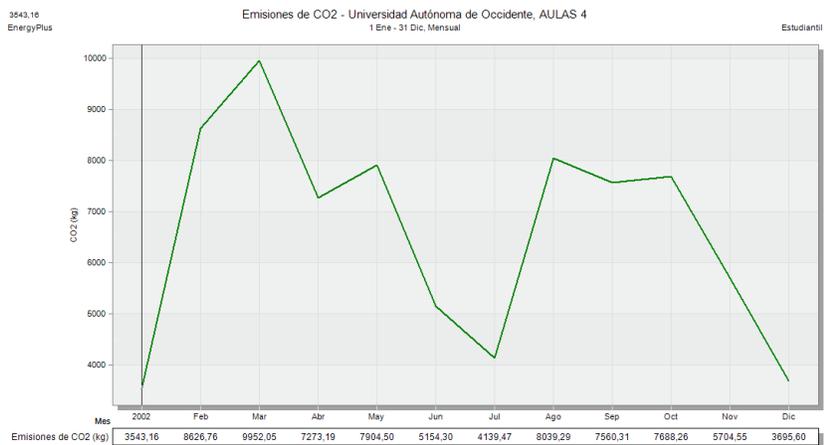


Figura 161. Emisiones de CO<sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE III

**6.3.1. Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE III**

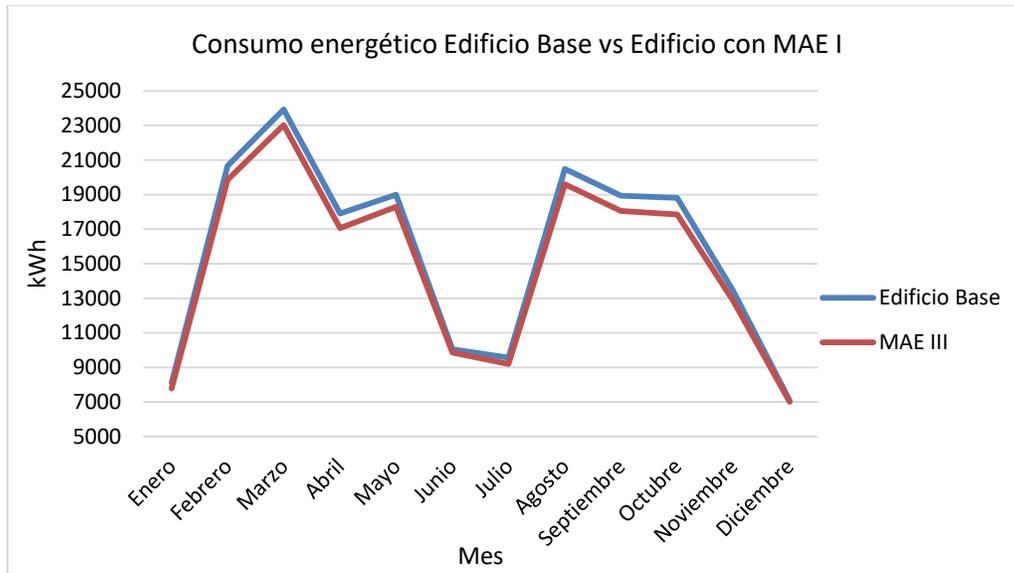


Figura 162. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con MAE III.

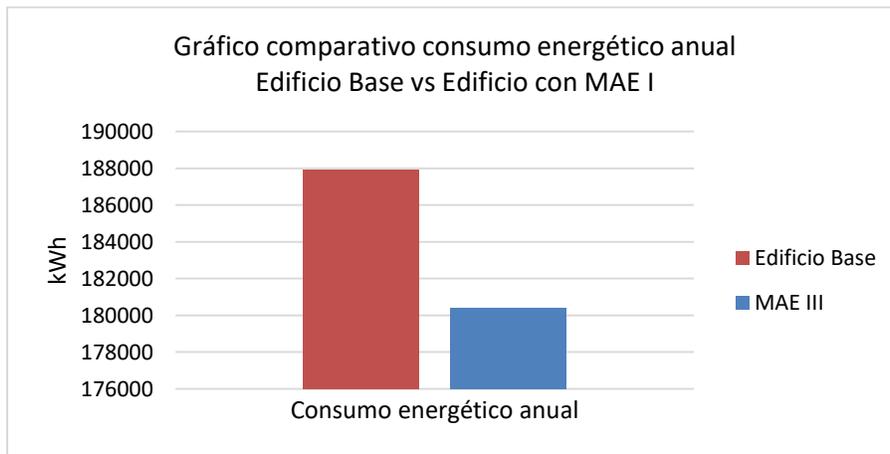


Figura 163. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con MAE III

Una vez implementado y simulado el edificio con la Medida de Ahorro Energético III, que consiste en el sistema de lamas en algunas zonas del edificio, se obtiene una reducción del 3,99% del consumo energético anual del edificio (7501,77 kWh/Año) relacionados con el HVAC del edificio base.

Este ahorro energético es debido a que las lamas reducen el impacto directo de la radiación solar a la fachada del edificio donde se sitúan los vidrios de las aulas, logrando así una reducción del calor transferido al interior de los recintos, lo cual significa una reducción de la temperatura interior de los mismos y por lo tanto una reducción significativa en el consumo de aire acondicionado. Es por esto que se debe tener en cuenta como una medida de mejora de la eficiencia energética en el edificio de Aulas 4 de la UAO.

#### 6.4. MAE IV – FILTROS SOLARES Y SOMBRAS – VIDRIO ELECTROCRÓMICO

Otra propuesta que se implementó en aras de mejorar la eficiencia energética del edificio fue la implementación de vidrio electrocrómico en los acristalamientos del edificio, se realizó la simulación energética de este con las configuraciones realizadas, obteniendo los resultados de la Tabla 65 y la Tabla 66, donde se observa que el porcentaje de consumo mayor es de refrigeración, seguido de la refrigeración:

Tabla 65. Distribución de consumos energéticos por uso.

TIPO DE USO	ELECTRICIDAD (kWh)	PORCENTAJE DE CARGA (%)
Refrigeración	88979.93	48.00
Iluminación interior	10014.02	5.40
Iluminación exterior	1735.82	0.94
Equipos interiores	84630.13	45.66
<b>CONSUMO TOTAL (kWh)</b>	<b>185359.90</b>	<b>100</b>

Tabla 66. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.

Mes	Refrigeración	Iluminación interior	Iluminación exterior	Equipos	Total (kwh)	Consumo kwh/día	consumo mes
Enero	3466.17	341.51	53.58	4163.75	8025.01	258.87	4.3%
Febrero	10154.10	1149.70	214.30	8859.06	20377.16	727.76	11.0%
Marzo	11841.93	1326.59	246.44	10179.94	23594.90	761.13	12.7%
Abril	9272.34	1184.71	214.30	6916.94	17588.29	586.28	9.5%
Mayo	9235.71	962.87	160.72	8407.74	18767.04	605.39	10.1%
Junio	2385.01	144.42	0.00	7461.88	9991.31	333.04	5.4%
Julio	4241.35	380.47	53.58	4799.50	9474.90	305.64	5.1%
Agosto	11033.20	1316.33	246.44	7531.07	20127.04	649.26	10.9%
Septiembre	9952.06	1238.83	225.01	7211.90	18627.80	620.93	10.0%
Octubre	9693.37	1272.47	235.73	7303.31	18504.88	596.93	10.0%
Noviembre	6165.89	602.63	85.72	6373.07	13227.31	426.69	7.1%
Diciembre	1538.80	93.49	0.00	5421.97	7054.26	235.14	3.8%

Las Figuras 164 y 165., muestran la distribución de consumo anual simulado y la distribución porcentual por consumos para el año 2017 respectivamente del edificio con la implementación de vidrios electrocrómicos como MAE IV.

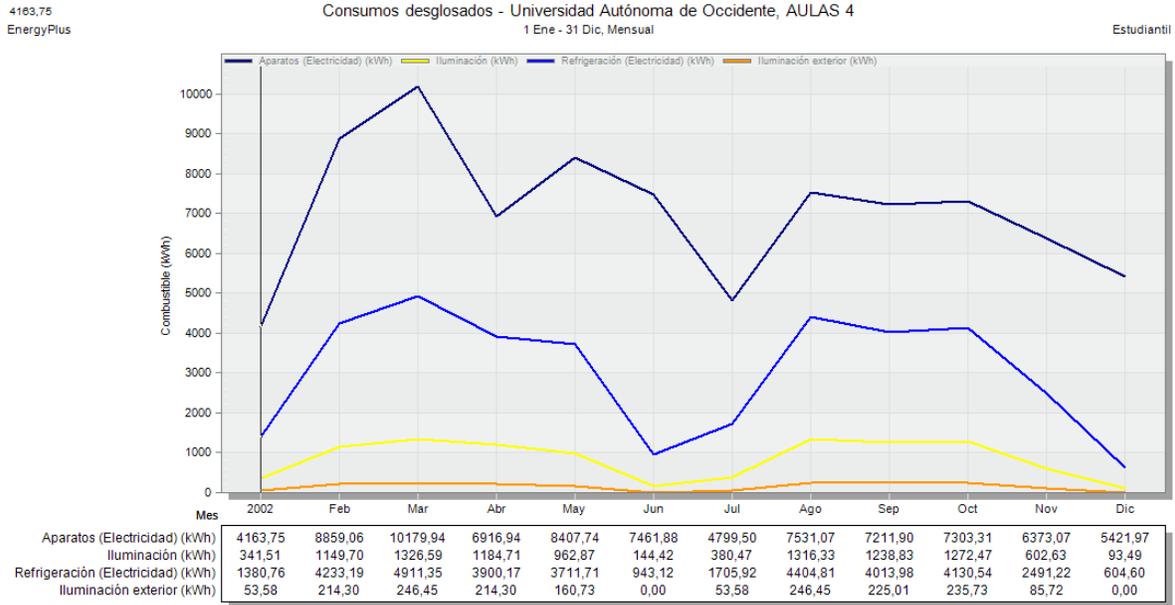


Figura 164. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE IV

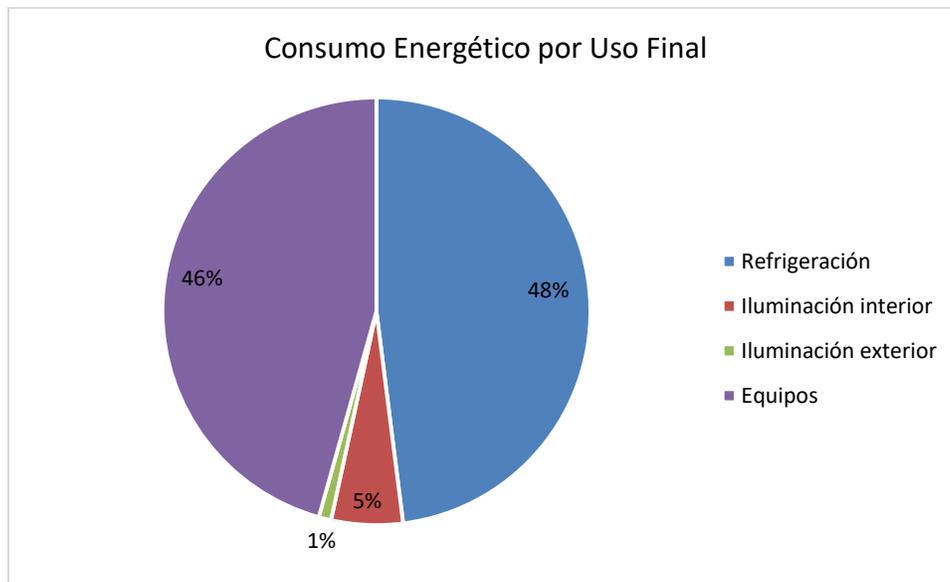


Figura 165. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE I

La Figura 166 muestra los consumos energéticos del edificio según cada uso final y su porcentaje de participación, de donde se obtiene que el consumo por iluminación exterior es de 1.735,82 kWh (0,94%), iluminación interior 10.014,02 kWh (5,40%), consumo por equipos ofimáticos de 84.630,13 kWh (45,66%), y el consumo por climatización de 88.979,93 kWh (48, %).

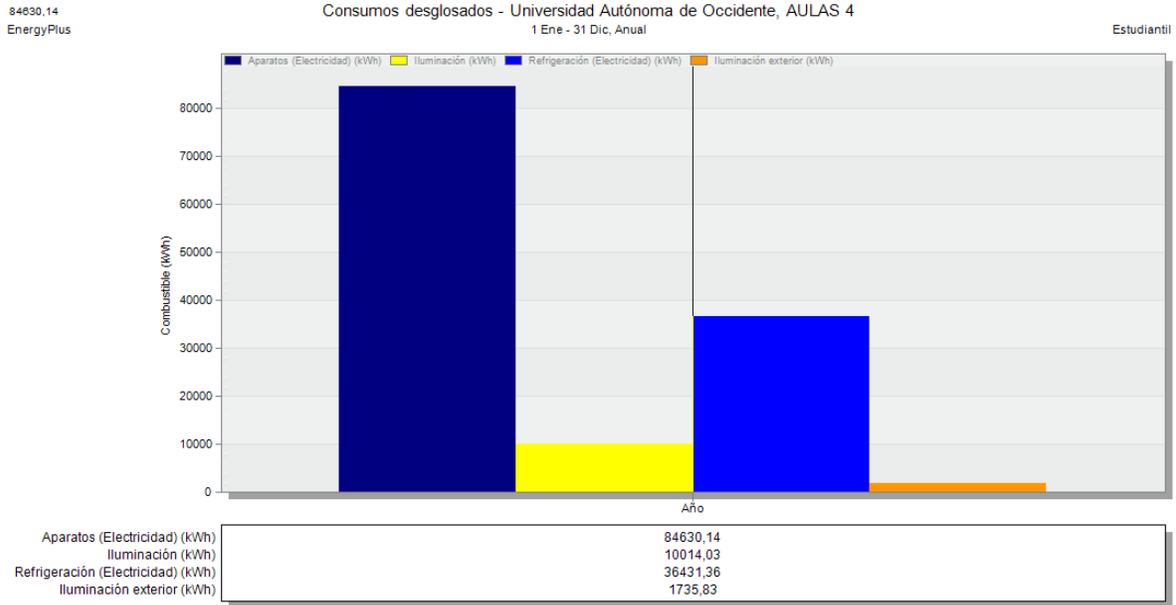


Figura 166. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual.

### Impacto Medioambiental – Emisiones de CO<sub>2</sub>

Se obtienen las emisiones de kg de CO<sub>2</sub> generados por las instalaciones, presentado de forma mensual y anual en la tabla 67 y la Figura 168.

Tabla 67. Producción mensual y anual de kg de CO<sub>2</sub> con MAE IV

Mes	kg de CO <sub>2</sub>
Enero	3599.4
Febrero	8760.48
Marzo	10098.57
Abril	7402.97
Mayo	8025.27
Junio	5180.94
Julio	4205.31
Agosto	8180.18
Septiembre	7689.97
Octubre	7842.87
Noviembre	5788.89
Diciembre	3708.75
<b>Total</b>	<b>80483.6</b>

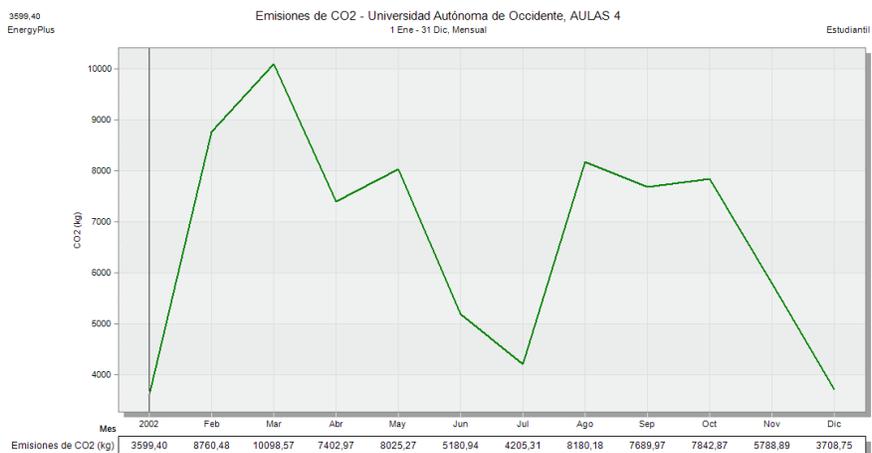


Figura 167. Emisiones de CO<sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE IV

**6.4.1. Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE IV**

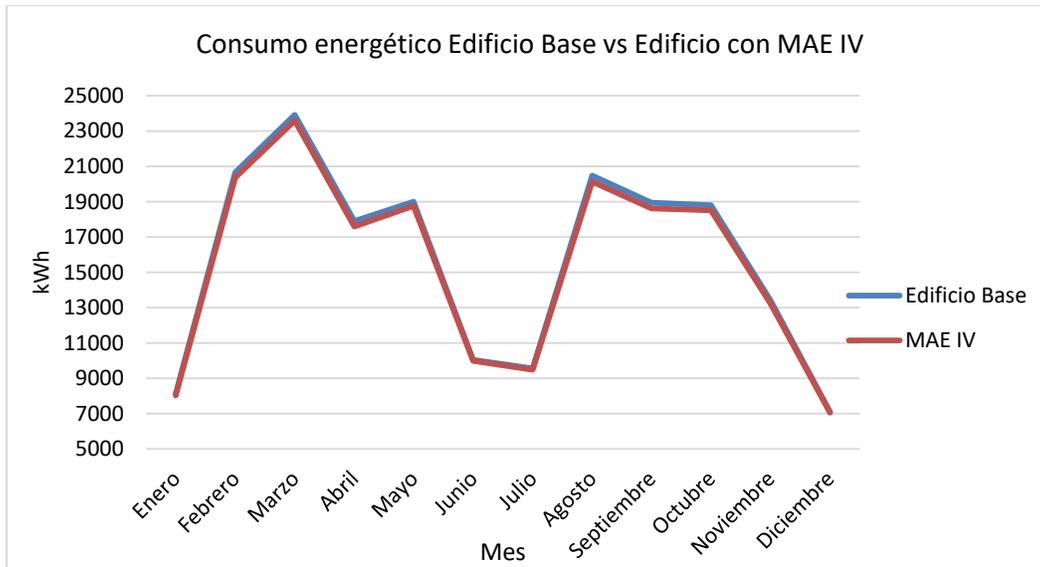


Figura 168. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con MAE IV.

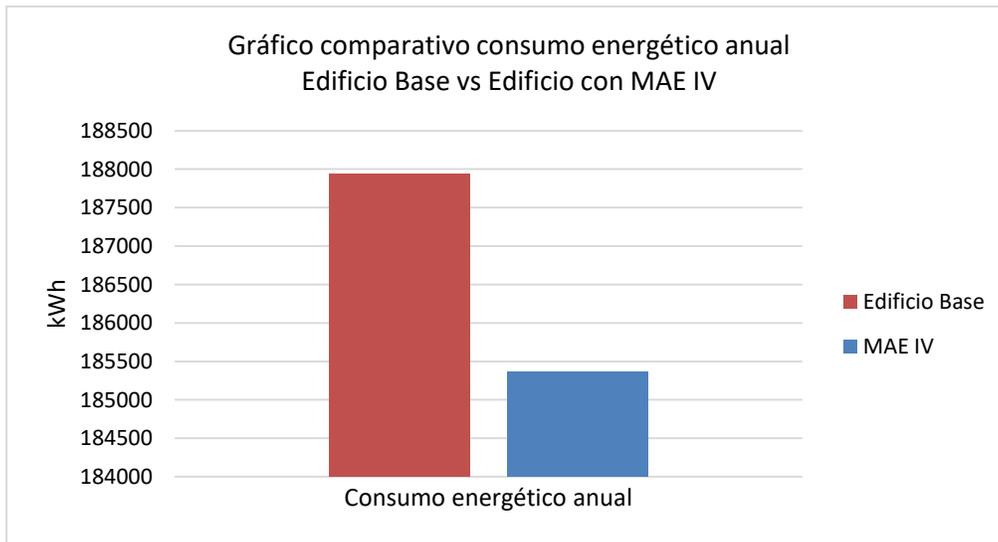


Figura 169. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con MAE IV

De acuerdo con los datos obtenidos, se observa una reducción en el consumo por aire acondicionado, ya que se reduce la carga térmica mediante el sombreado de los acristalamientos mediante vidrio electrocrómico, logrando así una reducción del 1,37% del consumo total anual del edificio lo que se traduce a casi la mitad del consumo energético total presentado en el mes de diciembre del mismo año, dejando entrever la importancia y lo conveniente de la implementación de esta solución a la mejora de la eficiencia energética.

## 6.5. MAE V – FILTROS SOLARES Y SOMBRAS – VOLADIZOS

En aras de mejorar la eficiencia energética del edificio, se implementaron voladizos por encima de las ventanas con el fin de reducir el impacto de los rayos UV en el acristalamiento del edificio y así reducir la carga térmica interna del mismo. A continuación, se presentan en las Figuras 170 – 173 los resultados obtenidos al realizar la simulación energética de esta propuesta.

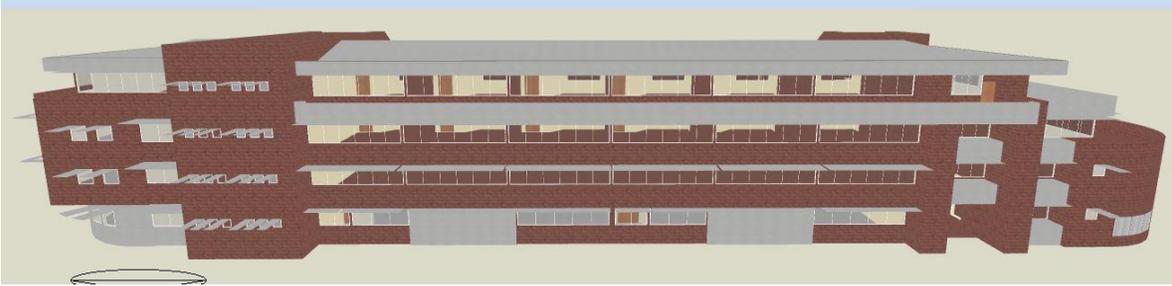


Figura 170. Vista norte del edificio con implementación de voladizos



Figura 171. Vista sur del edificio con implementación de voladizos



Figura 172. Vista oeste del edificio con implementación de voladizos



Figura 173. Vista este del edificio con implementación de voladizos

La Figura 174 presenta la evolución del consumo de energía del edificio por meses bajo la implementación de voladizos, en un año meteorológico tipo y observándose que los meses de menor consumo energético corresponden a enero, junio, Julio y diciembre debido a una época vacacional.

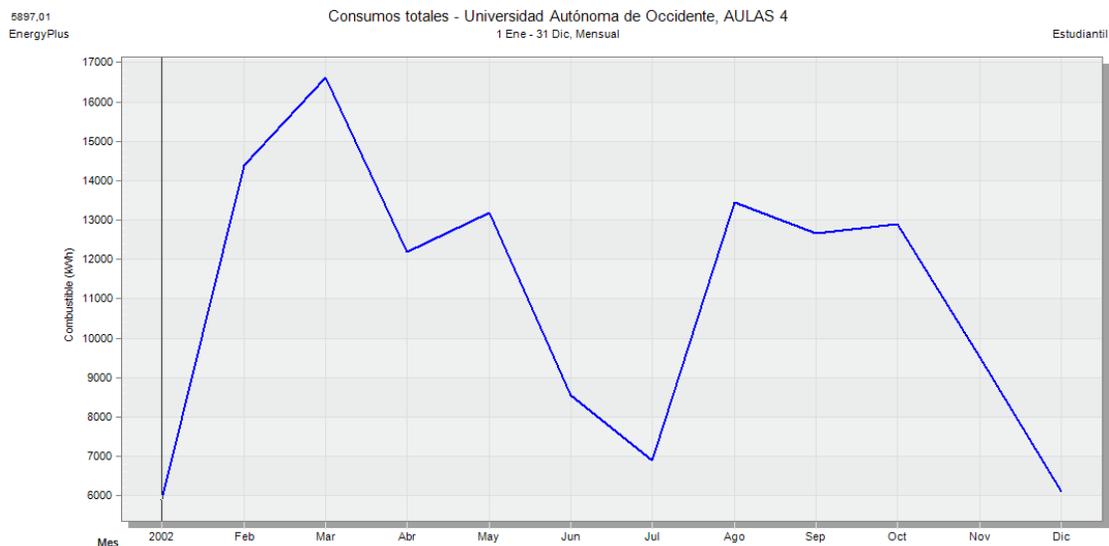


Figura 174. Distribución de consumo energético anual con MAE V implementada

La Tabla 68 desglosa el consumo total anual de energía del edificio con la implementación de voladizos según el tipo de uso. En la Tabla 69, se presenta la distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes, donde se observa que el porcentaje de mayor consumo son los equipos de refrigeración.

Tabla 68. Distribución de consumos energéticos por uso.

TIPO DE USO	ELECTRICIDAD (kWh)	PORCENTAJE DE CARGA (%)
Enfriamiento	87768.23	47.66
Iluminación interior	10014.02	5.44
Iluminación exterior	1735.82	0.94
Equipos interiores	84630.10	45.96
<b>CONSUMO TOTAL (kWh)</b>	<b>184148.17</b>	<b>100</b>

Tabla 69. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.

Mes	Refrigeración	Iluminación interior	Iluminación exterior	Equipos	Total (kwh)	Consumo kwh/día	consumo mes
Enero	3355.98	341.51	53.58	4163.72	7914.79	255.32	4.3%
Febrero	10009.33	1149.70	214.30	8859.06	20232.39	722.59	11.0%
Marzo	11726.61	1326.59	246.44	10179.94	23479.58	757.41	12.8%
Abril	9189.81	1184.71	214.30	6916.94	17505.76	583.53	9.5%
Mayo	9110.39	962.87	160.72	8407.74	18641.72	601.35	10.1%
Junio	2351.26	144.42	0.00	7461.88	9957.56	331.92	5.4%
Julio	4121.41	380.47	53.58	4799.50	9354.96	301.77	5.1%
Agosto	10926.50	1316.33	246.44	7531.07	20020.34	645.82	10.9%
Septiembre	9880.83	1238.83	225.01	7211.90	18556.57	618.55	10.1%
Octubre	9525.09	1272.47	235.73	7303.31	18336.60	591.50	10.0%
Noviembre	6052.74	602.63	85.72	6373.07	13114.16	423.04	7.1%
Diciembre	1518.28	93.49	0.00	5421.97	7033.74	234.46	3.8%

Las Figuras 175 y 176., muestran la distribución de consumo anual simulado y la distribución porcentual por consumos para el año 2017 bajo la implementación de voladizos respectivamente.

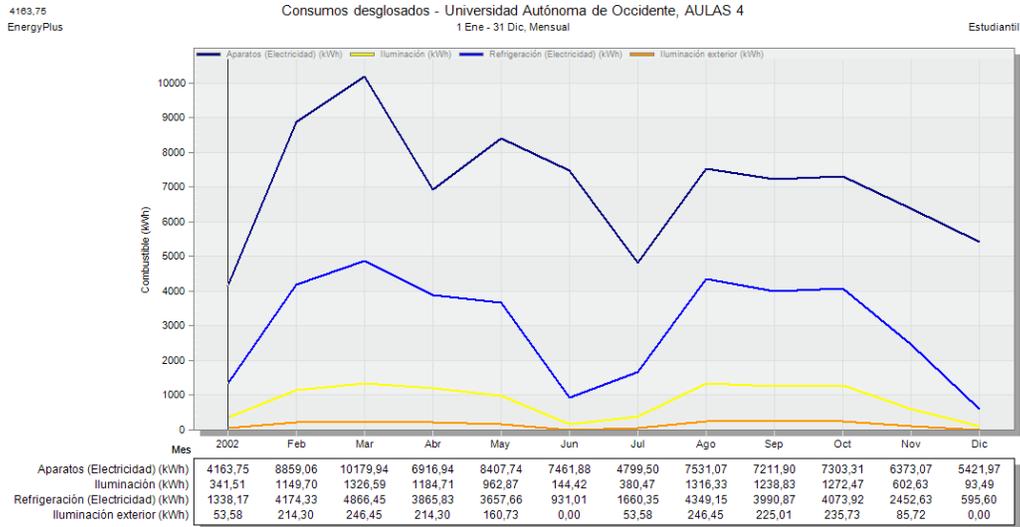


Figura 175. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE V

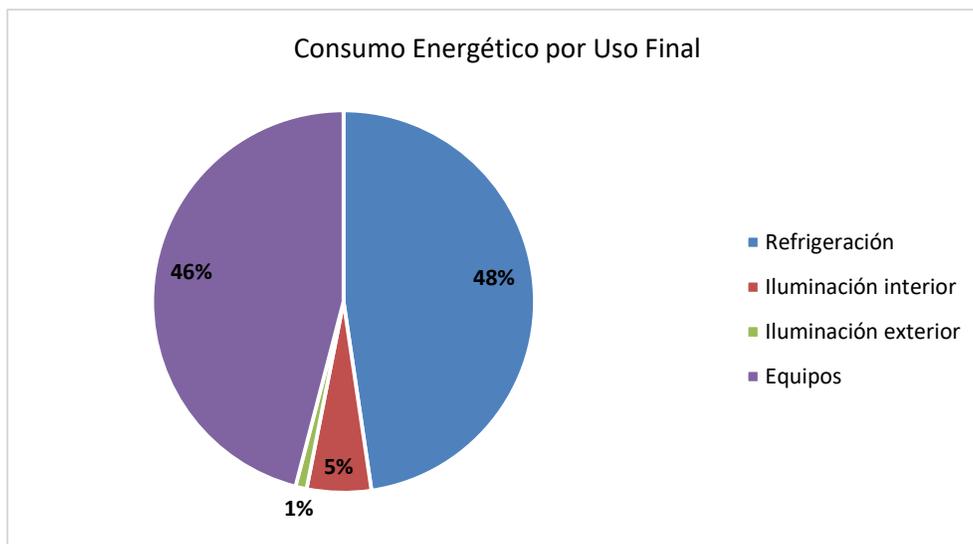


Figura 176. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE V

La Figura 177 muestra los consumos energéticos del edificio según cada uso final y su porcentaje de participación, de donde se obtiene que el consumo por iluminación exterior es de 1.735,82 kWh (0,94%), iluminación interior 10.014,02 kWh (5,44%), consumo por equipos ofimáticos de 84.630,13 kWh (45,96%), y el consumo por climatización de 87.768,23 que representa el 47,66%.

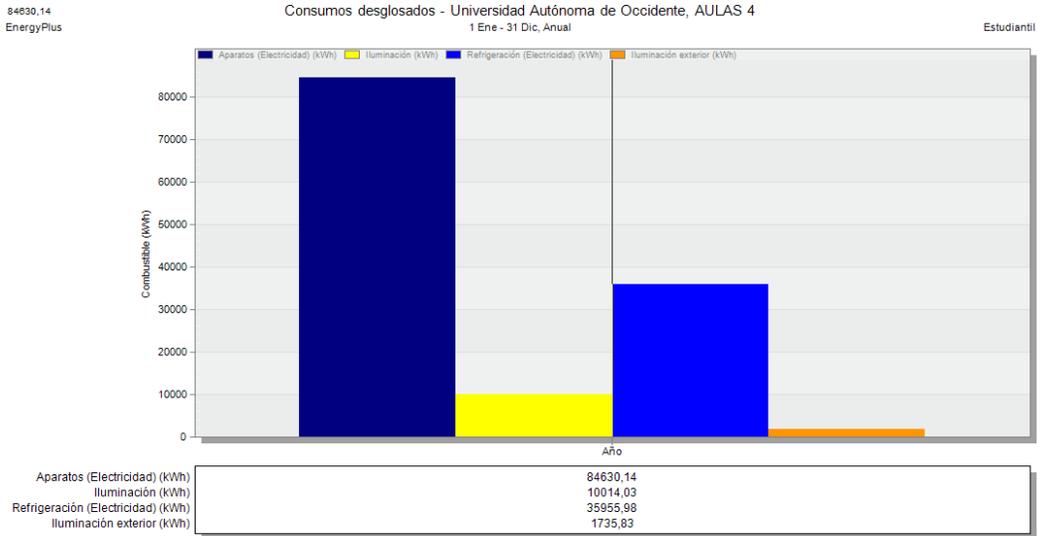


Figura 177. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual implementando MAE V.

### Impacto Medioambiental – Emisiones de CO<sub>2</sub>

Se obtienen las emisiones de kg de CO<sub>2</sub> generados por las instalaciones, presentado de forma mensual y anual en la tabla y la Figura 178.

Tabla 70. Producción mensual y anual de kg de CO<sub>2</sub> con MAE V

Mes	kg de CO <sub>2</sub>
Enero	3573.59
Febrero	8724.82
Marzo	10071.36
Abril	7382.16
Mayo	7992.52
Junio	5173.61
Julio	4177.69
Agosto	8146.44
Septiembre	7675.96
Octubre	7808.57
Noviembre	5765.51
Diciembre	3703.3
<b>Total</b>	<b>80195.53</b>

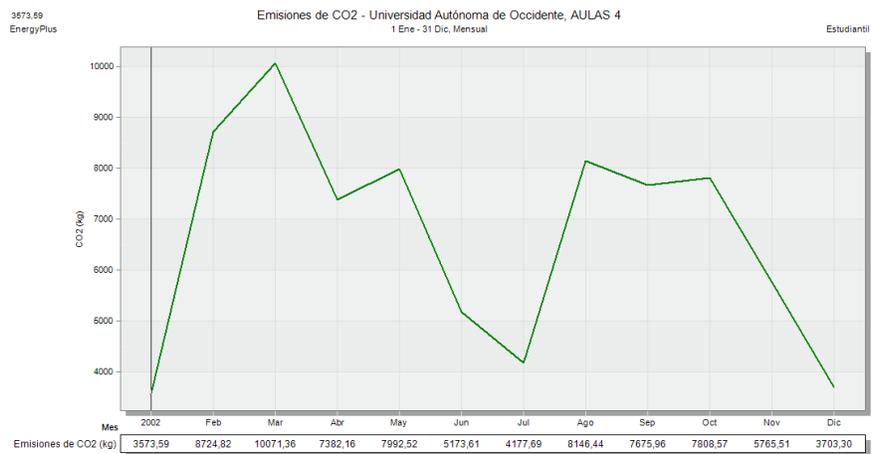


Figura 178. Emisiones de CO<sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE V

**6.5.1. Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE V**

Las Figuras 179 y 180 comparan los consumos energéticos del Edificio base y el Edificio con la Medida de Ahorro Energético V (implementación de voladizos)

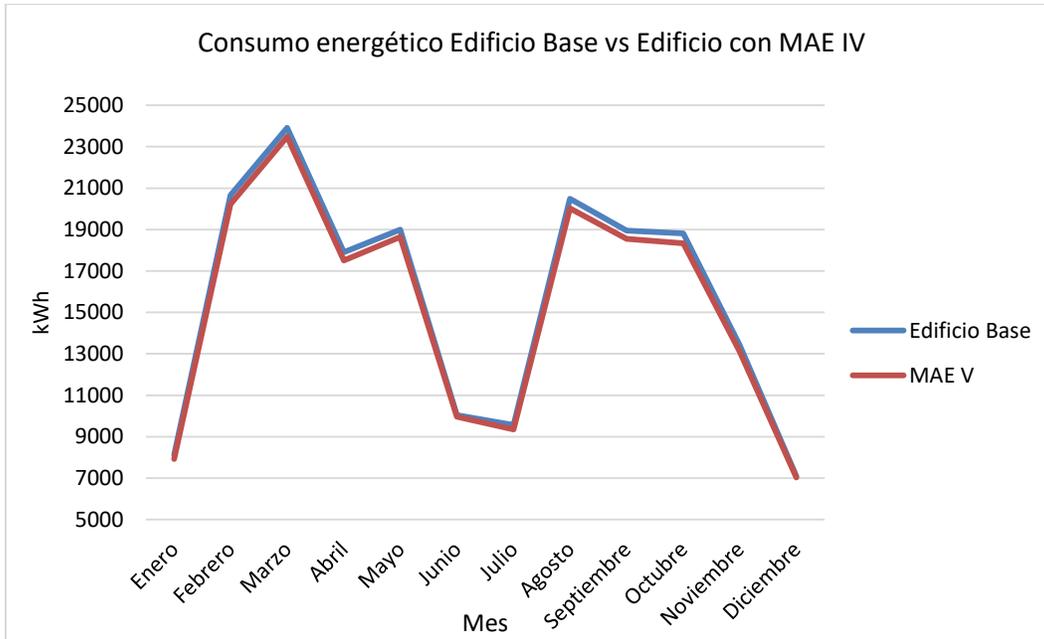


Figura 179. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con la MAE V.

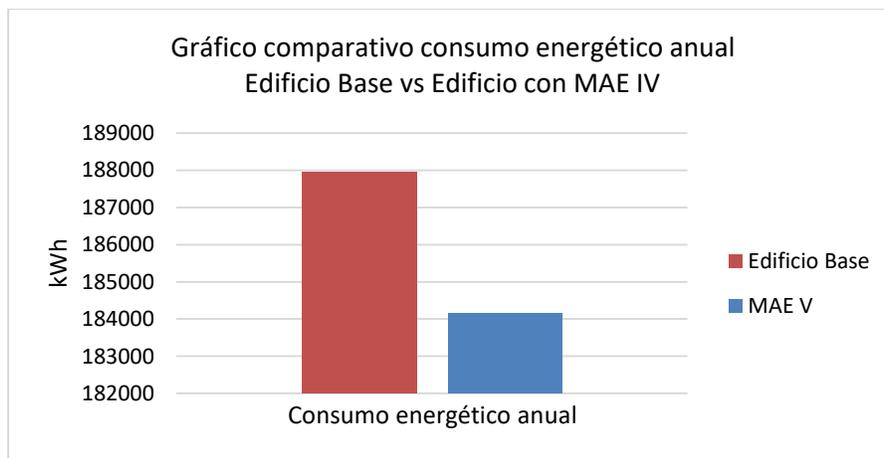


Figura 180. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con la MAE V.

Al implementar la estrategia de voladizos, se obtuvo una reducción en el consumo por aire acondicionado del 2,42% del consumo total anual del edificio lo que se traduce a un poco más del consumo energético total presentado en el mes de diciembre del mismo año, dejando entrever la importancia y lo conveniente de la implementación de esta solución a la mejora de la eficiencia energética.

## 6.6. MAE VI – FILTROS SOLARES Y SOMBRAS – PERSIANAS REFLECTIVAS

Otra estrategia que implementar en aras de la mejora de la eficiencia energética es la implementación de persianas reflectivas ubicadas en el interior de los recintos para reducir el impacto de los rayos UV en el acristalamiento del edificio y así reducir la carga térmica interna del edificio. Se realizó la simulación energética implementando las persianas reflectivas y se obtuvo que febrero y marzo fueron los meses de mayor consumo bajo esta MAE, como lo muestra la Figura 181.

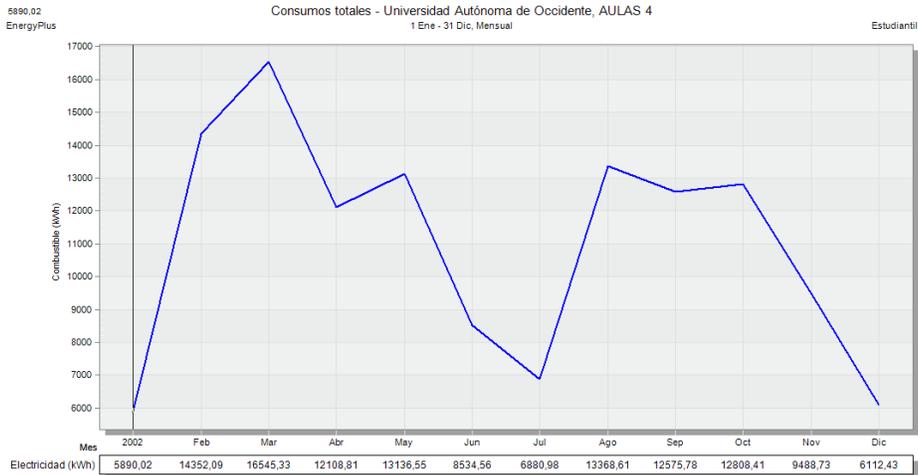


Figura 181. Distribución de consumo energético anual con MAE VI.

A continuación, se desglosa el consumo total anual de energía del edificio con la implementación de persianas reflectivas según el tipo de uso, como lo muestra la Tabla 71. La Tabla 72, muestra la distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes, donde se observa que el mayor consumo de energía es de los equipos de refrigeración.

Tabla 71. Distribución de consumos energéticos por uso.

TIPO DE USO	ELECTRICIDAD (kWh)	PORCENTAJE DE CARGA (%)
Enfriamiento	86492,26	47,30
Iluminación interior	10014,02	5,48
Iluminación exterior	1735,82	0,95
Equipos interiores	84630,13	46,28
<b>CONSUMO TOTAL (kWh)</b>	<b>182872,23</b>	<b>100</b>

Tabla 72. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.

Mes	Refrigeración	Iluminación interior	Iluminación exterior	Equipos	Total (kwh)	Consumo kwh/día	consumo mes
Enero	3340.47	341.51	53.58	4163.75	7899.31	254.82	4.3%
Febrero	9922.68	1149.70	214.30	8859.06	20145.74	719.49	11.0%
Marzo	11564.19	1326.59	246.44	10179.94	23317.16	752.17	12.8%
Abril	9005.64	1184.71	214.30	6916.94	17321.59	577.39	9.5%

<b>Mayo</b>	8995.12	962.87	160.72	8407.74	18526.45	597.63	10.1%
<b>Junio</b>	2340.99	144.42	0.00	7461.88	9947.29	331.58	5.4%
<b>Julio</b>	4091.94	380.47	53.58	4799.50	9325.49	300.82	5.1%
<b>Agosto</b>	10727.70	1316.33	246.44	7531.07	19821.54	639.40	10.8%
<b>Septiembre</b>	9654.07	1238.83	225.01	7211.90	18329.81	610.99	10.0%
<b>Octubre</b>	9334.32	1272.47	235.73	7303.31	18145.83	585.35	9.9%
<b>Noviembre</b>	5993.43	602.63	85.72	6373.07	13054.85	421.12	7.1%
<b>Diciembre</b>	1521.71	93.49	0.00	5421.97	7037.17	234.57	3.8%

Las figuras 182 y 183, presentan la distribución de consumo anual simulado y la distribución porcentual por consumos bajo la implementación de persianas reflectivas en el edificio para el año 2017 respectivamente.

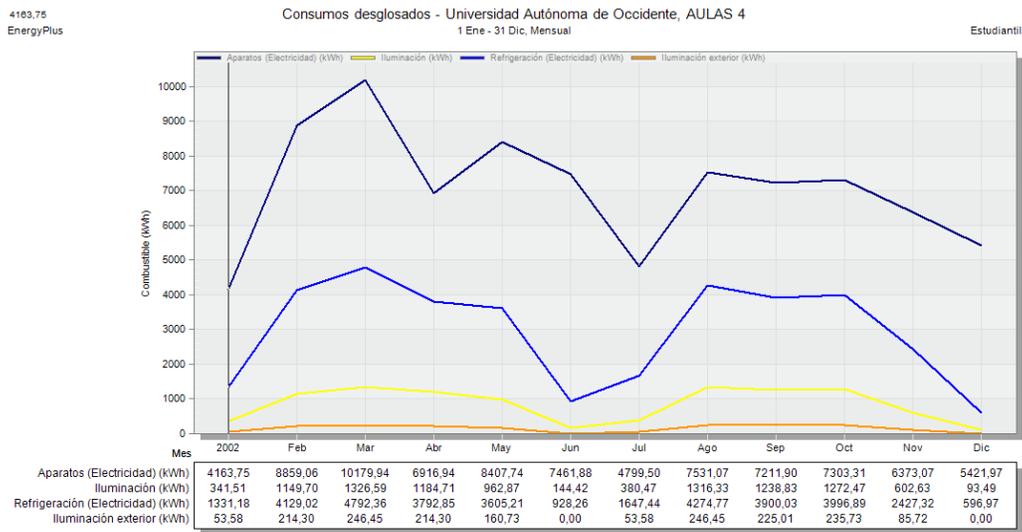


Figura 182. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE VI

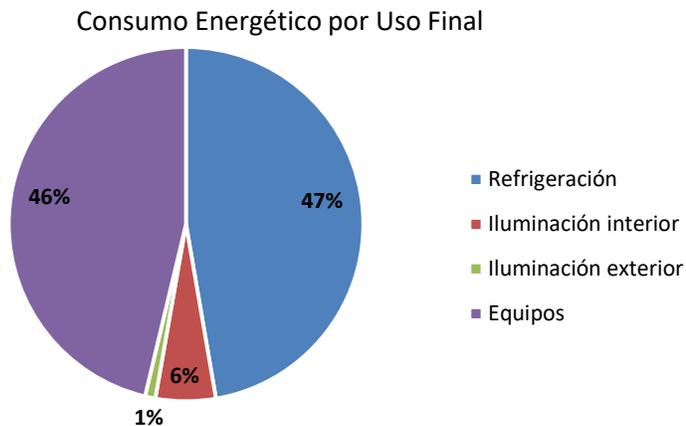


Figura 183. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE VI

La Figura 184 presenta los consumos energéticos del edificio según cada uso final y su porcentaje de participación, donde se obtiene que el consumo por iluminación exterior es de 1.735,82 kWh (0,95%), iluminación interior 10.014,02 kWh (5,48%), consumo por equipos ofimáticos de 84.630,13 kWh (46,28%), y el consumo por climatización de 86492,26 que supone un 47,30%.

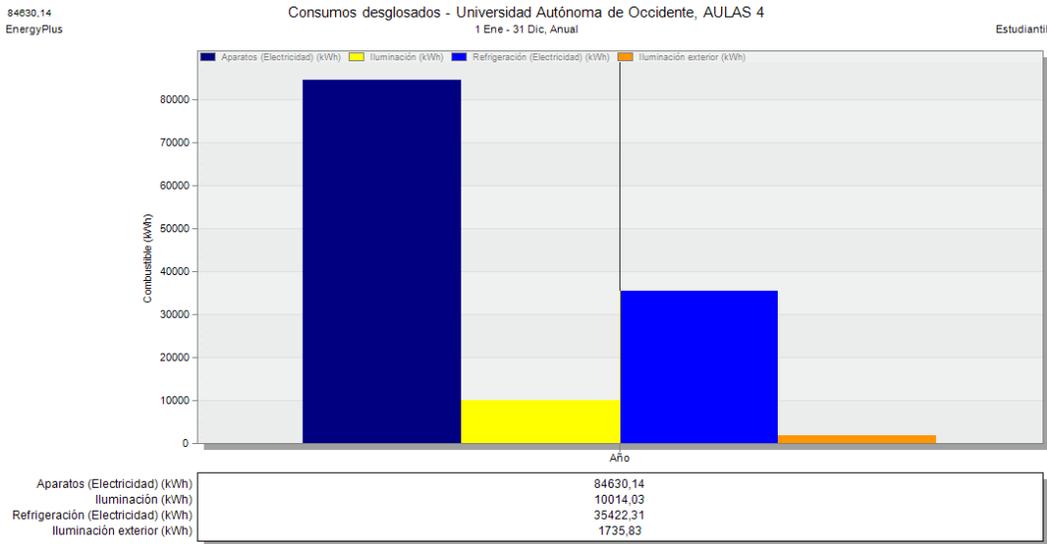


Figura 184. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual.

### Impacto Medioambiental – Emisiones de CO<sub>2</sub>

Se obtienen las emisiones de kg de CO<sub>2</sub> generados por las instalaciones, presentado de forma mensual y anual en la Figura 185 y la tabla 73.

Tabla 73. Producción mensual y anual de kg de CO<sub>2</sub> con MAE VI

Mes	kg de CO <sub>2</sub>
Enero	3569.35
Febrero	8697.36
Marzo	10026.46
Abril	7337.93
Mayo	7960.74
Junio	5171.94
Julio	4169.87
Agosto	8101.37
Septiembre	7620.92
Octubre	7761.89
Noviembre	5750.17
Diciembre	3701.13
<b>Total</b>	<b>79869.13</b>

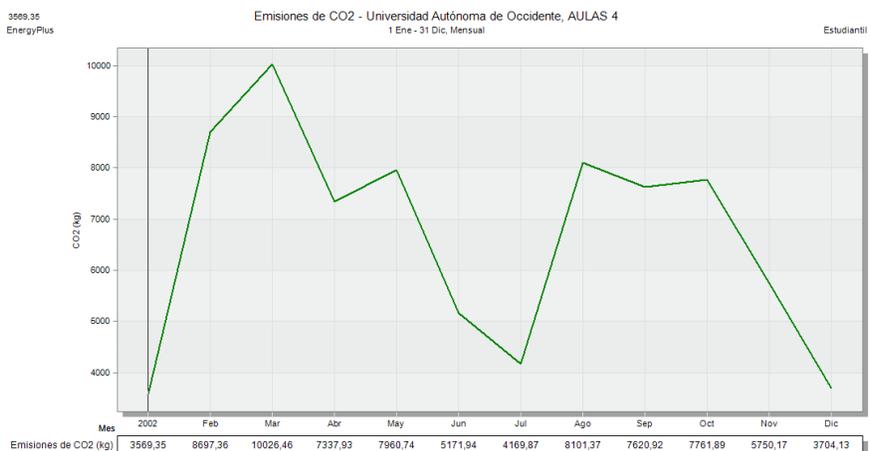


Figura 185. Emisiones de CO<sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE VI

**6.6.1. Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE VI**

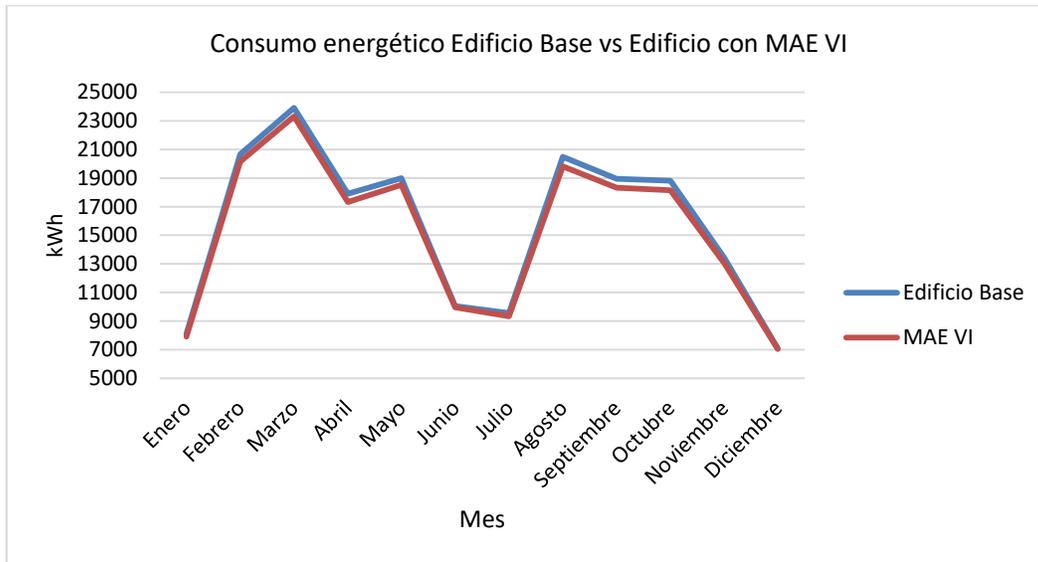


Figura 186. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con MAE VI.

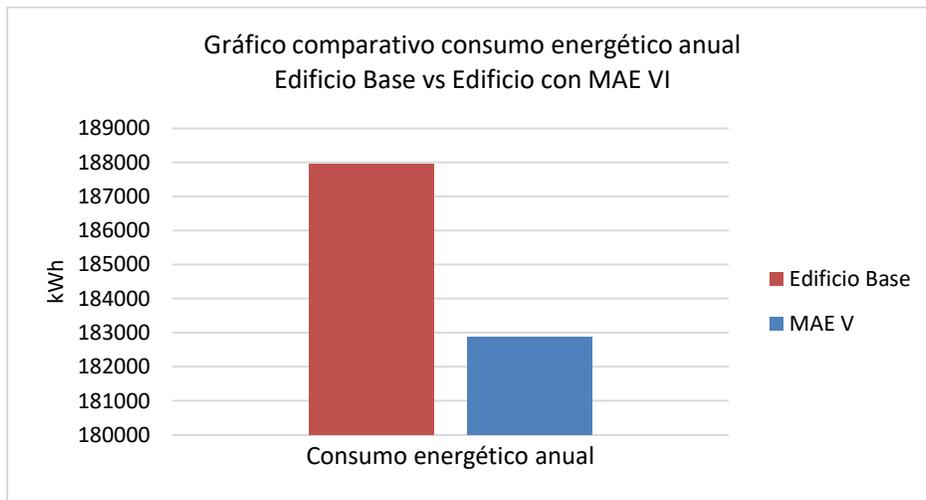


Figura 187. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con MAE VI

Los resultados presentados en las Figuras 186 y 187 muestran que al implementar esta estrategia, se obtiene una reducción en el consumo por aire acondicionado, pues se ha reducido la carga térmica debida al sombreado de los acristalamientos al usar los sistemas de persianas reflectivas, logrando una reducción del 2,70% del consumo total anual del edificio lo que se traduce a un poco más del consumo energético total presentado en el mes de diciembre del mismo año, dejando entrever la importancia y lo conveniente de la implementación de esta solución a la mejora de la eficiencia energética.

### 6.7. MAE VII – FILTROS SOLARES Y SOMBRAS – PELICULAS PROTECTORAS

Otra estrategia que se implementó en aras de la mejora de la eficiencia energética son las películas protectoras en el acristalamiento del edificio, para reducir la radiación solar en el edificio, evitando así el incremento de la carga térmica de cada recinto. Al implementar y simular esta estrategia, se obtuvo la curva de consumo energético anual presentado en la Figura 188.

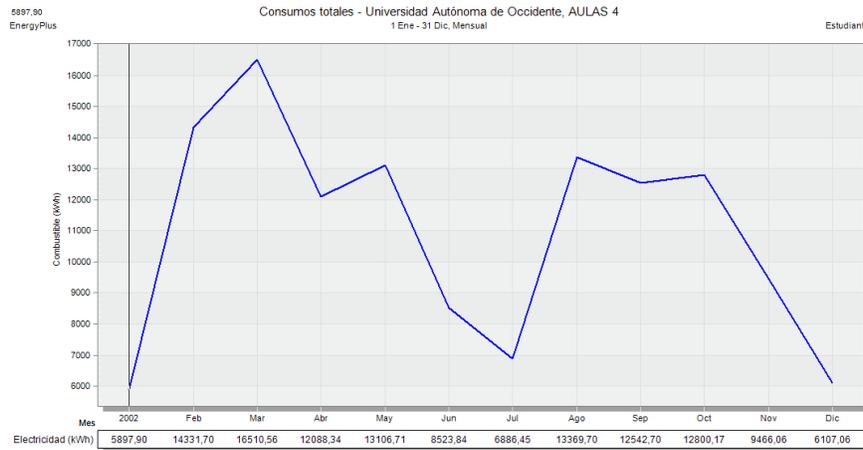


Figura 188. Distribución de consumo energético anual con MAE VII.

A continuación, se desglosa el consumo total anual de energía del edificio con la implementación de películas protectoras según el tipo de uso, como lo muestra la Tabla 74. La Tabla 74, muestra la distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes, donde se observa que el mayor consumo de energía es de los equipos de refrigeración.

Tabla 74. Distribución de consumos energéticos por uso.

TIPO DE USO	ELECTRICIDAD (kWh)	PORCENTAJE DE CARGA (%)
Refrigeración	86292,56	47,24
Iluminación interior	10014,02	5,48
Iluminación exterior	1735,82	0,95
Equipos interiores	84630,76	46,33
<b>CONSUMO TOTAL (kWh)</b>	<b>182673,16</b>	<b>100</b>

Tabla 75. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.

Mes	Refrigeración	Iluminación interior	Iluminación exterior	Equipos	Total (kwh)	Consumo kwh/día	consumo mes
Enero	3362.41	341.51	53.58	4163.75	7921.25	255.52	4.3%
Febrero	9891.50	1149.70	214.30	8859.06	20114.56	718.38	11.0%
Marzo	11502.45	1326.59	246.44	10179.94	23255.42	750.17	12.7%
Abril	8997.63	1184.71	214.30	6916.94	17313.58	577.12	9.5%
Mayo	8927.20	962.87	160.72	8407.74	18458.53	595.44	10.1%
Junio	2318.25	144.42	0.00	7461.88	9924.55	330.82	5.4%

<b>Julio</b>	4116.05	380.47	53.58	4799.50	9349.60	301.60	5.1%
<b>Agosto</b>	10725.86	1316.33	246.44	7531.07	19819.70	639.35	10.8%
<b>Septiembre</b>	9588.30	1238.83	225.01	7211.90	18264.04	608.80	10.0%
<b>Octubre</b>	9401.19	1272.47	235.73	7303.31	18212.70	587.51	10.0%
<b>Noviembre</b>	5956.27	602.63	85.72	6373.70	13018.32	419.95	7.1%
<b>Diciembre</b>	1505.45	93.49	0.00	5421.97	7020.91	234.03	3.8%

En las Figuras 189 y 190, se presentan la distribución de consumo anual simulado y la distribución porcentual por consumos bajo la implementación de películas protectoras en el edificio para el año 2017 respectivamente.

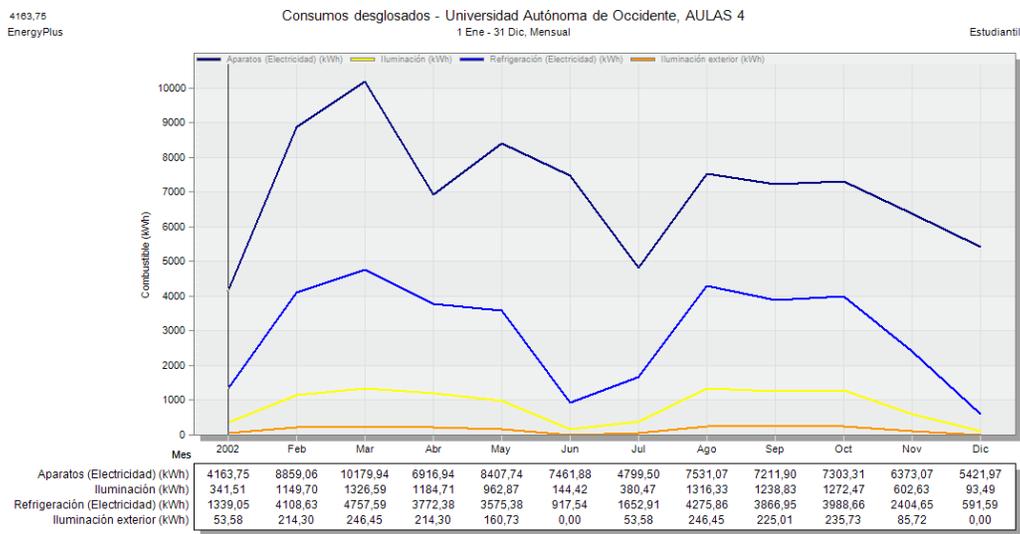


Figura 189. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE VII

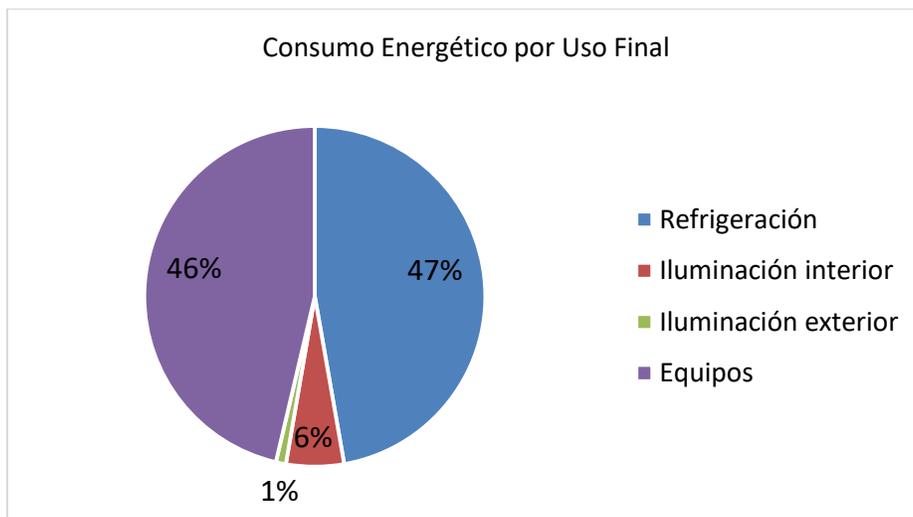


Figura 190. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE VII

La Figura 191 presenta los consumos energéticos del edificio según cada uso final y su porcentaje de participación, donde se obtiene que el consumo por iluminación exterior es de 1.735,82 kWh (0,95%), iluminación interior 10.014,02 kWh (5,48%), consumo por equipos ofimáticos de 84.630,76 kWh (46,33%), y el consumo por climatización de 86292,56 que representa el 47,24%.

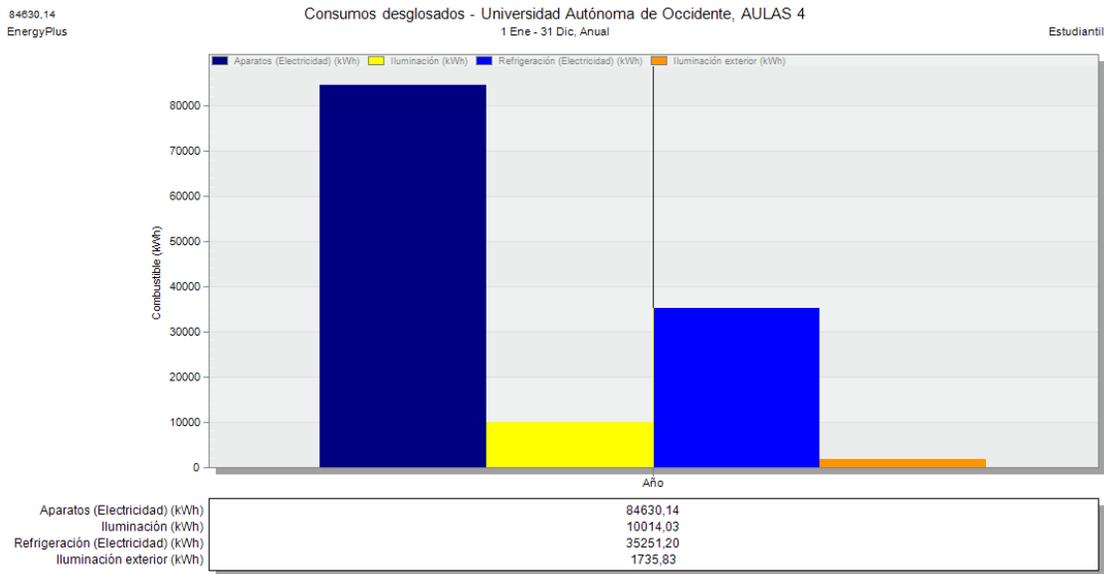


Figura 191. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual.

### Impacto Medioambiental – Emisiones de CO<sub>2</sub>

Se obtienen las emisiones de kg de CO<sub>2</sub> generados por las instalaciones, presentado de forma mensual y anual en la Tabla 76 y la Figura 192.

Tabla 76. Producción mensual y anual de kg de CO<sub>2</sub> con MAE VII

Mes	kg de CO <sub>2</sub>
Enero	3574.12
Febrero	8685
Marzo	10005.39
Abril	7325.53
Mayo	7942.66
Junio	5165.44
Julio	4173.18
Agosto	8102.03
Septiembre	7600.87
Octubre	7756.9
Noviembre	5736.43
Diciembre	3700.87
<b>Total</b>	<b>79768.42</b>

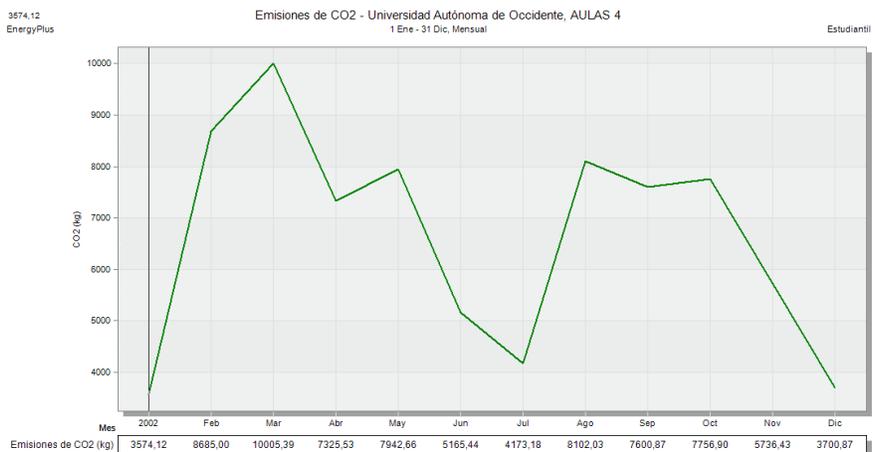


Figura 192. Emisiones de CO<sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE VII

**6.7.1. Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE VII**

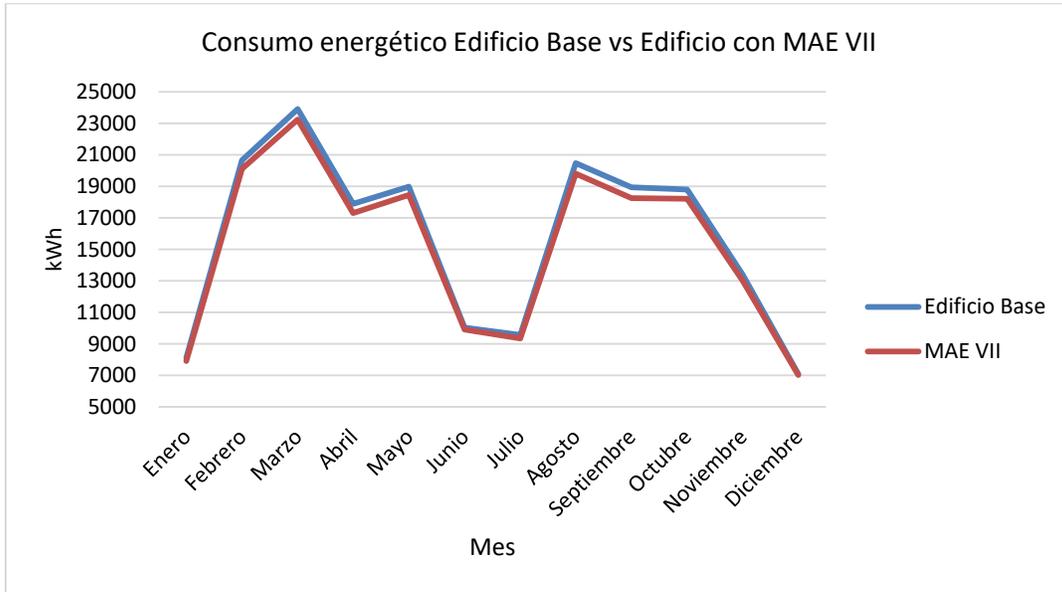


Figura 193. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con MAE VII.

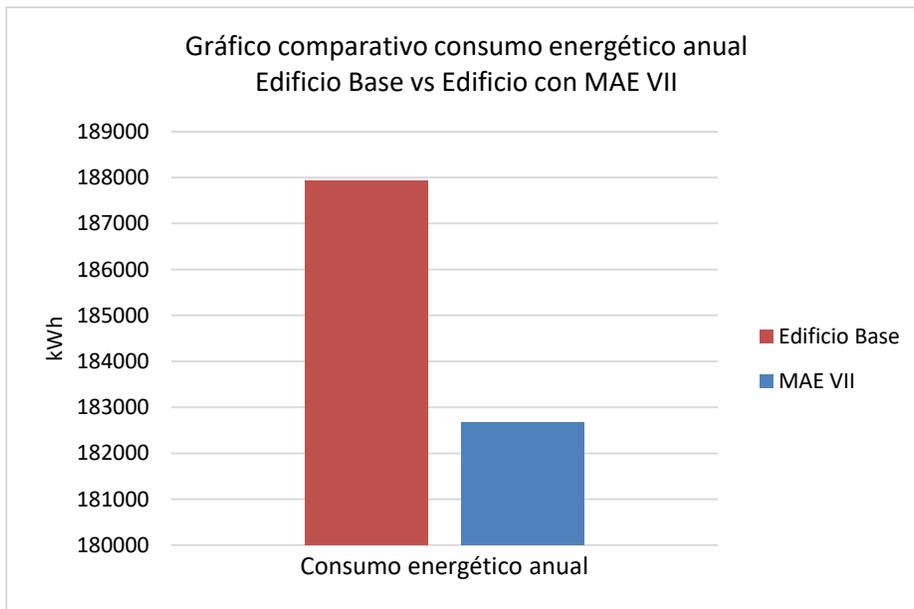


Figura 194. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con MAE VII

De acuerdo con los datos obtenidos y presentados en las Figuras 193 y 194 se observa una reducción en el consumo por aire acondicionado, pues se redujo la carga térmica debida al sombreado de los acristalamientos, obteniendo una reducción del 2,80% del consumo total anual del edificio lo que se traduce a un poco más del consumo energético total presentado en el mes de diciembre del mismo año, dejando entrever la importancia y lo conveniente de la implementación de esta solución a la mejora de la eficiencia energética.

## 6.8. MAE VIII – IMPLEMENTACIÓN DE TODAS LAS MAE'S PROPUESTAS

Como etapa final de simulación, se implementaron las 6 MAE's y el rediseño del sistema de iluminación interior presentadas anteriormente en el edificio de aulas 4 (Acondicionamiento de todas las aulas y oficinas del edificio, rediseño del sistema de iluminación, sistema de lamas, vidrio electrocrómico, voladizos, persianas reflectivas y película protectora).

La Figura 195 presenta los datos obtenidos al realizar la simulación energética del edificio con las propuestas de mejora, donde se muestra la evolución del consumo de energía del edificio por meses, en un año meteorológico tipo y observándose que los meses de menor consumo energético corresponden a enero, junio, Julio y diciembre debido a una época vacacional y el de mayor consumo para los meses de febrero y marzo.

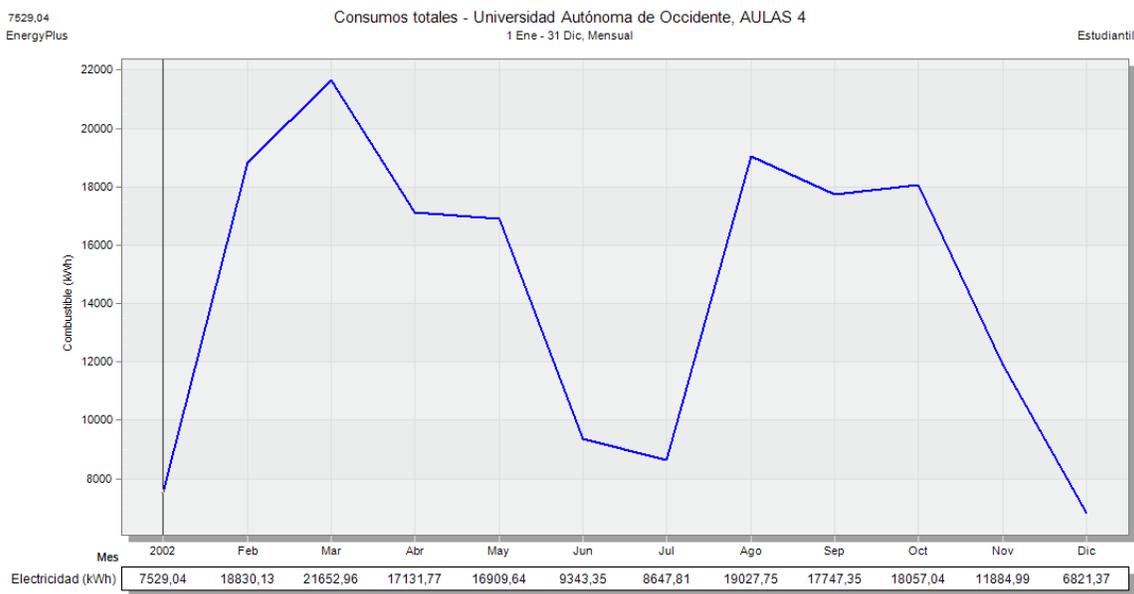


Figura 195. Distribución de consumo energético anual.

A continuación, se desglosa el consumo total anual de energía del edificio con la implementación de las 6 MAE's y la inclusión del rediseño de iluminación por calidad ambiental de acuerdo con el tipo de uso, como lo muestra la Tabla 77. En la Tabla 78, se presenta la distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes, donde se observa que el porcentaje de consumo mayor es de equipos ofimáticos, seguido de la refrigeración. Dicha distribución se repite en la mayor parte de los casos vistos anteriormente.

Tabla 77. Distribución de consumos energéticos por uso.

TIPO DE USO	ELECTRICIDAD (kWh)	PORCENTAJE DE CARGA (%)
<b>Enfriamiento</b>	68004,88	39,3
<b>Iluminación interior</b>	13421,92	7,8
<b>Iluminación exterior</b>	1735,82	1,0

<b>Equipos interiores</b>	84630,13	49,0
<b>Extractores</b>	5036,31	2,9
<b>CONSUMO TOTAL (kWh)</b>	<b>172829,06</b>	<b>100</b>

Tabla 78. Distribución de consumos energéticos desglosados mes a mes por uso.

Mes	Refrigeración	Iluminación interior	Iluminación exterior	Equipos	Extractores	Total (kwh)	Consumo kwh/día	consumo mes
Enero	2696.62	434.10	53.58	4163.75	164.36	7512.41	242.34	4.3%
Febrero	7452.42	1558.53	214.30	8859.06	595.31	18679.62	667.13	10.8%
Marzo	8608.06	1800.53	246.44	10179.94	679.57	21514.54	694.02	12.4%
Abril	7631.23	1616.52	214.30	6916.94	617.23	16996.22	566.54	9.8%
Mayo	6534.43	1296.92	160.72	8407.74	477.08	16876.89	544.42	9.8%
Junio	1688.27	155.11	0.00	7461.88	42.96	9348.22	311.61	5.4%
Julio	3135.46	473.79	53.58	4799.50	175.86	8638.19	278.65	5.0%
Agosto	8796.07	1783.25	246.44	7531.07	676.49	19033.32	613.98	11.0%
Septiembre	7951.33	1688.99	225.01	7211.90	643.84	17721.07	590.70	10.3%
Octubre	7915.66	1728.06	235.73	7303.31	650.77	17833.53	575.28	10.3%
Noviembre	4309.32	790.86	85.72	6373.07	285.29	11844.26	382.07	6.9%
Diciembre	1286.01	95.26	0.00	5421.97	27.55	6830.79	227.69	4.0%

Las Figuras 196 y 197, muestran la distribución de consumo anual simulado y la distribución porcentual por consumos para el año 2017 respectivamente.

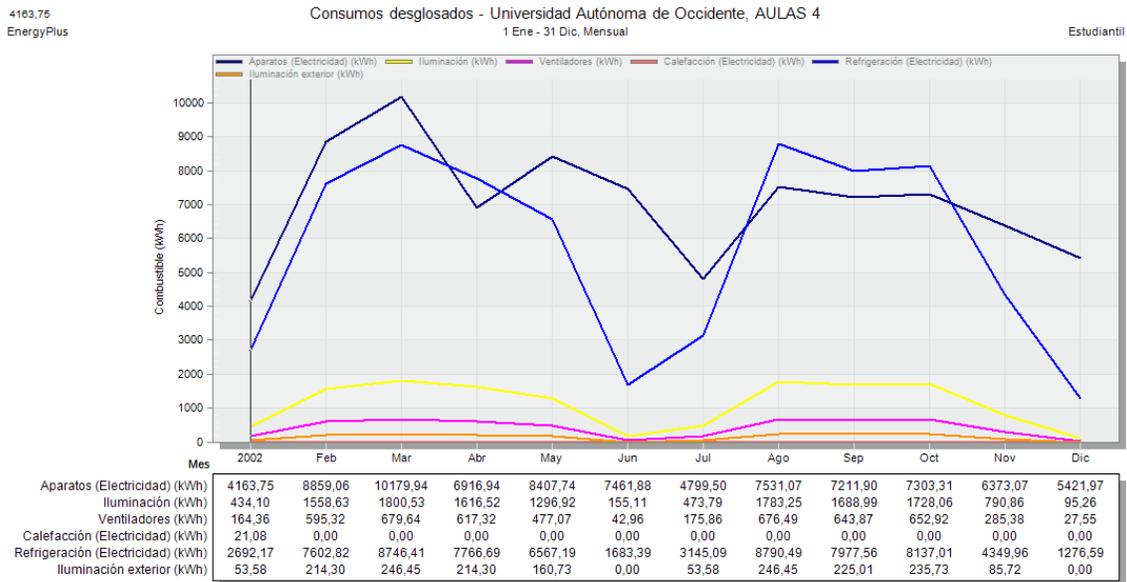


Figura 196. Distribución de consumo energético anual desglosado por uso final para MAE VIII

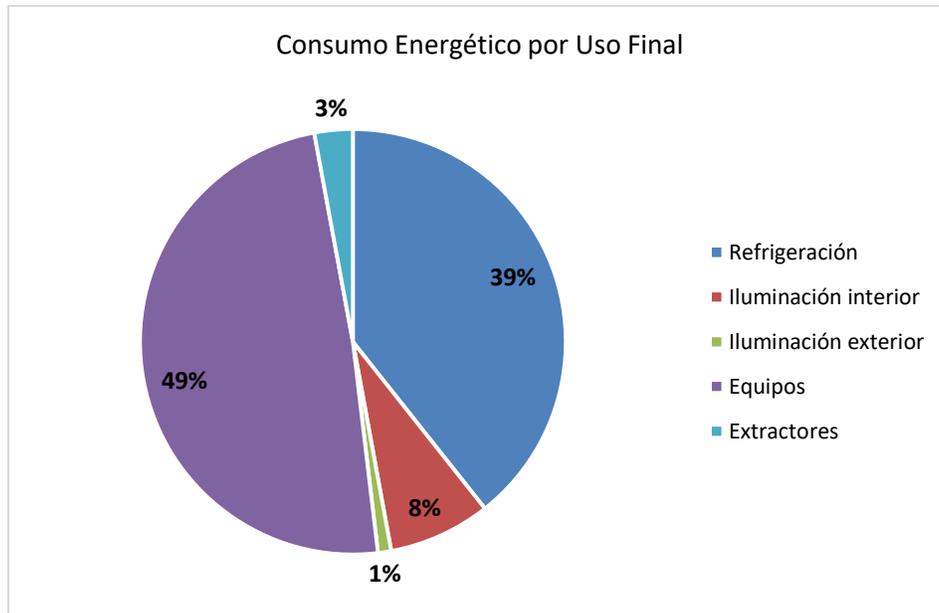


Figura 197. Distribución porcentual de consumo energético por uso final para MAE VIII

La Figura 198 presenta los consumos energéticos del edificio según cada uso final y su porcentaje de participación, de donde se obtiene que el consumo por iluminación exterior es de 1.735,82 kWh (1,0%), iluminación interior 13.421,92 kWh (7,8%), consumo por equipos ofimáticos de 84.630,13 kWh (49,0%), y el consumo por climatización de 68.004,88 kWh y extractores de 5.036,31 kWh que representa el supone un 42,3%.

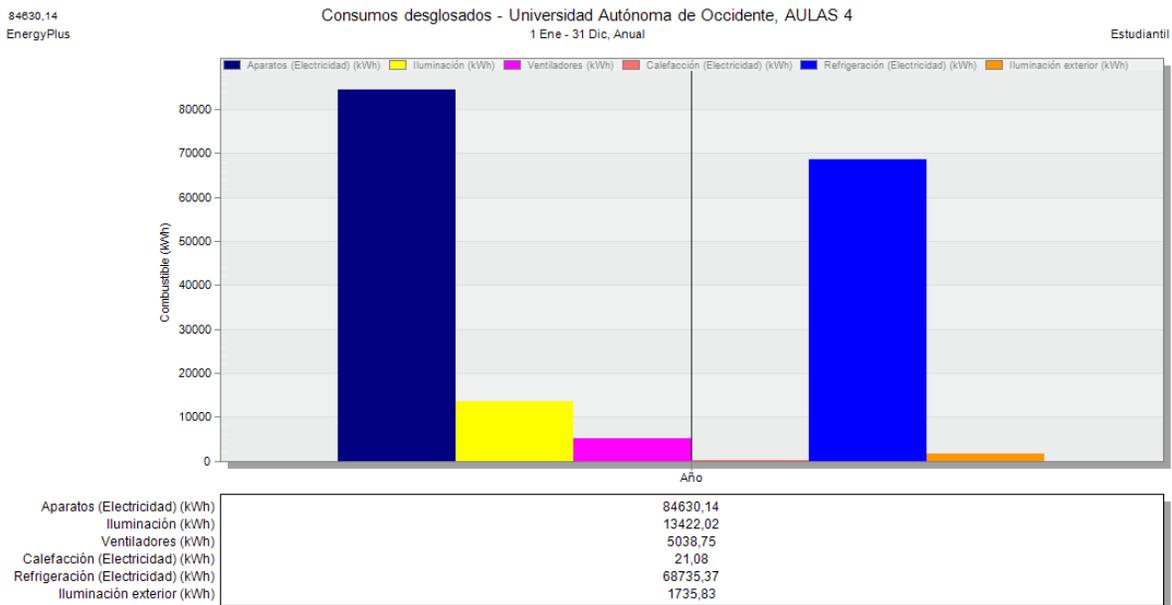


Figura 198. Diagrama de barras distribución del consumo energético anual.

**Impacto Medioambiental – Emisiones de CO<sub>2</sub>**

A continuación, se presentan las emisiones de kg de CO<sub>2</sub> generados por las instalaciones, presentado de forma mensual y anual en la Figura 199 y Tabla 79.

Tabla 79. Producción mensual y anual de kg de CO<sub>2</sub> con MAE VIII

Mes	kg de CO <sub>2</sub>
Enero	4562.59
Febrero	11411.05
Marzo	13121.68
Abril	10381.84
Mayo	10247.23
Junio	5662.06
Julio	5240.57
Agosto	11530.8
Septiembre	10754.88
Octubre	10942.55
Noviembre	7202.3
Diciembre	4133.74
<b>Total</b>	<b>105191.29</b>

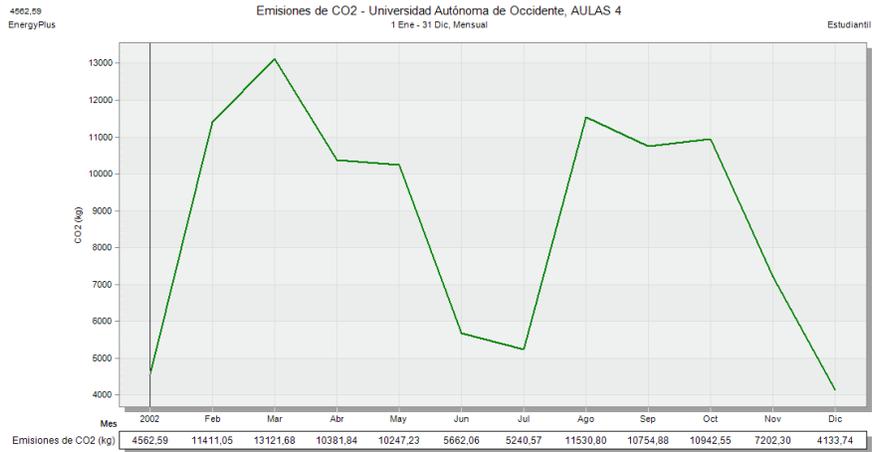


Figura 199. Emisiones de CO<sub>2</sub> mensual para el edificio con la MAE VIII

**6.8.1. Análisis comparativo de consumos energéticos del edificio base vs el edificio con la MAE VIII**

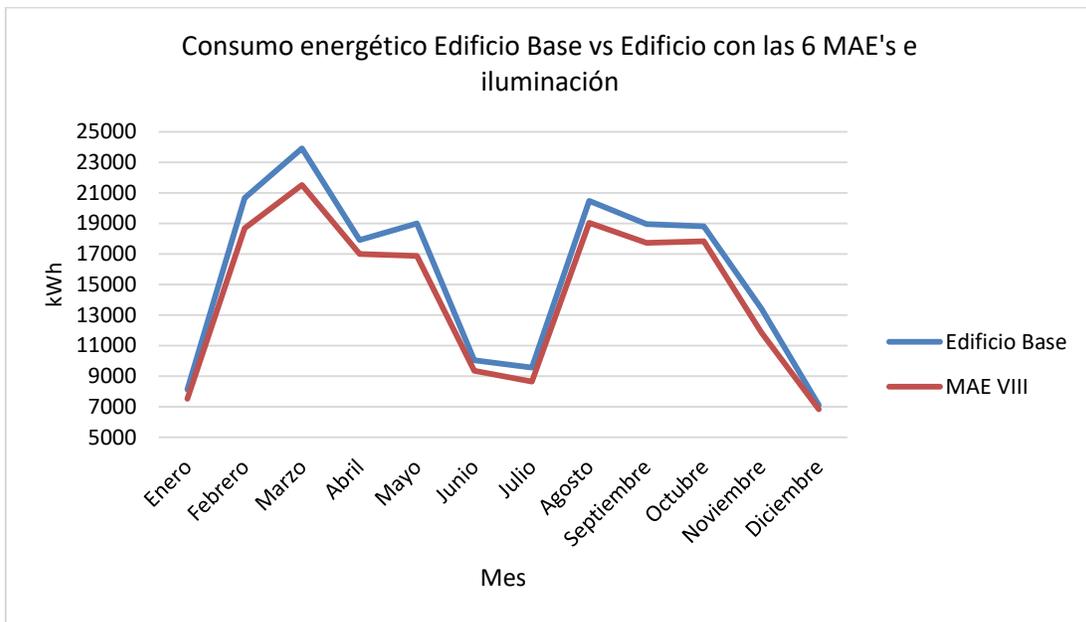


Figura 200. Consumo energético mensual Edificio Base y Edificio con las 6 MAE's e iluminación.

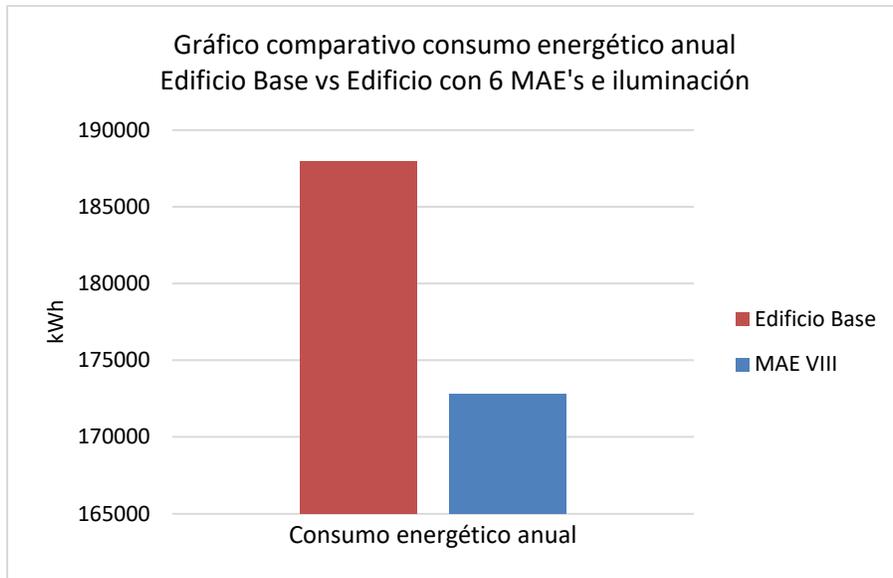


Figura 201. Consumo energético anual Edificio Base y Edificio con 6 MAE's e iluminación

Al comparar los datos obtenidos del Edificio base y el Edificio con las 6 MAE's e iluminación, se resalta que el edificio obtiene una reducción del consumo energético anual del 8,04%. La Figura 200 presenta la diferencia entre los consumos energéticos para el edificio base y el edificio con las 6 MAE's e iluminación implementadas, donde se evidencia que el comportamiento de consumo es el mismo, pero con un consumo menor.

En la Figura 201 se observa que el comportamiento del consumo anual de energía en el edificio es el mismo, pero con un consumo reducido al 8% influyendo más la MAE de refrigeración.

La tabla 80, presenta en resumen los ahorros de consumo energético y de emisiones de CO2 obtenidos con las MAE's propuestas y aplicadas al edificio simulado.

Tabla 80. Resumen ahorros de las MAE's aplicadas al edificio

	Consumo Energético Anual [kWh]	Ahorro [%]	Producción de CO2 [kg]	Ahorro en Emisiones de CO2
<b>Edificio Base</b>	187938.32		81111.2	
<b>MAE I</b>	172308.43	8.3%	105024.48	23913.28
<b>Iluminación</b>	193273.54	-2.8%	83640.56	2529.36
<b>MAE III</b>	180436.55	4.0%	79281.44	-1829.76
<b>MAE IV</b>	185359.9	1.4%	79281.44	-1829.76
<b>MAE V</b>	184148.17	2.0%	80195.53	-915.67
<b>MAE VI</b>	182872.23	2.7%	79869.13	-1242.07
<b>MAE VII</b>	182673.16	2.8%	79768.42	-1342.78
<b>6 MAE's e iluminación</b>	172829.06	8.0%	105191.29	24080.09

## PROPUESTA DE ALMACENAMIENTO PARA EL SISTEMA DE ILUMINACIÓN

Como propuesta adicional se plantea el dimensionado de un sistema de baterías para el SSFV instalado en el edificio y que este, sea capaz de suplir el consumo eléctrico de los sistemas de iluminación interior y exterior del mismo. Los sistemas de iluminación del edificio, representan el 6,25% del consumo total de energía el edificio.

Para realizar el dimensionado de las baterías a usar, se trabajará con baterías del tipo OpZs que son las más adecuadas para este tipo de implementación, gracias a su durabilidad, tecnología y fácil mantenimiento. Para conocer su capacidad, se debe tener en cuenta la cantidad total de energía consumida en un año y el equivalente de promedio mensual y diario. El sistema de iluminación interior y exterior del edificio tiene un consumo de energía anual de 11.749,87 kWh/Año. Los promedios de consumo mensual y diario son de 979,15 kWh/mes y 32,19 kWh/día respectivamente.

Una vez conocidos los valores de consumo, se selecciona el nivel de tensión al que operará el sistema de baterías, dependiendo de la potencia total a atender y lo establecido en la Tabla 81. En este caso la potencia a atender es mayor a 5 kW, por lo que el nivel de tensión del sistema será de 48 VDC.

Tabla 81. Potencia Total atendida y Nivel de tensión para sistemas de acumulación de energía

Potencia Total Atendida (W)	Nivel de Tensión (VDC)
P < 500	12
500 => P < 2500	24
2500 => P <= 5000	48

Para garantizar el cumplimiento del sistema ante la demanda de energía (teniendo en cuenta que el dimensionado se realiza con el valor promedio diario y no teniendo en cuenta valores picos máximos), se diseñará el sistema con una autonomía de 1 día completo que su vez garantiza la duración de las baterías cercana a los 10 años según la curva de ciclaje del proveedor. Para el tipo de baterías OpZs, se recomienda tener una profundidad de descarga del 40% que garantiza unos 4800 ciclos de carga y descarga y daría un tiempo de vida útil de 13,15 años.

Conociendo los datos necesarios, se calcula la capacidad de las baterías como se presenta a continuación:

$$Cap_{Bat} = \frac{E_{cons_{día}} * Autonomía}{Prof_{desc} * VDC} = \frac{32,19 \frac{kWh}{día} * 1día}{40\% * 48 Vdc} = 1.676,6 Ah$$

El valor obtenido de la capacidad de las baterías no es comercial, se busca en el catálogo del proveedor, y se opta por el uso de la marca Victron Batteries, y se selecciona Victron OpZs Solar 1830 Ah que brinda capacidad suficiente para el suministro y alimentación de las cargas requeridas, en la Figura 202 se presenta el tipo y forma de batería seleccionada.



Figura 202. Victron OpZs Solar 1830 Ah

Los requerimientos para albergar las baterías son un recinto bajo techo, cubierto de la intemperie, cerca al inversor de carga, las dimensiones de las baterías dadas por la ficha técnica del proveedor VICTRON ENERGY es de 21 cm de altura, 27,5 cm de ancho por 71,1 cm de profundidad, cabe destacar también que se debe tener en cuenta la construcción de losa de soporte de hasta 0,1732 kg/m<sup>2</sup>, esto para que se garantice el soporte del peso de la unidad de baterías.

Son baterías de mantenimiento reducido, en condiciones normales de funcionamiento y a 20°C, se le debe añadir agua destilada cada 2 – 3 años.

La batería tiene un costo aproximado de 5.026,45 € (información obtenida en: <http://mercasolar.com/product/bateria-victron-opzs-solar-1830-ah/>)

## **CAPÍTULO 7: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LÍNEAS BASES E INDICADORES**

En este capítulo se describe una metodología, implementada en la selección y aplicación de modelos para la estimación de líneas bases e indicadores energéticos en edificios. Se parte de un análisis de datos y variables que afectan el consumo de energía, a fin de seleccionar el modelo más adecuado que cumpla con los estándares normativos propios de la implementación de un sistema de gestión energética. En este sentido, se describen modelos que van desde las series de tiempo hasta modelos de regresión lineales y multivariable, en los cuales se detalla el procedimiento matemático y estadístico, así como el empleo del software R estudio para el procesamiento de los datos. De igual forma, se realizan los cálculos necesarios para validar la capacidad de pronóstico de los modelos y el porcentaje de error de los mismos, con el objetivo de mostrar la importancia que tiene la implementación de un sistema de gestión energética en un edificio, y permitir alternativas en conseguir ahorros energéticos mediante las líneas bases e indicadores energéticos.

### **7.1. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE MODELOS DE LINEA BASE E INDICADORES**

Se presenta un esquema metodológico (Figura 203), que simplifica las etapas a tener en cuenta en la selección de un modelo para establecer líneas bases e indicadores energéticos. La determinación de la mejora en el rendimiento energético en una edificación, implica la cuantificación del consumo de energía, la normalización de las variables relevantes que puedan afectar dicho consumo, los modelos utilizados para establecer la línea base e indicadores, siguiendo las respectivas validaciones estadística y, por último, el cálculo de las mejoras del rendimiento energético con fines de cuantificar ahorros energéticos y niveles de eficiencia.

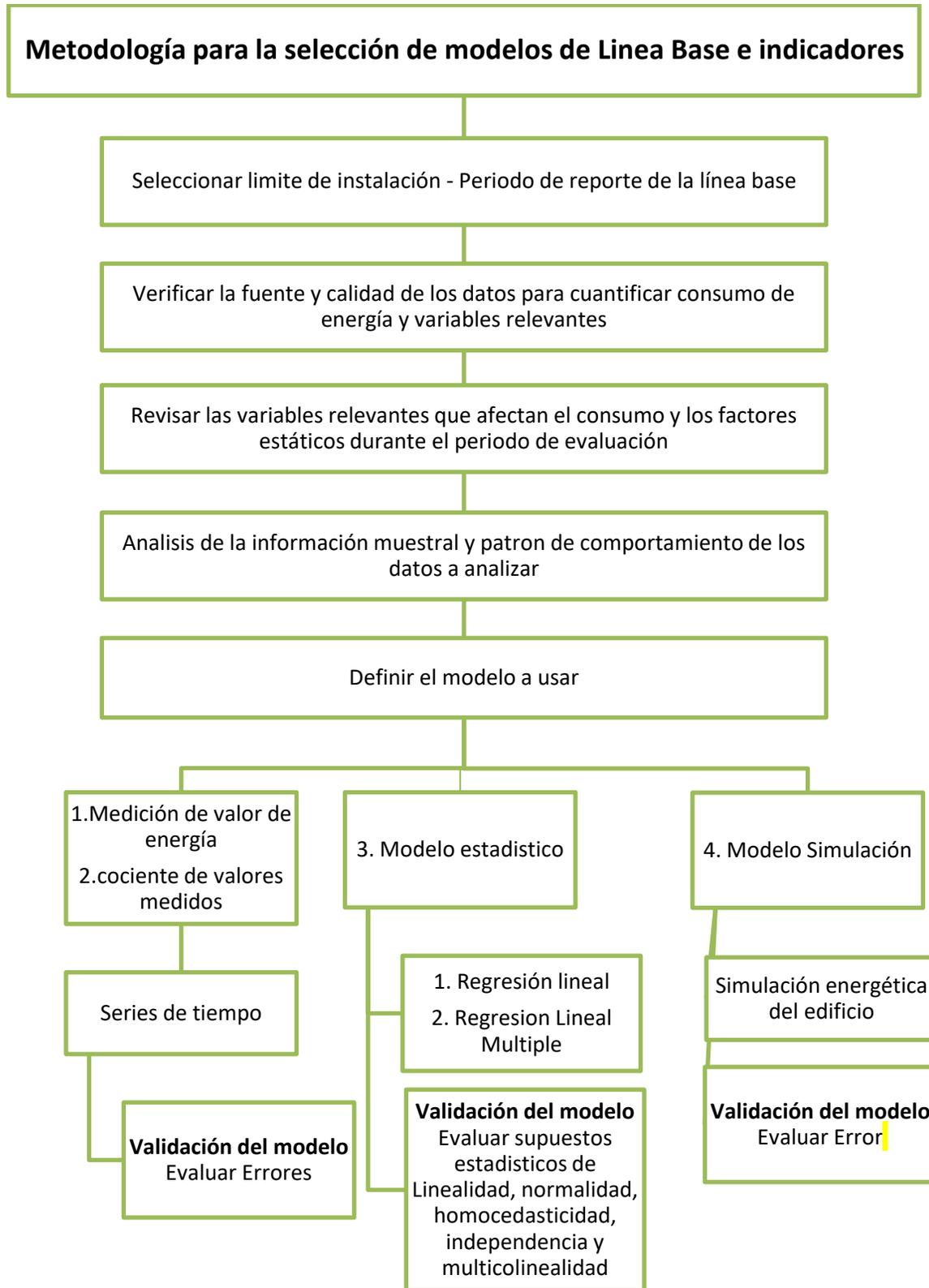


Figura 203. Metodología para la selección de modelos de líneas bases e indicadores

**7.1.1. Seleccionar límite de instalación - Periodo de reporte de la línea LBE**

Los límites de una instalación pueden ser físicos o de lugar y/o de organización. La selección de los límites de la instalación y el periodo temporal correspondiente a la construcción de una línea de base energética LBE, son fundamentales a la hora de iniciar acciones encaminadas a implementar un sistema de gestión de la energía o trabajar en función de la eficiencia energética.

En ese sentido, es importante tener en cuenta la contabilidad energética presente en los límites establecidos en la instalación de cada organización. Con respecto a los periodos de tiempo seleccionados como referencia de análisis de la LBE, se recomienda una duración de al menos 12 meses consecutivos (1 año) para considerar las variaciones operacionales y estacionales.

El ahorro de energía está determinado por la diferencia en el consumo de energía entre dos tiempos comparables (un periodo de referencia y un periodo de reporte de la línea base) siendo equivalentes en el periodo de tiempo seleccionado. Los periodos de tiempo se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Menos de un año: se puede usar un periodo más corto cuando el consumo de energía es estacional.
- Un año: cuando el consumo de energía es sensible al clima, se usa comúnmente un periodo anual.
- Más de un año: puede ser cuando no hay un año que se considera típico

Los cambios significativos en el uso del consumo de energía deben tenerse en cuenta y documentarse.

**7.1.2. Verificar la fuente y calidad de los datos para cuantificar el consumo de energía y las variables relevantes**

La planificación de la recopilación de los múltiples datos, el modo de cómo hacerlo y con qué frecuencia, permite obtener el diagnóstico energético, efectuar un análisis en el seguimiento de los procesos y la evaluación de la medición. En este sentido, es importante incluir en la contabilidad energética no solo la cuantificación del consumo de energía, sino el de las variables relevantes que pueden afectarlo. Lo anterior, nos permite aumentar la verificación y certeza de los ahorros de energía calculados y garantizar que satisfagan las necesidades de la organización [1].

Algunos de los factores que se deben tener en cuenta en la determinación adecuada de la calidad de los datos incluyen los siguientes aspectos:

La recopilación de datos de consumo, se refiere a lecturas de manuales o información automática enviadas a un centro de recopilación de datos centralizado. En este sentido, se

consideran verificables solo los datos tomados de los sistemas de control y / o medición precisos y los medidores calibrados regularmente. También es aceptable, la cuantificación del consumo de energía o de una variable relevante, mediante la resta de lecturas de dos o más medidores calibrados. Los datos deben recopilarse de manera consistente durante la línea de base y los períodos de informe. Otros datos a considerar pueden referirse a:

La fuente de datos de estaciones meteorológicas (para cálculos de días de grado). La frecuencia de la recopilación de datos, es decir, que abarca todos los turnos, por hora, día, mes, horas de trabajo y temporadas. La precisión de medidores y equipos de medición, precisión (incertidumbre de medición con respecto al sesgo, linealidad, resolución). La repetibilidad de datos de la fuente de datos y, por último, la validación de los datos.

De tal forma, la integridad de los datos incluye garantizar un período de tiempo adecuado para que los mismos se recopilen en toda la organización y se realicen los cálculos de ahorro de energía.

Por otra parte, todas las mediciones tienen una incertidumbre inherente y esto puede limitarse utilizando los cálculos y fórmulas correctas para la normalización o el modelado. En cuanto a la calibración de los medidores deberá seguir las recomendaciones del fabricante. Esto implica documentar los registros de calibración y registros de reparaciones a medidores calibrados. Sin embargo, los registros de calibración para medidores de servicios públicos no son responsabilidad de la organización y, en general, no requieren mantenimiento.

El consumo de energía y los datos de las variables relevantes deben analizarse en busca de valores anómalos, se hace referencia a que no son representativos de las condiciones de operación típicas. En caso de presentarse alta variabilidad, no es necesario eliminar los valores atípicos.

No obstante, el efecto de los valores atípicos afecta la fiabilidad de las estimaciones del modelo, lo que implica investigar las causas para eliminarlos o mantener el registro. Se recomienda tratar los períodos de parada separados de los períodos de operación. Si se opera de esta manera, las mediciones para ambos períodos se tratarán y modelarán por separado.

### ***7.1.3. Revisar las variables relevantes que afectan el consumo y los factores estáticos durante el periodo de evaluación***

Las variables relevantes corresponden a variables que afectan directamente la cantidad de energía consumida dentro de los límites de la instalación y, en particular, se utilizan para normalizar el consumo de energía como parte de un modelo de ajuste. Al desarrollar un modelo de ajuste, se debe tener en cuenta:

1. No omitir las variables relevantes que afectan el consumo de energía
2. Evitar incluir variables que no son relevantes para el consumo de energía. Las variables se excluyen del modelo si no hay un mecanismo lógico por el cual la variable afectaría el consumo de los tipos de energía que se están modelando.

Se recopilan los datos que cuantifican las variables relevantes, siendo parte del proceso de contabilidad de energía. Así, las variables relevantes se refieren a cantidades físicas características.

Para cualquier tipo de instalación (industrial o comercial) se tendrá en cuenta:

- Nivel de actividad (por ejemplo, ocupación, horas de operación).
- Clima (por ejemplo, grado de calentamiento día, grado de enfriamiento día y humedad).

En la misma dirección, otro de los elementos importantes a considerar en el establecimiento y análisis de una LBE, son los factores estáticos que impactan significativamente en el desempeño energético y, generalmente, son factores fijos inherentes a la tecnología existente y los cuales determinan la eficiencia energética de la tecnología en uso.

Hacen referencia a los cambios en la ocupación de edificios – Un edificio tiene un número relativamente estable de ocupantes. Si el número de ocupantes aumenta significativamente o disminuye, este puede requerir una revisión en los factores estáticos definidos, dado que afecta las LBE e IDE. De igual manera se presenta, cuando existen modificaciones en el área de los edificios.

Cuando hay cambios importantes en los factores estáticos, se relacionan con variaciones en la tecnología y la organización deberá revisar las líneas de base energética que fueron elaboradas antes de esos cambios.

#### ***7.1.4. Análisis de la información muestral y patrón de comportamiento de los datos a analizar***

Se trata del análisis previo de los datos en función de establecer condiciones de ciclicidad, estacionalidad, tendencia y aleatoriedad de los datos.

La tendencia en una serie de tiempo es el cambio del nivel de los datos a largo plazo. Si para un periodo prolongado la serie se mueve hacia arriba, se dice que los datos muestran tendencia positiva. Si el nivel de los datos disminuye con el tiempo, responde a una tendencia negativa. Por otro lado, los datos se consideran estacionarios cuando no hay tendencia positiva ni negativa (es decir, la serie es en esencia plana a largo plazo).

Cuando se presenta una variación regular del nivel de los datos que se repite cada año para el mismo periodo, se explica por la presentación de un patrón estacional en una serie de tiempo. Por ejemplo, el consumo de energía en países con verano e invierno intensos y la venta de útiles escolares. Otro análisis corresponde a un patrón cíclico, se representa mediante movimiento de los datos hacia arriba y hacia abajo, similar a una onda alrededor de la tendencia a largo plazo. Las fluctuaciones cíclicas son de mayor duración y son menos regulares que las fluctuaciones estacionales. Un ejemplo de este tipo de variación son los

ciclos comerciales cuyos períodos recurrentes dependen de la condición de oferta y demanda y de factores como el clima o las costumbres sociales.

En cuanto a la aleatoriedad, no responde a ningún patrón de comportamiento y se asocia a factores fortuitos o aleatorios que inciden de forma aislada en una serie de tiempo [2],[3].

#### **7.1.5. Definir un modelo para su utilización**

El patrón existente de los datos, corresponde a un aspecto importante para definir el modelo o técnica a utilizar en la estimación de la LBE<sub>n</sub>. Estos abarcan modelos cuantitativos como las series de tiempo, hasta modelos causales, como regresiones univariable, o multivariables.

En este sentido, determinar el modelo más indicado para su uso depende de criterios como el comportamiento de los datos, la selección de herramientas de análisis estadísticos que permitan dar validez al modelo, así como evaluar su capacidad descriptiva y predictiva (métricas de error). Todos, constituyen uno de los elementos importantes a la hora de establecer los criterios de selección de los modelos útiles para establecer una línea de base energética y posteriormente un ahorro.

En este sentido, la parametrización de los modelos implica evaluar la estructura matemática que identifique, tanto las entradas y salidas de cada modelo, como llegar a establecer las condiciones iniciales y los parámetros o magnitudes que describen las características físicas y funcionales del modelo. De otro lado, es importante comprobar que el modelo estadístico se ajusta correctamente a los datos establecidos. Esto implica someterse a pruebas estadísticas de bondad de ajuste, para verificar que reproducen el valor medido y, a su vez, permitir el uso con propósitos del pronóstico de valores futuros, siendo importante considerar que su esquema no cambiara en el tiempo de validez del modelo. Dichos elementos hacen parte de la evaluación de la capacidad descriptiva del modelo. Por otra parte, la validación del modelo, definido como la comparación de las estimaciones del modelo con los valores observados del sistema real, son tenidos en cuenta para determinar la validez del mismo.

Como parte del análisis para aplicación de estos modelos, se incluye la identificación de las variables relevantes que afectan el consumo de energía. En este sentido, el concepto de normalización se recomienda para mitigar los efectos asociados a los valores anormales de las variables relevantes que afectan el consumo de energía. Esto se hace al comparar entre el período de referencia y los períodos de informe, definidos para reportar la línea base. Por ejemplo, para las condiciones climáticas cambiantes, los grados día se pueden usar como una variable relevante para normalizar el consumo de energía en los edificios, donde una proporción significativa de la energía utilizada en el mismo corresponde a calefacción o refrigeración de espacios.

Las pruebas estadísticas (por ejemplo, el criterio del valor  $p$ ) pueden ser útiles para decidir si las variables relevantes afectan significativamente el consumo de energía y si deben ser utilizadas para la normalización.

La normalización del consumo de energía mediante el uso de modelos de ajuste, se realizará de manera que los períodos de referencia y de información se puedan comparar, es decir, como si todas las variables relevantes fueran las mismas en los dos períodos. El período de referencia normalizado y / o el consumo de energía del período de notificación, se calcula utilizando uno o más modelos de ajuste. Estos, abarcan modelos cuantitativos utilizando las series de tiempo hasta modelos causales como regresiones univariable, multivariables.

## **7.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA PROPUESTA AL EDIFICIO DE AULAS DE LA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE.**

### **Descripción de cuáles son los límites**

El límite corresponde al edificio de aulas cuatro de la Universidad Autónoma de Occidente, el periodo de análisis corresponde a los años 2017, 2018, 2019.

### **La obtención de los datos**

Los datos utilizados para el análisis de los distintos métodos aplicados a la obtención de una línea base energética corresponden a:

- Datos historias del contador de energía desde el año 2016 hasta 2019 con frecuencia de registro de cada 15 min por variable.
- Datos de la estación meteorología instalada en la Universidad desde el año 2017 a 2019 y la estación meteorológica del IDEAN.
- Datos de ocupación de 2017 a 2019. En este caso se trata de la programación semestral de clases y ocupación de auditorios y demás espacios del aula.

### **Las variables relevantes y factores estáticos para analizar**

El análisis de las variables relevantes y factores estáticos comprende la información suministrada durante el periodo 2017 - 2019. En su conjunto, incluye datos de estaciones meteorológicas instalada en la UAO que permiten disponer de las variables climatológicas, así como la información de planificación docente, relacionada con ocupación de salones, auditorios, oficinas y datos de consumo de energía del edificio.

**Consumo de energía final Total:** Es el consumo de energía final del edificio y en este caso constituye la variable dependiente. Comprende el consumo del medidor eléctrico ubicado en el edificio más la energía que se genera por los paneles fotovoltaicos (PV) instalados en la cubierta de la edificación. Se cuenta con la información diaria desde estas fuentes que permite totalizar el consumo de energía en kWh.

**Temperatura:** Es la temperatura seca media diaria del aire exterior en °C calculada a partir de la información horaria de que se dispone de la estación meteorológica.

**Humedad:** Es la humedad relativa media diaria, del aire exterior en %, que se dispone de la estación meteorológica.

**Radiación:** Es la radiación solar media, calculada considerando el tiempo de radiación diaria (radiación directa y difusa).

**Ocupación:** Es la ocupación de personas en los recintos de pregrado y postgrado expresada en el tiempo en que están siendo utilizados en cada espacio. Se determina a partir de la planificación existente sumando las horas de todos los recintos mensualmente.

Algunos factores estáticos en el aula se relacionan con actividades diarias en el aula, o bien con el data center ubicado en el edificio y algunos equipos que permanecen encendidos. Los consumos relacionados con los elementos mencionados anteriormente se pueden evidenciar en las gráficas de tendencia del edificio, son consumos fijos que se identifican aun sin ocupación en la edificación.

### Análisis de la información y patrón de comportamiento de los datos a analizar

El análisis y comportamiento de los datos constituye uno de los elementos iniciales de mayor importancia en la decisión de usar un determinado modelo de línea base, en atención a la procedencia y verificación de los datos, la frecuencia de estos y las posibles alteraciones en cuanto al registro de la información.

A continuación, se presenta en la Figura 204 el comportamiento histórico del consumo de energía del edificio de Aulas 4 de la Universidad Autónoma de Occidente en adelante UAO.

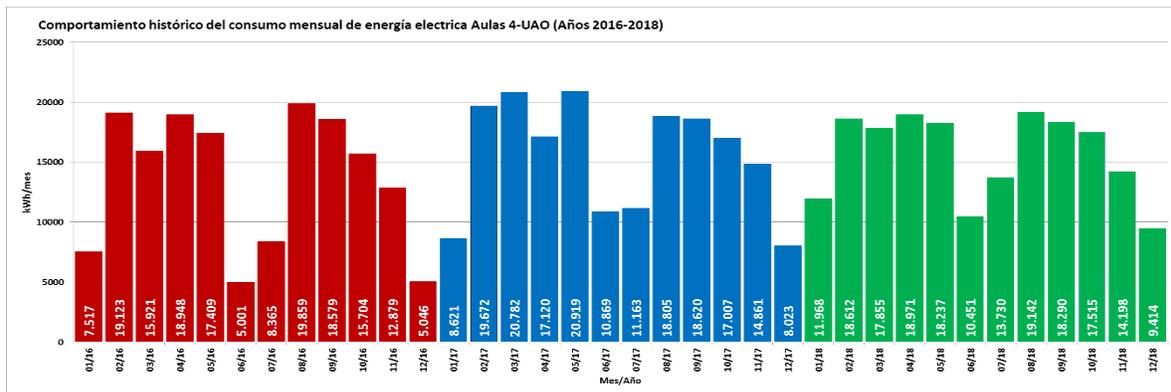


Figura 204. Comportamiento histórico del consumo mensual de energía eléctrica del edificio aulas

4

El análisis de la información histórica del consumo mensual de energía eléctrica en Aulas 4 (Figura 205) muestra un comportamiento estacional anual, con una ligera alteración entre los meses de marzo y abril que depende del mes donde se presenta la semana santa (semana en que la universidad no está operativa). De igual forma, se evidencia un incremento anual del consumo de energía (Figura 206) que logra ser explicado por la renovación tecnológica progresiva de las instalaciones en las aulas 4, y para el 2017 representó un 13,5% con respecto al año anterior y en el 2018 fue tan solo del 1,0%.

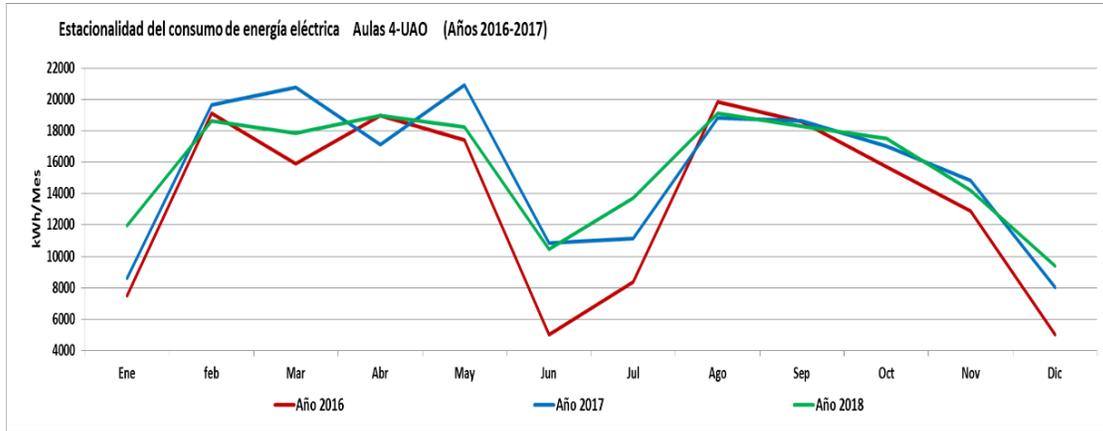


Figura 205. Grafica comportamiento estacional del edificio de aulas 4

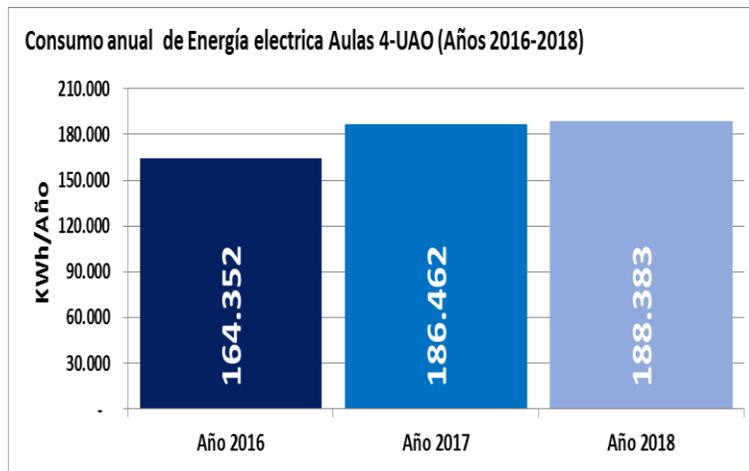


Figura 206. Grafica consumo anual del edificio de aulas 4

A continuación, se muestra la utilización de los modelos de series de tiempo aplicados a la obtención de una línea de base energética, como propuesta para la validación de los modelos de medición de valor de energía y cociente de valores medidos, propuestos por la norma ISO 50006 [4].

En el contexto de los sistemas de gestión de la energía, el propósito fundamental de una línea de base energética, parte de proporcionar una referencia cuantitativa que provee la base de comparación del desempeño energético. Es decir, un valor del consumo de energía eléctrico o térmico, que permita medir ahorros como una referencia antes y después de implementar las acciones de mejora. Considerando lo anterior como un pronóstico o valor de referencia de consumo de cualquier tipo de energía, el análisis de series de tiempo se ajusta de manera adecuada como modelos mencionados previamente.

**7.2.1. Modelos de Series de Tiempo**

A continuación, se presenta la aplicación al caso de estudio del edificio de aulas 4 del campus universitario, partiendo de modelos sencillos hasta los modelos que consideran la estacionalidad y el análisis segmentado de los datos.

**Modelo 1: Promedio del consumo mensual histórico**

Este primer modelo de línea base energética para el año 2019, se obtiene a partir de la observación del comportamiento de los datos, donde el valor pronosticado para el consumo de energía de un mes específico del mismo año (por ej. Enero-2019) se adquiere a partir del cálculo del promedio del consumo de energía eléctrica para el mismo mes. Esto, considerando el histórico de 3 años atrás (es decir, el promedio de los consumos de Ene-2016, Ene-2017 y Ene-2018). En este caso no se tienen en cuenta las mejoras tecnológicas realizadas en años anteriores.

En la Figura 207, se presenta la línea de base energética obtenida, ilustrada como una línea de color negro. Los valores obtenidos como línea base son presentados en la Tabla 82.

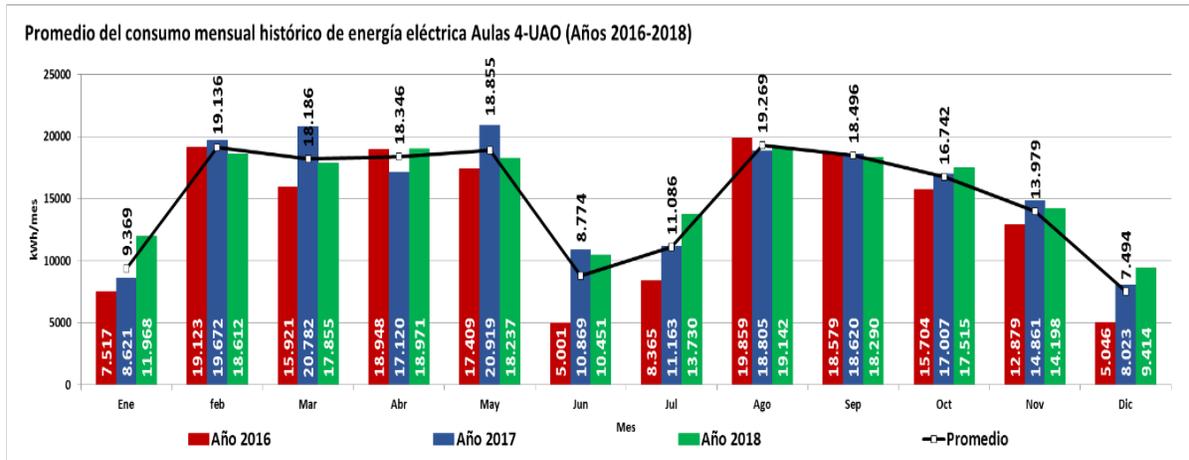


Figura 207. Promedio del consumo mensual histórico de energía Eléctrica (2016 – 2018)

Tabla 82. Línea base - Promedio del consumo mensual histórico

kWh/mes	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Línea Base 2019
Ene	7517	8621	11968	9369
Feb	19123	19672	18612	19136
Mar	15921	20782	17855	18186
Abr	18948	17120	18971	18346
May	17409	20919	18237	18855
Jun	5001	10869	10451	8774
Jul	8365	11163	13730	11086
Ago	19859	18805	19142	19269
Sep	18579	18620	18290	18496
Oct	15704	17007	17515	16742
Nov	12879	14861	14198	13979
Dic	5046	8023	9414	7494

**Modelo 2: Promedio ponderado del consumo mensual histórico**

El segundo modelo propuesto de línea base energética para el año 2019, se construye a partir del valor pronosticado de consumo de energía de un mes específico del mismo año (por ej. Enero-2019). Se trata del cálculo del promedio ponderado del consumo de energía eléctrica, para el mismo mes y considerando el histórico de 3 años atrás (es decir, el promedio de los consumos de Ene-2016, Ene-2017 y Ene-2018), dándole mayor peso a los consumos de energía del último año. Tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$E_{mes\ x-2019} = \frac{E_{mes\ x-2016} + 2 * E_{mes\ x-2017} + 3 * E_{mes\ x-2018}}{6}$$

En este análisis, como en el modelo 1, no se han considerado los cambios tecnológicos realizados durante los últimos 3 años.

En la Tabla 83, se presenta la línea base Energética propuesta y en la Figura 208 se ilustra como una línea negra en la gráfica.

Tabla 83. Línea base - Promedio ponderado del consumo mensual histórico

kWh/mes	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Línea Base 2019
Ene	7517	8621	11968	10110
Feb	19123	19672	18612	19050
Mar	15921	20782	17855	18508
Abr	18948	17120	18971	18350
May	17409	20919	18237	18993
Jun	5001	10869	10451	9682
Jul	8365	11163	13730	11980
Ago	19859	18805	19142	19149
Sep	18579	18620	18290	18448
Oct	15704	17007	17515	17044
Nov	12879	14861	14198	14199
Dic	5046	8023	9414	8222

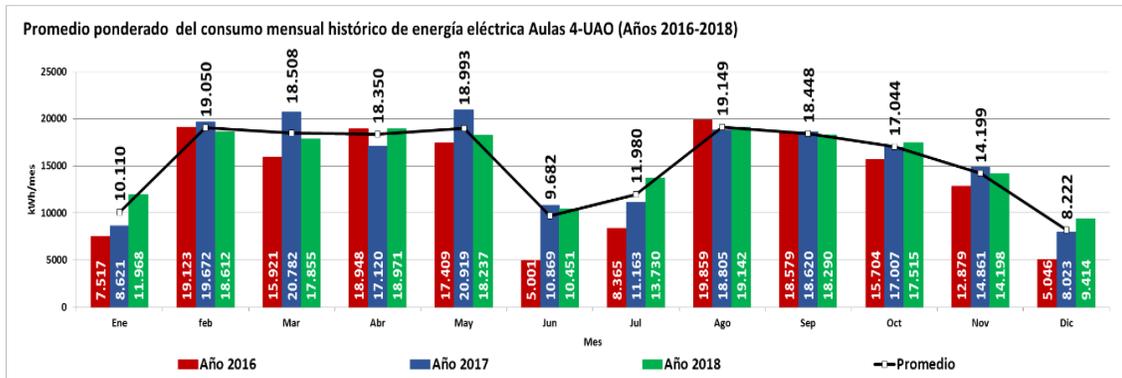


Figura 208. Promedio ponderado del consumo mensual histórico de energía Eléctrica (2016 – 2018)

**Modelo 3: Índices de estacionalidad**

En este tercer modelo la línea de base energética propuesta, tiene en cuenta la estacionalidad anual del consumo de energía y un incremento del consumo de energía para el año 2019 del 1% respecto al año anterior (incremento mínimo de los últimos tres años). De tal forma, el modelo de línea de base energética obtenido para el año 2019, considera los índices de estacionalidad con la información histórica de los últimos tres años. Los resultados se presentan en la Tabla 84 y de forma gráfica en la Figura 209.

Tabla 84. Línea base – Índices de estacionalidad

Cálculo de índices de estacionalidad					Índice Estacional	Línea Base Año 2019
kWh/mes	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Suma		
Ene	7.517	8.621	11.968	28.106	5,21%	9.918
feb	19.123	19.672	18.612	57.407	10,65%	20.257
Mar	15.921	20.782	17.855	54.558	10,12%	19.252
Abr	18.948	17.120	18.971	55.039	10,21%	19.422
May	17.409	20.919	18.237	56.565	10,49%	19.960
Jun	5.001	10.869	10.451	26.321	4,88%	9.288
Jul	8.365	11.163	13.730	33.258	6,17%	11.736
Ago	19.859	18.805	19.142	57.806	10,72%	20.398
Sep	18.579	18.620	18.290	55.489	10,29%	19.581
Oct	15.704	17.007	17.515	50.226	9,31%	17.723
Nov	12.879	14.861	14.198	41.938	7,78%	14.799
Dic	5.046	8.023	9.414	22.483	4,17%	7.934
<b>Suma</b>	<b>164.352</b>	<b>186.462</b>	<b>188.383</b>	<b>539.197</b>	<b>100,00%</b>	<b>190.267</b>

↳ Incremento :
↳ 1,00%

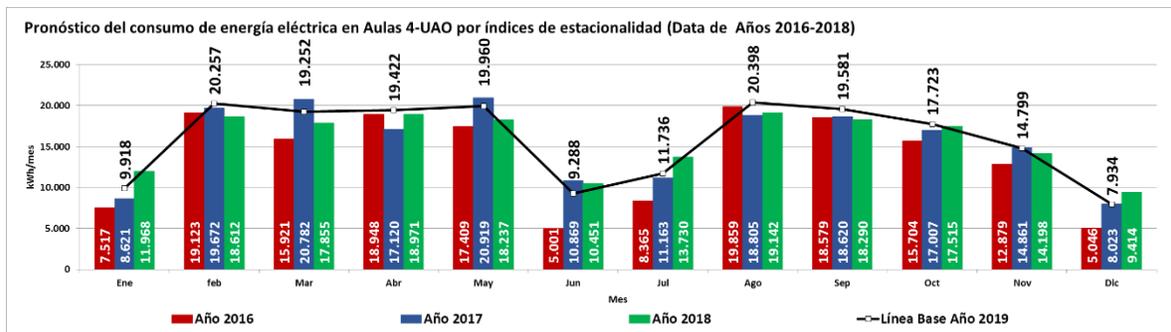


Figura 209. Línea base – Índices de estacionalidad

**Modelo 4: Media móvil de orden 12**

A partir de la estacionalidad anual del consumo de energía y los incrementos históricos que se han venido presentando en el consumo, se puede obtener un cuarto modelo de línea de base energética para el año 2019, aplicando el cálculo de la media móvil de orden 12 (estacionalidad de 12 meses). Los mismos, en atención a que los métodos de pronósticos

móvil tienen como objeto dar relevancia a los datos más recientes para obtener la previsión, así se elige la media móvil 12.

Cada punto de una media móvil de una serie temporal es la media aritmética de un número de puntos consecutivos de la serie, donde el número de puntos es elegido de tal manera que los efectos estacionales y / o irregulares sean eliminados [45].

En la Tabla 85, se muestran los valores de la línea base estimada bajo la modelo media móvil 12, la cual requiere un histórico de 12 datos para estimar el dato siguiente. La Figura 210 presenta de forma gráfica la línea base obtenida.

Tabla 85. Línea base – Media móvil de orden 12

<b>Año-mes</b>	<b>Consumo [kWh/mes]</b>	<b>Media móvil n=12</b>	<b>Año-mes</b>	<b>Consumo [kWh/mes]</b>	<b>Media móvil n=12</b>
ene-16	7517		ene-18	11968	15539
feb-16	19123		feb-18	18612	15817
mar-16	15921		mar-18	17855	15729
abr-16	18948		abr-18	18971	15485
may-16	17409		may-18	18237	15639
jun-16	5001		jun-18	10451	15416
jul-16	8365		jul-18	13730	15381
ago-16	19859		ago-18	19142	15595
sep-16	18579		sep-18	18290	15623
oct-16	15704		oct-18	17515	15596
nov-16	12879		nov-18	14198	15638
dic-16	5046		dic-18	9414	15583
ene-17	8621	13696	ene-19	8157	15699
feb-17	19672	13788	feb-19	18339	15381
mar-17	20782	13834	mar-19	19271	15358
abr-17	17120	14239	abr-19	15445	15476
may-17	20919	14086	may-19	18876	15182
jun-17	10869	14379	jun-19	12135	15236
jul-17	11163	14868	jul-19	20271	15376
ago-17	18805	15101	ago-19	24242	15921
sep-17	18620	15013	sep-19	22723	16346
oct-17	17007	15017	oct-19	21390	16715
nov-17	14861	15125	nov-19	17109	17038
dic-17	8023	15290	dic-19	10418	17281

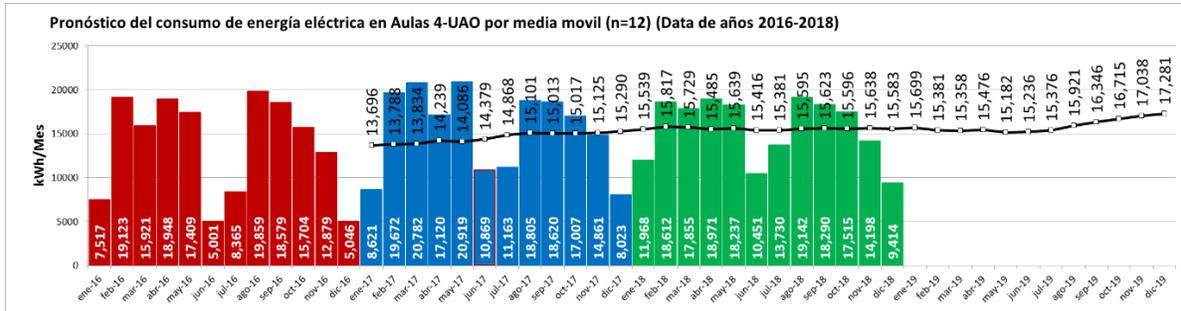


Figura 210. Línea base – Media móvil de orden 12

**Nota:** Este modelo además de subestimar el consumo, presenta mucho desfase en el pronóstico para los meses de bajo consumo.

Es posible obtener modelos más afinados, si se tienen en cuenta variables relevantes que afectan el consumo energético en el tiempo. Por ejemplo, para este caso de estudio la programación de la operación del campus universitario, es una variable relevante a considerar para acercarnos más al pronóstico. Esta programación que realiza la universidad de forma anual, estima actividades para un número de semanas estándar (semestres regulares, de verano y de invierno, vacaciones, semana santa) que involucran a otras variables que pueden afectar el consumo, tales como la ocupación y algunos factores climáticos relacionados con la estacionalidad, muchos de ellos coinciden con patrones repetitivos año tras año, como se puede apreciar en las figuras 211 – 213:

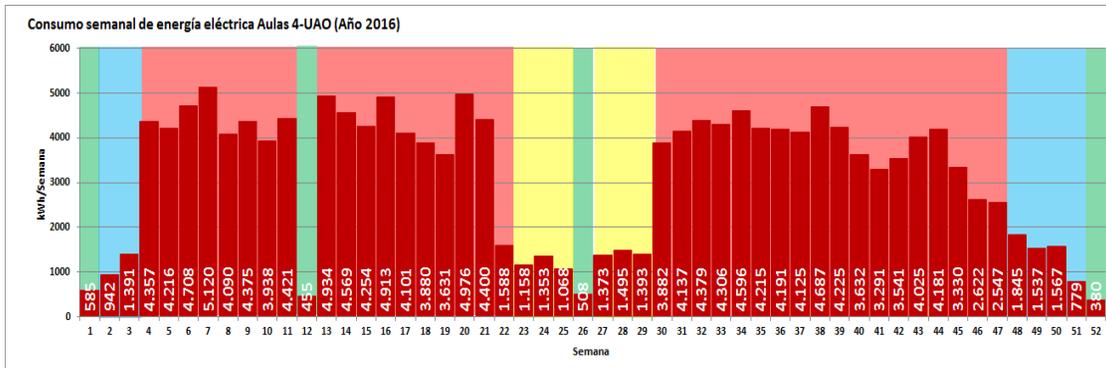


Figura 211. Consumo semanal de energía eléctrica para el año 2016

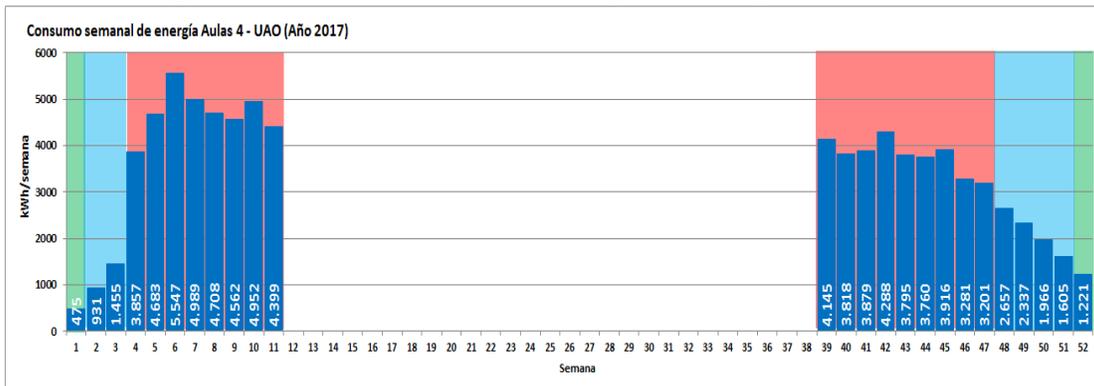


Figura 212. Consumo semanal de energía eléctrica para el año 2016

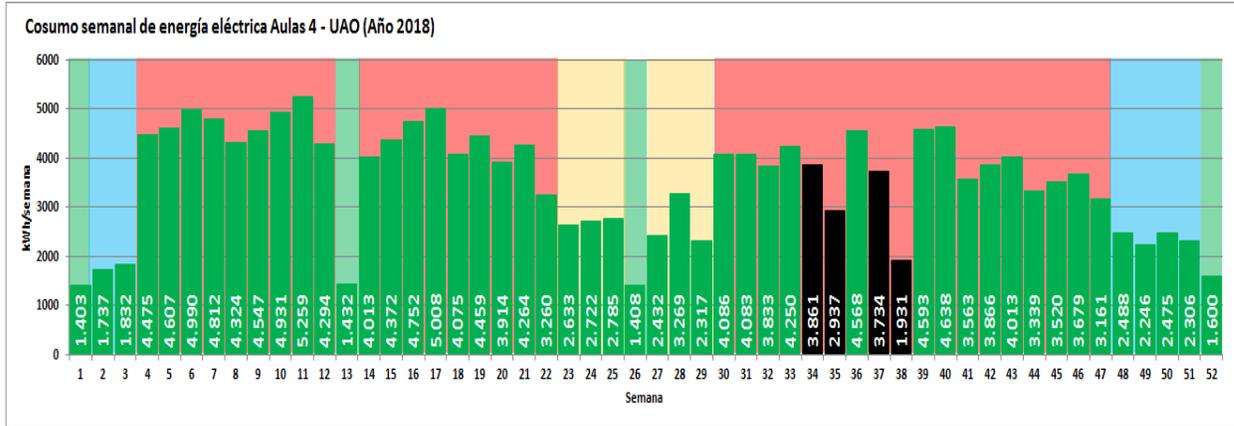


Figura 213. Consumo semanal de energía eléctrica para el año 2016

Las franjas verdes corresponden a vacaciones colectivas y semana santa, las franjas rosadas a los semestres regulares, las franjas azules al semestre intermedio de invierno, y las franjas amarillas al semestre intermedio de verano.

Para el año 2017, se tuvo problemas con el sistema de medición y no se cuenta con datos de consumo eléctrico del edificio de las semanas 12 a la 38. Así mismo, en el 2018 se presentaron inconvenientes de registro para las semanas 34, 35, 37 y 38.

Teniendo en cuenta estas variaciones en el consumo energético, se puede plantear un modelo más preciso que considere dichos cambios para tener un pronóstico más cercano y acorde a la programación académica de la universidad para el año 2019:

**Modelo 5: Considerando la programación académica**

Es posible obtener un quinto modelo de línea de base energética para el año 2019, cuando se considera la variación que tienen los consumos energéticos en algunos periodos definidos en la programación anual de la universidad (semestres regulares, de verano y de invierno, vacaciones, semana santa). Estos generan las cimas y los valles en la estacionalidad anual del consumo de energía, como se ilustra en las figuras 214 – 218.

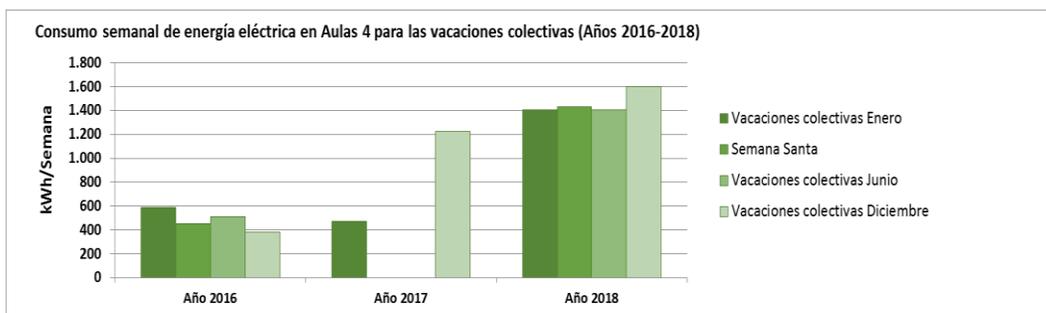


Figura 214. Consumo semanal de energía para el periodo de vacaciones (Años 2016 – 2018)

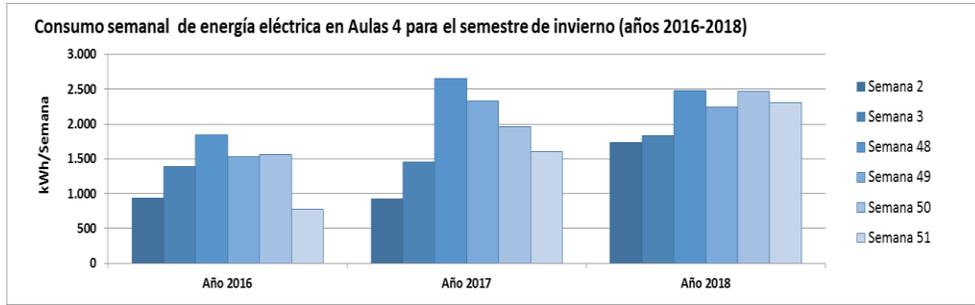


Figura 215. Consumo semanal de energía para el periodo de invierno (Años 2016 – 2018)

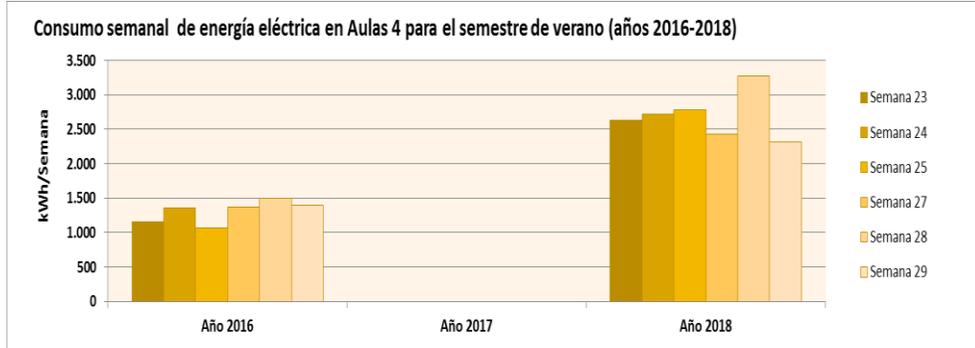


Figura 216. Consumo semanal de energía para el periodo de verano (Años 2016 – 2018)

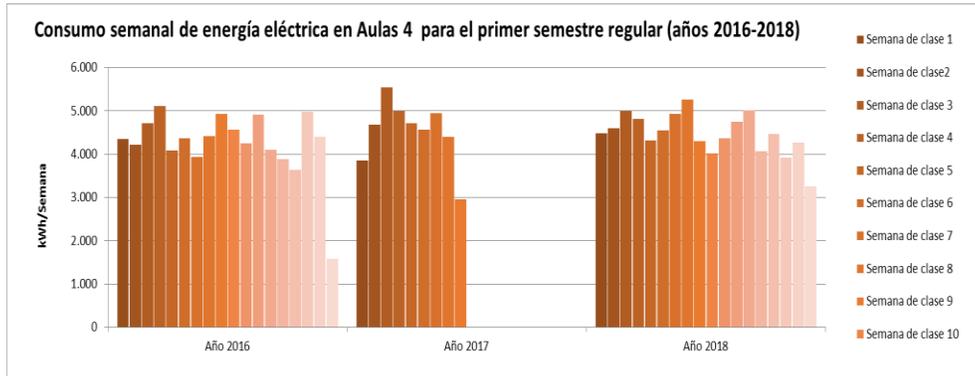


Figura 217. Consumo semanal de energía para el primer semestre (Años 2016 – 2018)

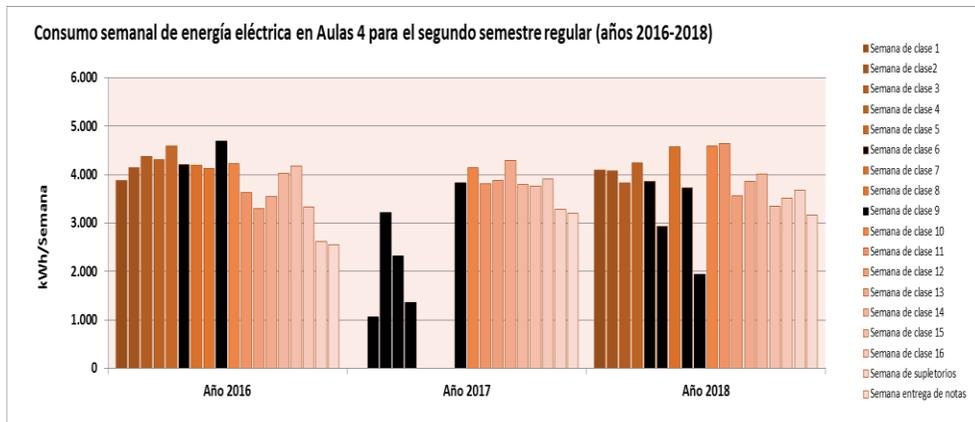


Figura 218. Consumo semanal de energía para el segundo semestre (Años 2016 – 2018)

Tomando los consumos promedio del año 2018 y los eventos programados, se propone construir la línea base mensual que da cuenta del consumo esperado en el año 2019. Así se muestra en la siguiente Figura 219.

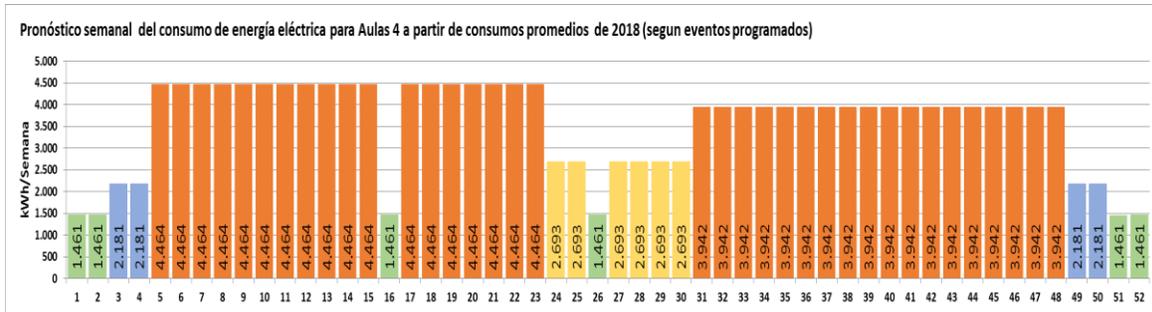


Figura 219. Consumo promedio según programación académica

A partir del pronóstico semanal obtenido anteriormente, se puede levantar el pronóstico mensual presentado en la Tabla 86 y la Figura 220.

Tabla 86. Línea base – consumo promedio según programación académica

Línea de base energética mensual Año 2019	
Mes	kWh/Mes
ene-19	10,054
feb-19	17,857
mar-19	19,770
abr-19	16,129
may-19	19,770
jun-19	12,334
jul-19	12,640
ago-19	17,459
sep-19	16,896
oct-19	17,459
nov-19	16,896
dic-19	7,909

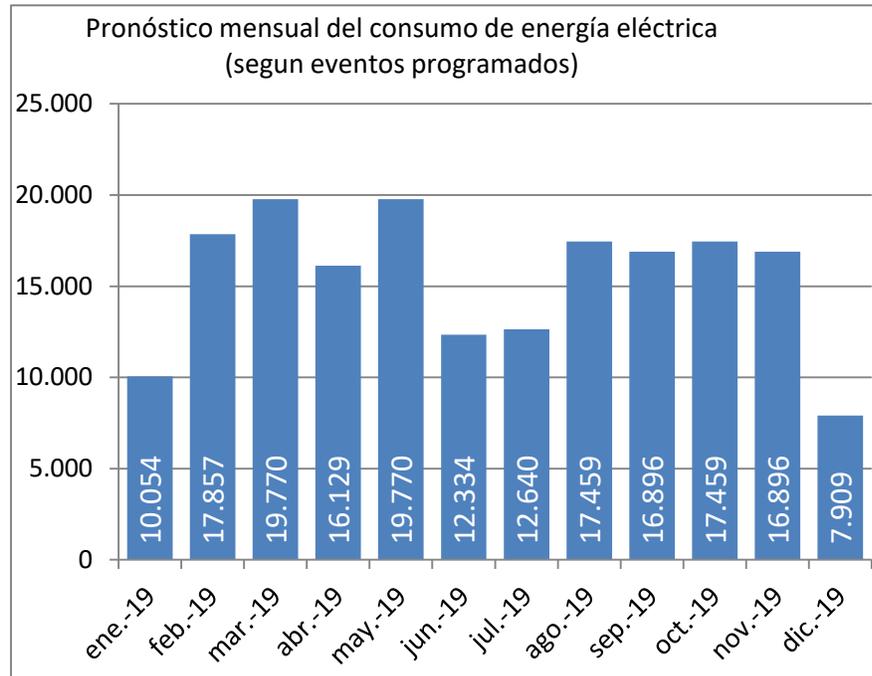


Figura 220. Línea base – consumo promedio según programación académica

**Modelo 6: Considerando la curva de consumo promedio diario.**

Es posible obtener un modelo de línea base más aproximado, si se considera el comportamiento del consumo de energía para cada día de la semana. Lo anterior, dado que la universidad los días sábados labora hasta las 3 p.m. y el día domingo no tiene actividad

académica. Esto permite analizar el comportamiento de la curva semanal de consumo energético en el 2018, según eventos considerados, como se presentan en las Figuras 221 y 222.

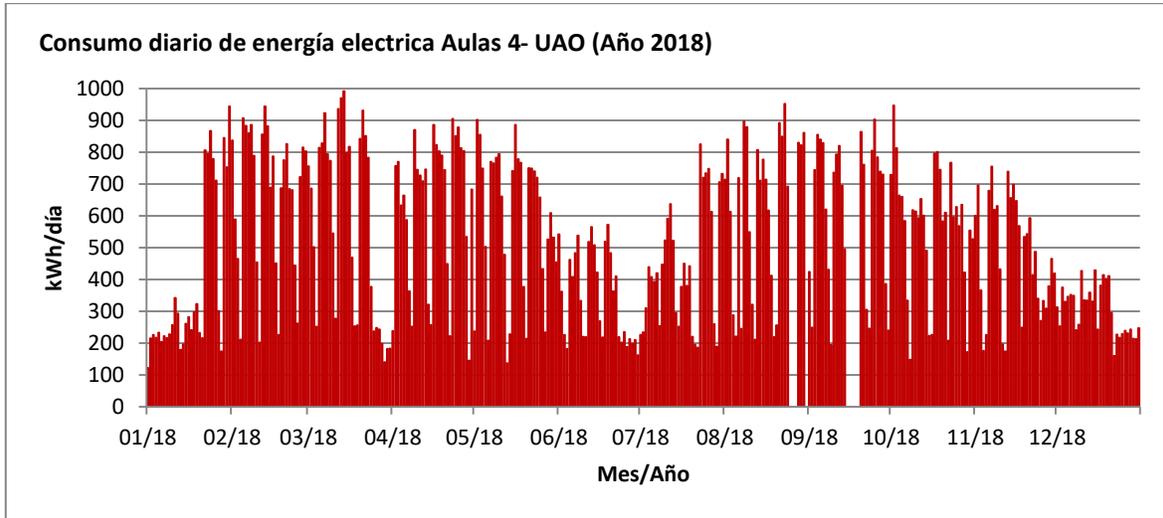
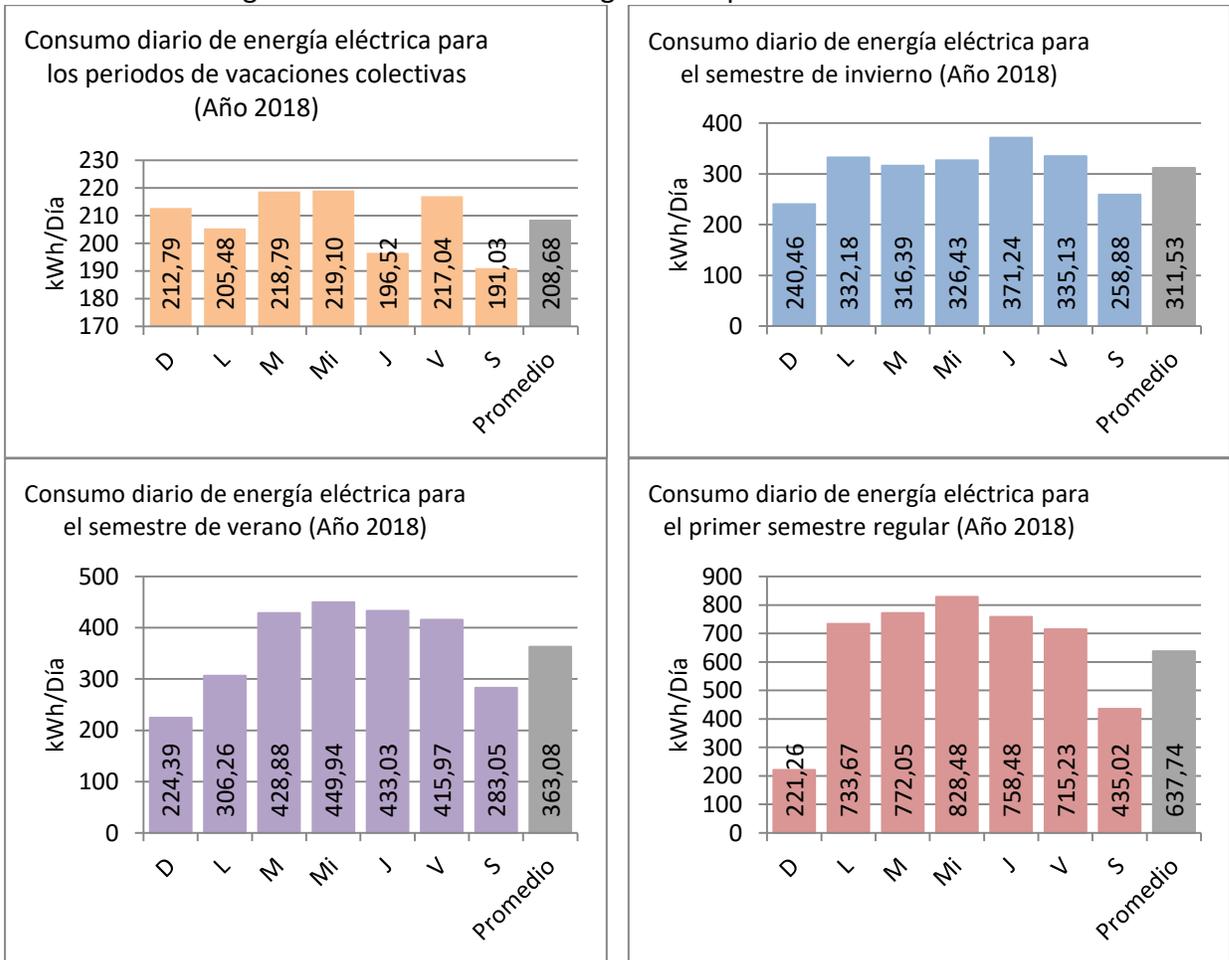


Figura 221. Consumo de energía diario para el año 2018



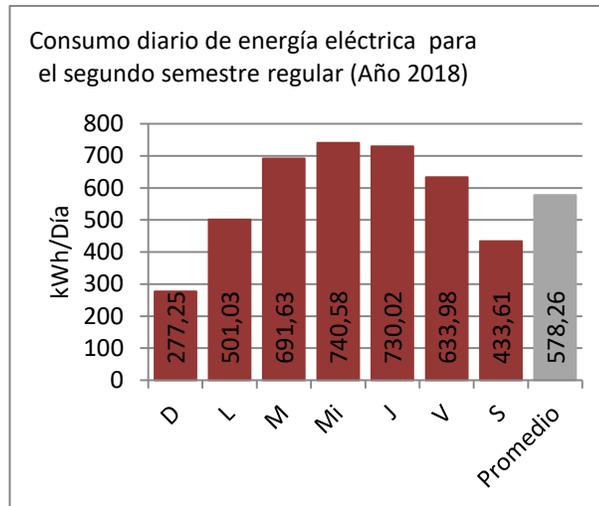


Figura 222. Consumo de energía diario promedio por distintos periodos del 2018,

A partir del comportamiento diario del consumo energético del 2018, se establece el pronóstico de los consumos diarios para los diferentes periodos del año 2019, como lo muestra la Figura 223.

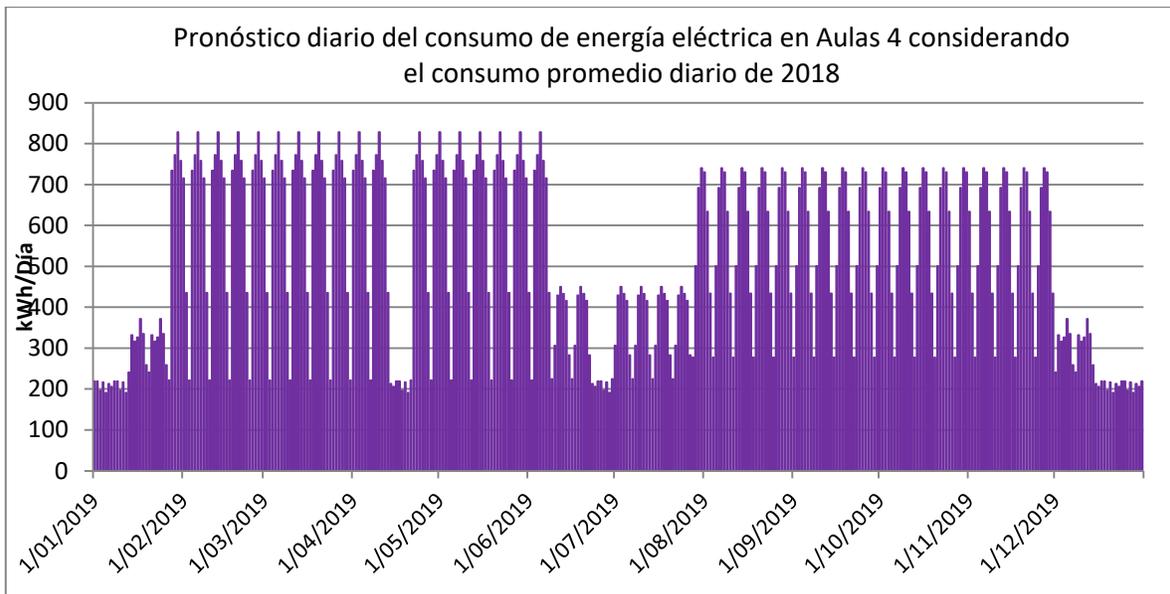


Figura 223. Pronóstico diario del consumo de energía eléctrica considerando el consumo promedio diario de 2018

Semanalmente se espera que los consumos energéticos sean los presentados en la Figura 224.

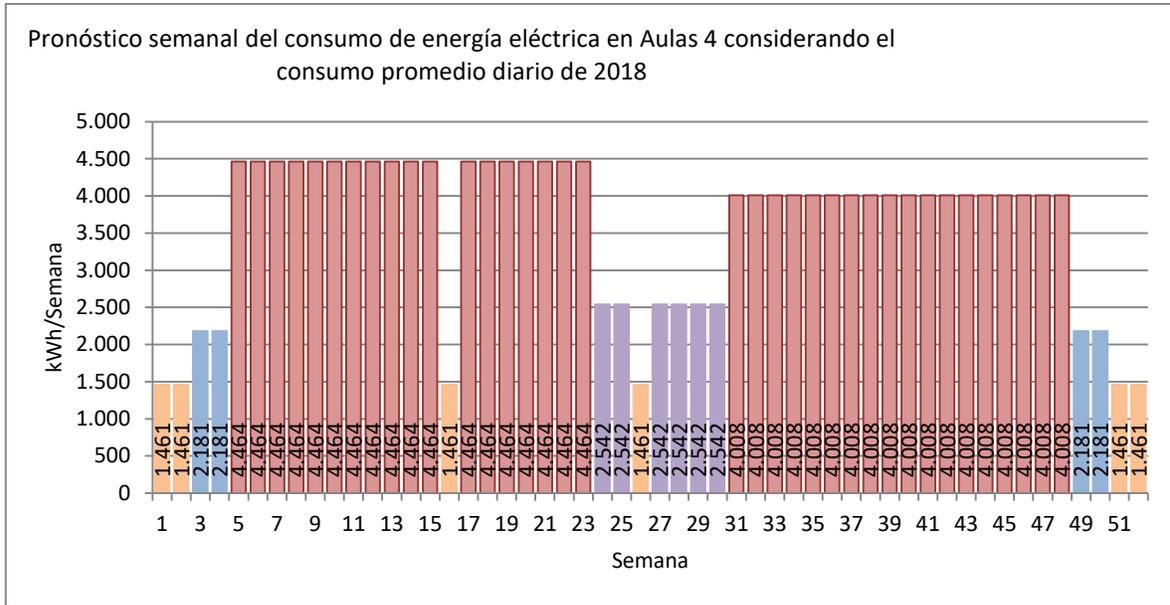


Figura 224. Pronóstico semanal del consumo de energía eléctrica considerando el consumo promedio diario de 2018

A partir del pronóstico semanal obtenido anteriormente, se puede estimar el pronóstico mensual presentado en la Tabla 87 y la Figura 225.

Tabla 87. Línea base – consumo promedio según programación académica

Línea de base energética mensual Año 2019	
Mes	kWh/Mes
ene-19	10178,62
feb-19	17856,71
mar-19	19228,21
abr-19	16359,01
may-19	20158,89
jun-19	11667,40
jul-19	12152,20
ago-19	17830,02
sep-19	16810,70
oct-19	16724,73
nov-19	17100,00
dic-19	7920,03

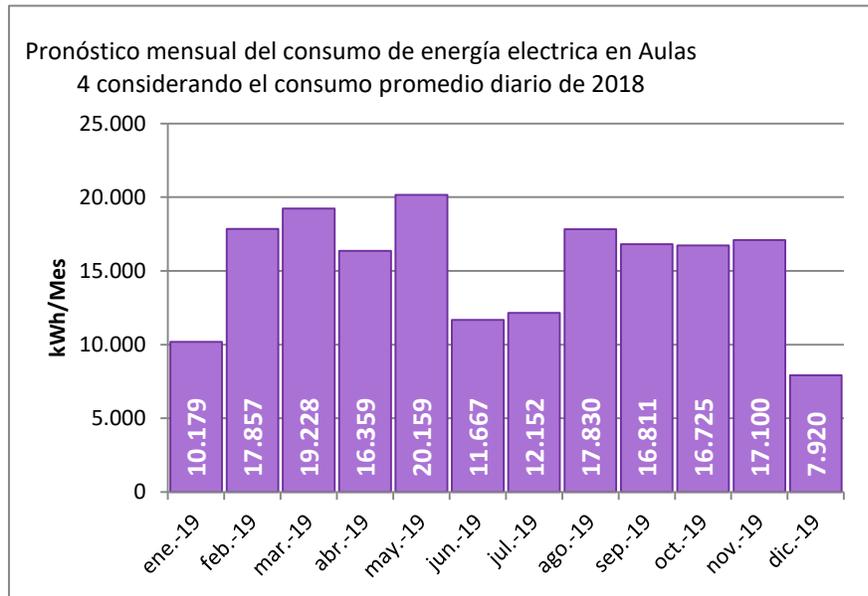


Figura 225. Línea base – consumo promedio según programación académica

A continuación, se presentan de forma resumida los 6 modelos de series de tiempo obtenidos para el pronóstico mensual del consumo de energía en el edificio de Aulas. La Tabla 88 y la Figura 226 presentan los valores obtenidos en los diferentes modelos comparados con el consumo de energía real.

Tabla 88. Modelos de pronósticos implementados para determinar el consumo de energía de Aulas 4 en el 2019

No	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	Método utilizado
1	9.369	19.136	18.186	18,346	18.855	8.774	11.086	19.269	18.496	16.742	13.979	7.494	Promedio mensual histórico
2	10.110	19.050	18.508	18.350	18.993	9.682	11.980	19.149	18.448	17.044	14.199	8.222	Promedio mensual histórico ponderado
3	9.918	20.257	19.252	19.422	19.960	9.288	11.736	20.398	19.581	17.723	14.799	7.934	Índices de estacionalidad
4	15.699	15.381	15.358	15.476	15.182	15.236	15.376	15.921	16.346	16.715	17.038	17.281	Media móvil (n=12)
5	10.054	17.857	19.770	16.129	19.770	12.334	12.640	17.459	16.896	17.459	16.896	7.909	Considerando programación semanal
6	10.179	17.857	19.228	16.359	20.159	11.667	12.152	17.830	16.811	16.725	17.100	7.920	Consumos diarios
<b>Valor Real</b>	<b>8.157</b>	<b>18.339</b>	<b>19.271</b>	<b>15.445</b>	<b>18.876</b>	<b>12.135</b>	<b>20.271</b>	<b>24.242</b>	<b>22.723</b>	<b>21.390</b>	<b>17.109</b>	<b>10.418</b>	Mediciones mensuales (Año 2019)

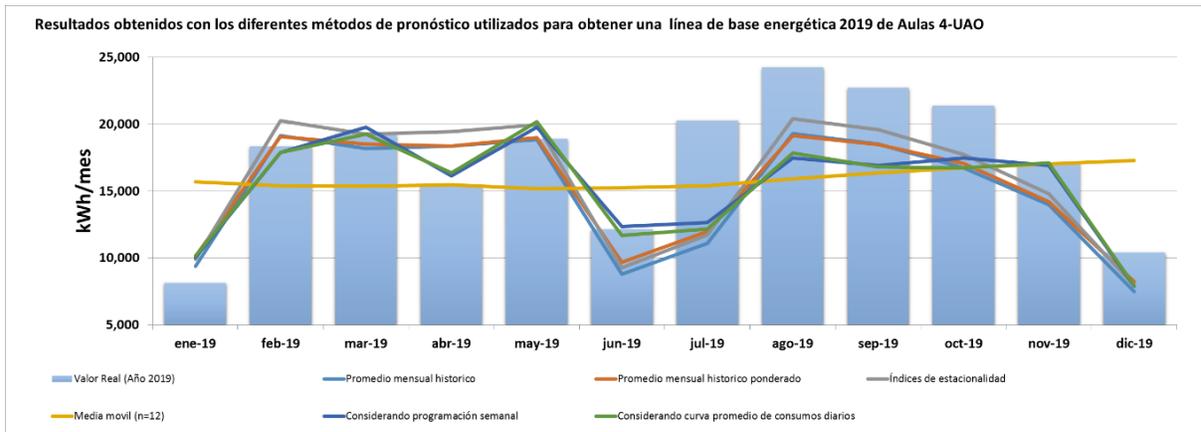


Figura 226. Resultados obtenidos con los diferentes métodos de pronóstico utilizados para obtener una línea de base energética 2019 de Aulas 4-UAO

Para realizar una comparación entre los distintos modelos de pronósticos utilizados se utilizó el error porcentual medio absoluto (MAPE) que entrega la desviación en términos porcentuales y se presenta en la Tabla 89.

Tabla 89. Error Absoluto Porcentual MAPE de los modelos de series de tiempo

2019	Consumo Real	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4		Modelo 5		Modelo 6	
		Consumo Estimado	MAPE	Consumo Estimado	MAPE								
Ene	8157	9369	14,9%	10110	23,9%	9918	21,6%	15699	92,5%	10054	23,3%	10179	24,8%
Feb	18339	19136	4,3%	19050	3,9%	20257	10,5%	15381	16,1%	17857	2,6%	17857	2,6%
Mar	19271	18186	5,6%	18508	4,0%	19252	0,1%	15358	20,3%	19770	2,6%	19228	0,2%
Abr	15445	18346	18,8%	18350	18,8%	19422	25,7%	15476	0,2%	16129	4,4%	16359	5,9%
May	18876	18855	0,1%	18993	0,6%	19960	5,7%	15182	19,6%	19770	4,7%	20159	6,8%
Jun	12135	8774	27,7%	9682	20,2%	9288	23,5%	15236	25,6%	12334	1,6%	11667	3,8%
Jul	20271	11086	45,3%	11980	40,9%	11736	42,1%	15376	24,1%	12640	37,6%	12152	40,1%
Ago	24242	19269	20,5%	19149	21,0%	20398	15,9%	15921	34,3%	17459	28,0%	17830	26,5%
Sep	22723	18496	18,6%	18448	18,8%	19581	13,8%	16346	28,1%	16896	25,6%	16811	26,0%
Oct	21390	16742	21,7%	17044	20,3%	17723	17,1%	16715	21,9%	17459	18,4%	16725	21,8%
Nov	17109	13979	18,3%	14199	17,0%	14799	13,5%	17038	0,4%	16896	1,2%	17100	0,1%
Dic	10418	7494	28,1%	8222	21,1%	7934	23,8%	17281	65,9%	7909	24,1%	7920	24,0%
Medida de Error	MAPE		MAPE		MAPE		MAPE		MAPE		MAPE		
Valor	18,66%		17,55%		17,78%		29,08%		14,52%		15,21%		

**7.2.2. Modelos de Regresión Lineal y Multivariable**

Para construir un modelo de regresión confiable, primero se debe identificar las variables independientes que pueden tener una alta relación con la variable que se pretende explicar. Con ayuda del software R Studio se obtuvieron los niveles de correlación [5] – [7] de las variables independientes (Temperatura, Humedad, Radiación, Ocupación Total) que se presenta en la Tabla 90 con respecto a la variable dependiente (Consumo de energía final Total).

Tabla 90. Información mensual de variables monitoreadas en el edificio para el 2017

Mes/Variable	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Radiación [W/m2]	Ocupación [horas]	Consumo Total [kWh]
Enero	24,129	75,093	365,254	5756,67	8621
Febrero	24,905	69,847	392,134	19698,50	19672
Marzo	23,537	78,989	367,483	18293,17	20782
Abril	23,637	78,141	400,491	22503,40	17120
Mayo	23,495	79,716	399,974	25312,50	20919
Junio	24,461	75,431	396,705	2498,20	10869
Julio	24,221	74,353	399,624	4835,00	11163
Agosto	26,768	64,531	480,902	6859,50	18805
Septiembre	25,122	73,537	458,310	8278,50	18620

<b>Octubre</b>	24,080	77,239	361,803	18036,17	17007
<b>Noviembre</b>	24,015	78,182	376,114	17375,33	14861
<b>Diciembre</b>	24,126	77,246	362,676	1238,50	8023

La Figura 227, presenta la correlación entre las variables, donde se evidencia que la variable independiente que mayor correlación tiene con la variable dependiente, es la ocupación total, con una correlación del 75%, seguida de la radiación con el 38% de correlación.

> round(cor(X2017\_Mensual),2)

	Temperatura	Humedad	Radiación	Ocupación Total	Consumo Total
Temperatura	1.00	-0.95	0.80	-0.42	0.12
Humedad	-0.95	1.00	-0.70	0.36	-0.11
Radiación	0.80	-0.70	1.00	-0.17	0.38
Ocupación Total	-0.42	0.36	-0.17	1.00	0.75
Consumo Total	0.12	-0.11	0.38	0.75	1.00

Figura 227. Correlación entre variables – Software R Studio

La Figura 228 presenta gráficamente la relación entre las variables y su significancia estadística (asteriscos rojos). La variable con mayor relación y significancia estadística, que permite describir la variable Consumo de energía Total, es la variable independiente Ocupación Total.

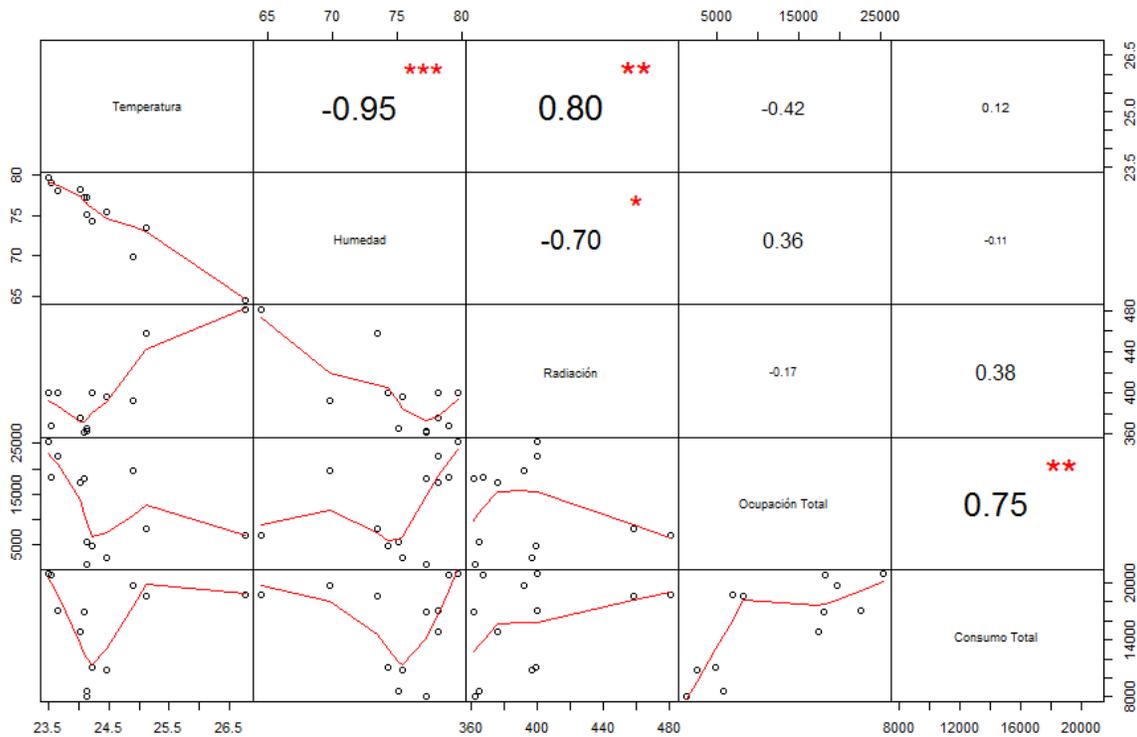


Figura 228. Correlación entre el Consumo de energía final Total y las variables independientes – Software R Studio

Para continuar con el análisis se parte de la construcción de unos modelos de pronóstico que utiliza datos de consumo de energía eléctrica y de variables relevantes para el período de referencia, bajo el siguiente modelo:

$$Electricidad_{lineabase} = \beta_0 X + \beta + \varepsilon_i$$

Donde:

$Electricidad_{lineabase}$  = Consumo de electricidad observado durante el período de referencia.

$\beta$  = intercepción del modelo de pronóstico.

$\beta_0$  = coeficiente de la variable independiente en el modelo de pronóstico.

$X_{lineaBase}$  = valor observado en el período de referencia de la variable.

$\varepsilon_i$  = término de error del modelo de pronóstico.

Para garantizar que el modelo de pronóstico desarrollado tenga validez [8], se realizan una serie de pruebas estadísticas que tienen en cuenta:

- ✓ La función de regresión es no lineal.
- ✓ Los términos de error no se distribuyen normalmente.
- ✓ Los términos de error tienen varianza no constante.
- ✓ Los términos de error no son independientes.
- ✓ Las variables independientes no se relacionan entre sí (para el caso multivariable)

La Tabla 91. presenta los detalles de cumplimiento de los diferentes supuestos estadísticos, según su prueba y representación gráfica.

Tabla 91. Supuestos y pruebas de verificación para los modelos de regresión

Supuestos	Prueba	Cumplimiento de la Prueba
Linealidad	Gráfica	Distribución aleatoria con respecto al 0
Normalidad	Shapiro Wilks	P.value $\geq$ 0,05
Homocedasticidad	Breusch Pagan	P.value $\geq$ 0,05
Independencia	Durbin Watson	P.value $\geq$ 0,05
Multicolinealidad	Factor de inflación de la varianza (FIV)	FIV $\leq$ 10

Con ayuda de la herramienta estadística R Studio [9], [10], se realizó la construcción y validación de los modelos de regresión lineal univariable y multivariable.

### 7.2.1.1. Modelo de Regresión Lineal Univariable

Se construyeron 4 modelos de regresión lineal univariable, con las diferentes variables (Temperatura, Humedad, Radiación y Ocupación Total). Esto, con el fin de validar lo obtenido en la Figura 228. donde se obtuvo que la variable más relevante es la Ocupación Total.

#### Modelo 1:

Variable dependiente: Consumo Total

Variable independiente: Temperatura

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Temperatura, data = X2017_Mensual)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-7358  -4390   1703   2906   5937

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    108.5    39962.4   0.003   0.998
Temperatura     633.0     1638.5   0.386   0.707

Residual standard error: 4904 on 10 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.01471,    Adjusted R-squared:  -0.08382
F-statistic: 0.1493 on 1 and 10 DF,  p-value: 0.7073
```

El modelo desarrollado se describe como:

$$Electricidad_{lineabase} = 633,0 \cdot Temperatura + 108,5 + \varepsilon_i$$

El modelo tiene un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,0147$  que indica que el modelo explica el 1,47% de la variabilidad de las observaciones (datos). Al tener un valor de  $R^2$  tan bajo (el valor varía entre 0% y 100%), indicando que el modelo no se ajusta de buena forma a los datos y, por lo tanto, la Temperatura no describe significativamente el comportamiento del Consumo Total.

**Modelo 2:**

Variable dependiente: Consumo Total

Variable independiente: Humedad

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Humedad, data = X2017_Mensual)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-7274  -4516   1819   3041   5913

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 24386.7    25729.3   0.948   0.366
Humedad     -117.7      341.7  -0.344   0.738

Residual standard error: 4912 on 10 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.01172,    Adjusted R-squared:  -0.0871
F-statistic: 0.1186 on 1 and 10 DF,  p-value: 0.7377
```

El modelo desarrollado se describe como:

$$Electricidad_{lineabase} = -117,7 \cdot Humedad + 24,86,7 + \varepsilon_i$$

El modelo tiene un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,0117$ , lo que indica que el mismo solo explica el 1,17% de la variabilidad de las observaciones (datos). Al tener un valor de  $R^2$  tan bajo (el valor de varía entre 0% y 100%), enseña que el modelo no se ajusta de buena forma a los datos y, por lo tanto, la Humedad no describe significativamente el comportamiento del Consumo Total.

**Modelo 3:**

Variable dependiente: Consumo Total

Variable independiente: Radiación

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Radiación, data = X2017_Mensual)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-5896.4 -4548.9   232.7  3435.4  6634.4

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -3294.09    14591.59  -0.226   0.826
Radiación     47.46      36.62   1.296   0.224

Residual standard error: 4572 on 10 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1438,    Adjusted R-squared:  0.05818
F-statistic: 1.68 on 1 and 10 DF,  p-value: 0.2241
```

El modelo desarrollado se describe como:

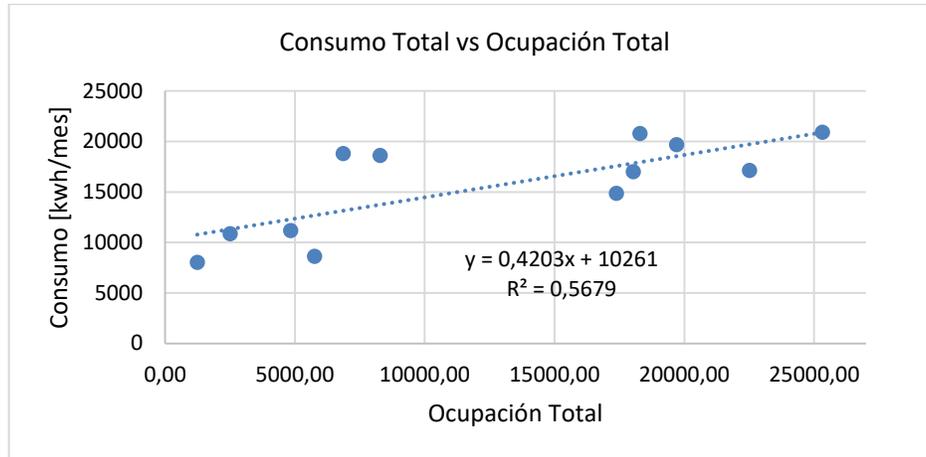
$$Electricidad_{lineabase} = 47,46 \cdot Radiación - 3294,09 + \varepsilon_i$$

El modelo tiene un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,1438$  que indica que el modelo alcanza a explicar el 14,38% de la variabilidad de las observaciones (datos). Al tener un valor de  $R^2$  tan bajo (el valor de varía entre 0% y 100%), indica que el modelo no se ajusta de buena forma a los datos y, por lo tanto, la Radiación no describe significativamente el comportamiento del Consumo Total.

**Modelo 4:**

Variable dependiente: Consumo Total

Variable independiente: Ocupación



```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Ocupación.Total, data = X2017_Mensual)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-4059.3 -2624.8 -638.1  1557.2  5661.2
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.026e+04  1.732e+03   5.926 0.000146 ***
Ocupación.Total  4.203e-01  1.159e-01   3.625 0.004650 **
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

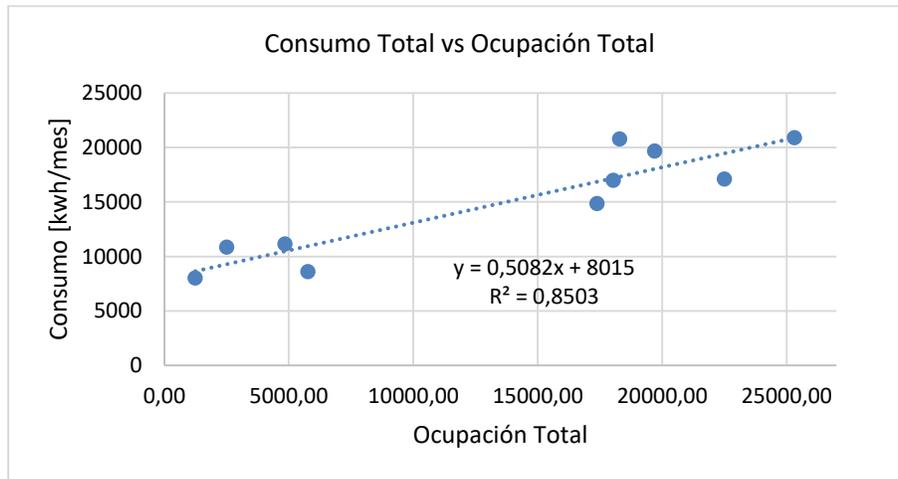
```
Residual standard error: 3248 on 10 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5679,    Adjusted R-squared:  0.5247
F-statistic: 13.14 on 1 and 10 DF,  p-value: 0.00465
```

El modelo desarrollado se describe como:

$$Electricidad_{lineabase} = 0,4203 \cdot Ocupación + 10260 + \varepsilon_i$$

El modelo tiene un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,5679$  que indica que el modelo logra explicar el 56,79% de la variabilidad de las observaciones (datos). Un valor p de 0,00465 para el estadístico F que indica que la relación lineal es estadísticamente significativa ( $0,00465 < 0,05$ ).

Como se esperaba, tras el análisis de correlación entre variables el modelo que mejor se ajusta y explica el comportamiento del Consumo Total de Energía corresponde a la variable independiente la Ocupación Total. Sin embargo, este modelo posee un coeficiente de determinación un poco bajo. Por tal razón, se aplicó el método de los residuales con el fin de filtrar algunos datos atípicos y conseguir que el coeficiente de determinación  $R^2$  mejorara. La técnica de los residuales para el filtrado consiste en calcular los residuos, los cuales se definen como la diferencia entre el valor observado y, que en este caso corresponde al valor medido del consumo real de la energía y el valor estimado por la línea base energética (LBE<sub>n</sub>) calculada, a partir de la regresión lineal, Ver anexo aplicación de la técnica de residuales [11].



```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Ocupación.Total, data = X2017_DatosOcupacionFiltrados)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2331.5 -1643.6  -67.2  1361.0  3470.2
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  8.015e+03  1.206e+03   6.644 0.000162 ***
Ocupación.Total 5.082e-01  7.538e-02   6.742 0.000146 ***
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 2028 on 8 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8503,    Adjusted R-squared:  0.8316
F-statistic: 45.45 on 1 and 8 DF,  p-value: 0.0001463
```

Ahora, el modelo desarrollado se describe como:

$$Electricidad_{lineabase} = 0,5082 \cdot Ocupación + 8015 + \varepsilon_i$$

El modelo de regresión realizando procesos de filtrado, como el método de los residuales, permite aumentar el nivel de correlación a  $R^2 = 0,8503$ . En esta ocasión, el modelo permitió

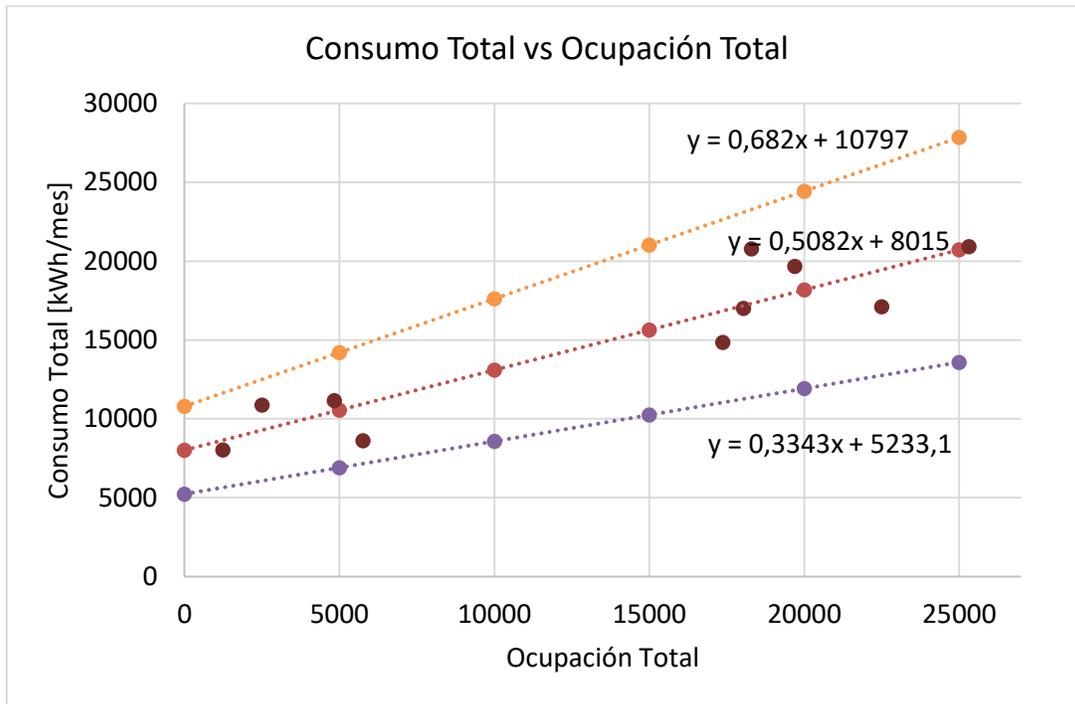
explicar el 85,03% de la variabilidad de las observaciones (datos). De igual forma, se analizó el valor de p de 0,0001 para el estadístico F, que indica que la relación lineal es estadísticamente significativa ( $0,0001 < 0,05$ ).

Los intervalos de confianza del modelo con un nivel de significancia entre 2,5%- 97,5%, Es decir un intervalo entre los cuales puede variar el modelo de regresión lineal univariable.

	2.5 %	97.5 %
(Intercept)	5233.0544252	1.079700e+04
Ocupación.Total	0.3343822	6.820407e-01

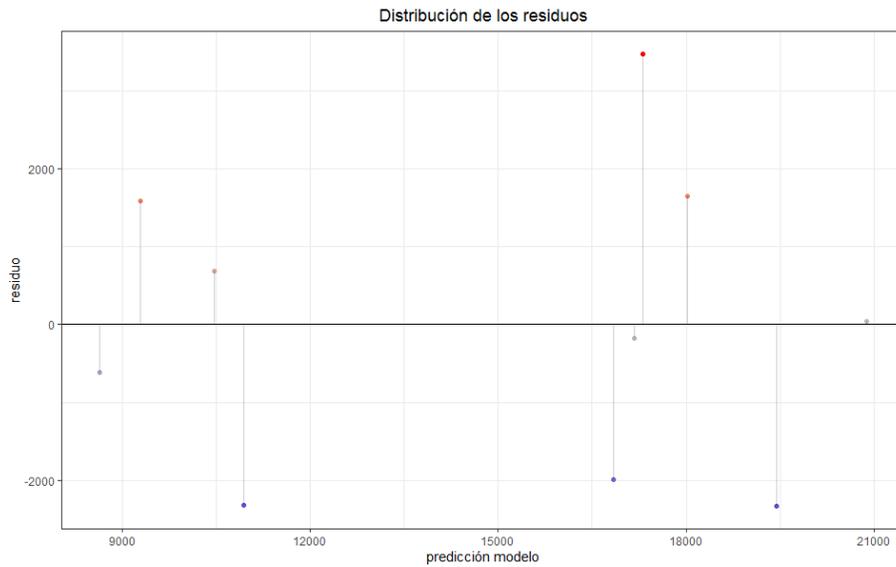
$$Electricidad_{lineabase (2,5\%)} = 0,3343 \cdot Ocupación + 5233,05 + \varepsilon_i$$

$$Electricidad_{lineabase (97,5\%)} = 0,6820 \cdot Ocupación + 10797 + \varepsilon_i$$



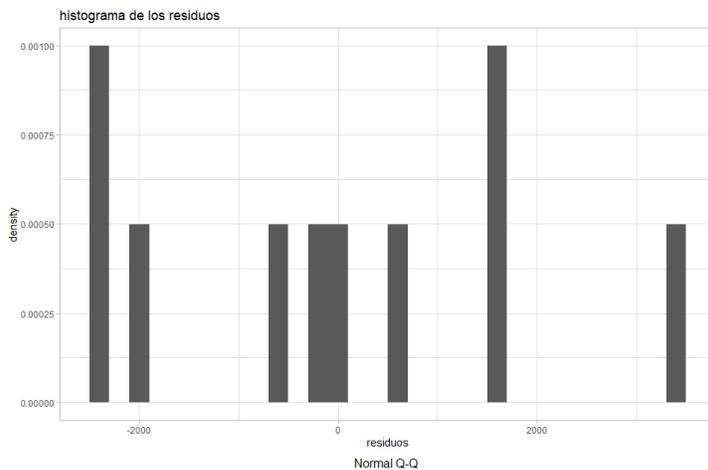
Para garantizar que el modelo desarrollado anteriormente es válido, se realizan las pruebas de los supuestos estadísticos mencionados.

**a. Linealidad**



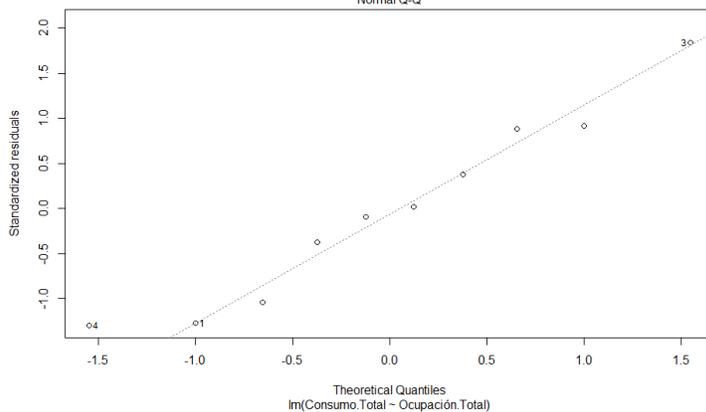
La gráfica de distribución de los residuos, muestra que los mismos se distribuyen de forma aleatoria en torno al 0, por lo que se acepta el supuesto de linealidad.

**b. Normalidad**



```
> #Shapiro wilks Test (Normalidad)
> shapiro.test(residuals(RegModel.1))
```

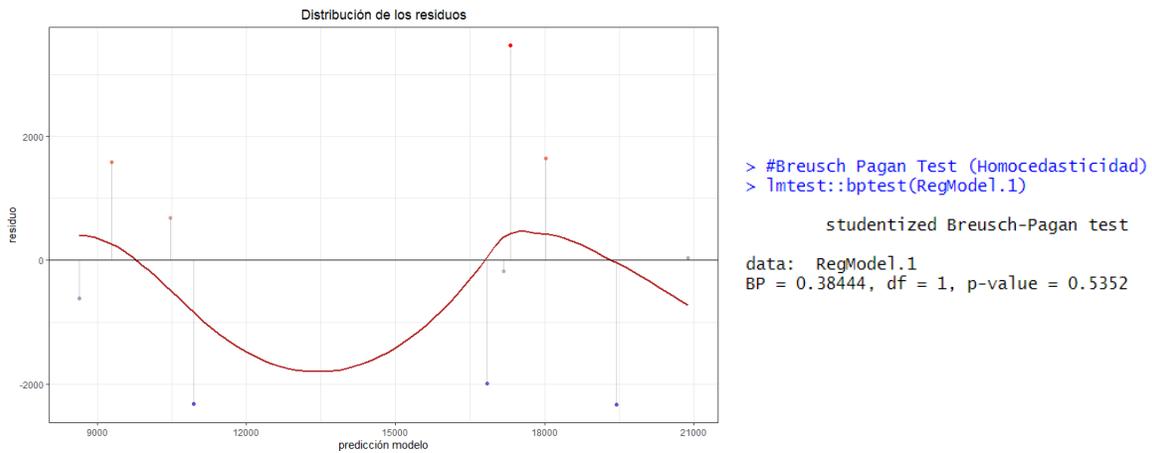
Shapiro-wilk normality test



data: residuals(RegModel.1)  
W = 0.94192, p-value = 0.5746

A través del histograma se presenta que los residuos se distribuyen de forma normal con media 0. El gráfico Q-Q que ubica los cuartiles de la distribución de la muestra respecto a los cuartiles del modelo de distribución normal, presenta que ambas distribuciones siguen un comportamiento sobre una línea recta y, por ende, se acepta el supuesto de linealidad. Además, el estadístico Shapiro Wilks obtiene un P value de 0,5746 que resulta  $\geq 0,05$ . Tanto la representación gráfica como el contraste de hipótesis confirman la distribución normal de los residuos.

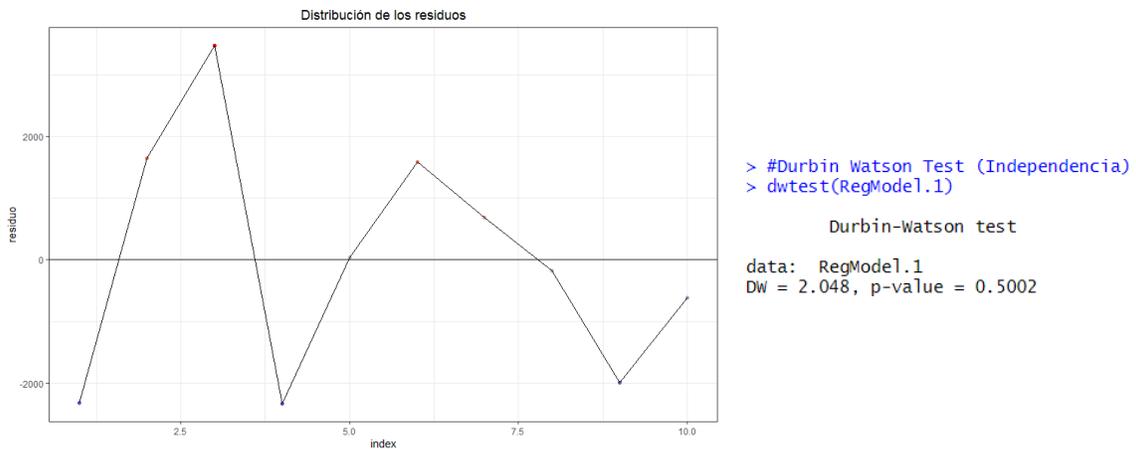
**c. Homocedasticidad**



El análisis de la gráfica de distribución de los residuos visualiza que la variabilidad de los residuos es constante a lo largo del eje X (el tamaño de los residuos no aumenta ni disminuye de forma sistemática ni significativa con variaciones de y) y la prueba estadística de Breusch Pagan, arroja un P value de 0,5352 que resulta  $\geq 0,05$ .

Ni la representación gráfica ni el contraste de hipótesis muestran evidencias sobre la falta de homocedasticidad.

**d. Independencia**



La representación gráfica de los residuos muestra que los residuos no tienen ninguna tendencia marcada y no poseen algún tipo de autocorrelación entre ellos, es decir, que son independientes. El estadístico de Durbin Watson, confirma que no hay problemas de independencia al obtenerse un P value de  $0,5002 \geq 0,05$ .

Otra forma de verificar el cumplimiento de los supuestos estadísticos requeridos para que el modelo de regresión lineal univariable sea válido, es el uso de la herramienta `gvlma` [12] (paquete en R Studio) que realiza una prueba global sobre el modelo lineal.

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Ocupación.Total, data = X2017_DatosOcupacionFiltrados)
```

```
Coefficients:
(Intercept)  Ocupación.Total
 8015.0248      0.5082
```

```
ASSESSMENT OF THE LINEAR MODEL ASSUMPTIONS
USING THE GLOBAL TEST ON 4 DEGREES-OF-FREEDOM:
Level of Significance = 0.05
```

```
Call:
gvlma(x = RegModel.1)
```

	Value	p-value	Decision
Global Stat	2.15599	0.7071	Assumptions acceptable.
Skewness	0.14058	0.7077	Assumptions acceptable.
Kurtosis	0.29998	0.5839	Assumptions acceptable.
Link Function	0.06023	0.8061	Assumptions acceptable.
Heteroscedasticity	1.65519	0.1983	Assumptions acceptable.

Los resultados de la prueba global (`gvlma`) confirman que todos los supuestos del modelo de regresión lineal univariable están comprobados. Es válido usar el modelo de regresión lineal para cuantificar el consumo de energía en función de la variable relevante independiente ("ocupación Total").

### 7.2.1.2. Modelo de Regresión Lineal Multivariable

Se construyó un modelo de regresión lineal multivariable con todas las variables disponibles (Temperatura, Humedad, Radiación y Ocupación Total)

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Temperatura + Humedad + Radiación +
    Ocupación.Total, data = X2017_Mensual)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2592.8  -663.8   -99.0    376.2   4577.0

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -8.622e+04  1.157e+05  -0.745  0.48053
Temperatura  2.473e+03  3.390e+03   0.729  0.48945
Humedad     2.552e+02  5.637e+02   0.453  0.66442
Radiación   3.997e+01  3.434e+01   1.164  0.28257
Ocupación.Total 5.125e-01  9.833e-02   5.212  0.00124 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2320 on 7 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8456,    Adjusted R-squared:  0.7574
F-statistic: 9.585 on 4 and 7 DF,  p-value: 0.005725
```

El análisis estadístico de las variables, muestra que las variables Temperatura, Humedad y Radiación no son significativas en el modelo, dado que su p value es mayor a 0,05. En este caso, la única variable significativa en el modelo es la variable ocupación.

Sin embargo, en este caso se busca obtener un modelo de regresión que integre más de 1 variable independiente, para conocer que variables son las más apropiadas para definir el modelo de regresión multivariable. De tal forma, se empleó la función *step* del software estadístico R Studio que permite realizar una regresión gradual, en tanto agrega y elimina iterativamente predictores (variables independientes) en el modelo de regresión. Lo anterior, para encontrar el subconjunto de variables que da como resultado el modelo con mejor rendimiento, siendo un modelo que reduce el error de predicción.

```
> step(Modelo1, direction = "both", trace = 0)
```

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Radiación + Ocupación.Total, data = X2017_Mensual)
```

```
Coefficients:
(Intercept)      Radiación  Ocupación.Total
-1.606e+04      6.483e+01      4.681e-01
```

Empleando la función en los datos del modelo, se obtuvo que el mejor modelo de regresión lineal multivariable es el compuesto por las variables Radiación y Ocupación Total, dando así lugar al siguiente modelo:

```

Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Radiación + Ocupación.Total, data = X2017_Mensual)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3314  -1107     19    1094   4459

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -1.606e+04  7.199e+03  -2.231 0.052581 .
Radiación    6.483e+01  1.750e+01   3.704 0.004889 **
Ocupación.Total 4.681e-01  7.799e-02   6.002 0.000202 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2155 on 9 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8288,    Adjusted R-squared:  0.7908
F-statistic: 21.79 on 2 and 9 DF,  p-value: 0.0003551
    
```

Ahora, el modelo desarrollado se describe como:

$$Electricidad_{lineabase} = 64,83 \cdot Radiación + 0,4681 \cdot Ocupación - 16060 + \varepsilon_i$$

El modelo tiene un  $R^2$  Ajustado= 0,7908 indica que el modelo explica el 79,08% de la variabilidad de las observaciones (datos). El valor de  $R^2$  ajustado mide el porcentaje de la variación en la respuesta siendo explicada por el modelo, sin embargo, se ajusta al número de variables predictoras en el modelo. El modelo tiene un valor p de 0,00035 para el estadístico F que indica que la relación lineal es estadísticamente significativa ( $0,00035 < 0,05$ ).

Otro elemento analizado son los intervalos de confianza del modelo que nos permite contar con dos ecuaciones, en la cual podría estar el rango de pronóstico del modelo de regresión lineal multivariable.

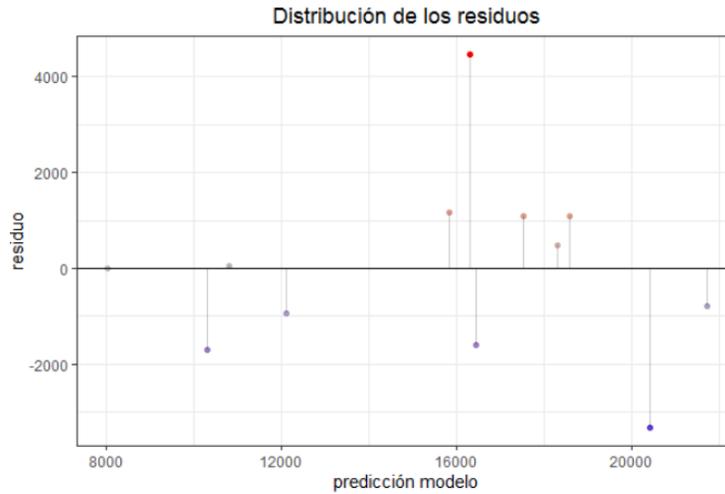
		2.5 %	97.5 %
(Intercept)	-3.234722e+04	221.7556870	
Radiación	2.523820e+01	104.4212727	
Ocupación.Total	2.916365e-01	0.6444848	

$$Electricidad_{lineabase} (2,5\%) = 25,2382 \cdot Radiación + 0,2916 \cdot Ocupación - 32347,22 + \varepsilon_i$$

$$Electricidad_{lineabase} (97,5\%) = 104,421 \cdot Radiación + 0,6444 \cdot Ocupación + 221,7556 + \varepsilon_i$$

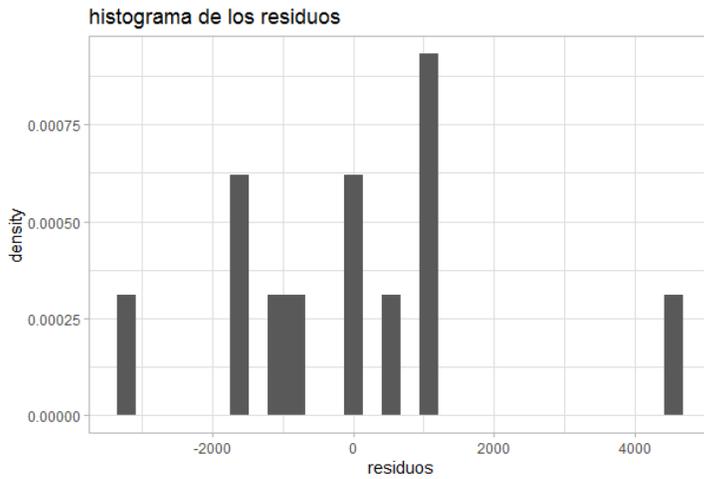
Para garantizar que el modelo desarrollado es válido, se prueban los mismos supuestos estadísticos que para el modelo de regresión lineal univariable, adicionando la prueba de multicolinealidad.

**a. Linealidad**



La gráfica de distribución de los residuos, muestra que los residuos se distribuyen de forma aleatoria en torno al 0 lo que permite aceptar el supuesto de linealidad.

**b. Normalidad:**

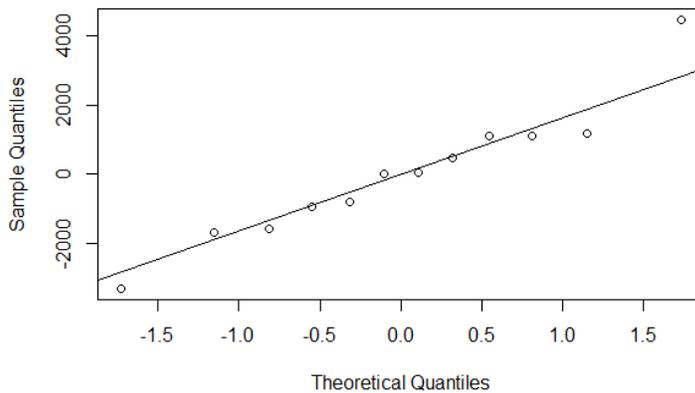


```
> #Shapiro Wilks Test (Normalidad)
> shapiro.test(residuals(Modelo3))
```

Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(Modelo3)  
w = 0.94408, p-value = 0.5527

**Normal Q-Q Plot**



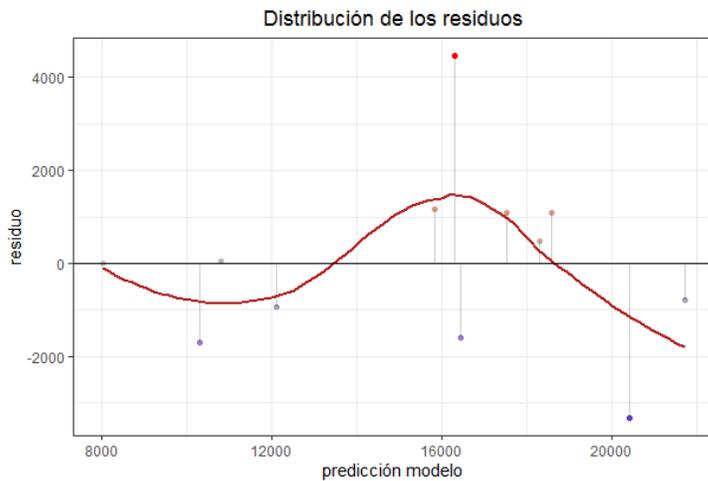
Por medio del histograma se presenta los residuos en su distribución de forma normal con media 0. El gráfico Q-Q que sitúa los cuartiles de la distribución de la muestra respecto a los cuartiles del modelo de distribución normal, presenta que ambas distribuciones siguen un comportamiento sobre una línea recta y se acepta el supuesto de linealidad. Además, el estadístico Shapiro Wilks obtiene un P value de 0,5527 que resulta  $\geq 0,05$ .

Tanto la representación gráfica como el contraste de hipótesis confirman la distribución normal de los residuos.

**c. Homocedasticidad**

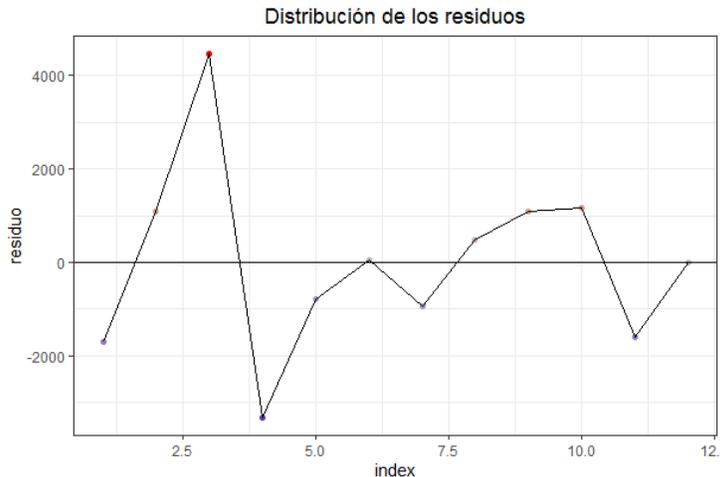
El análisis de la gráfica de distribución de los residuos visualiza que la variabilidad de los residuos es constante a lo largo del eje X (el tamaño de los residuos no aumenta ni disminuye de forma sistémica ni significativa con variaciones de y) y la prueba estadística de Breusch Pagan, arroja un P value de 0,2914 que resulta  $\geq 0,05$ .

Ni la representación gráfica ni el contraste de hipótesis muestran evidencias sobre la falta de homocedasticidad.



```
> lmtest::bptest(Modelo3)
studentized Breusch-Pagan test
data: Modelo3
BP = 2.4661, df = 2, p-value = 0.2914
```

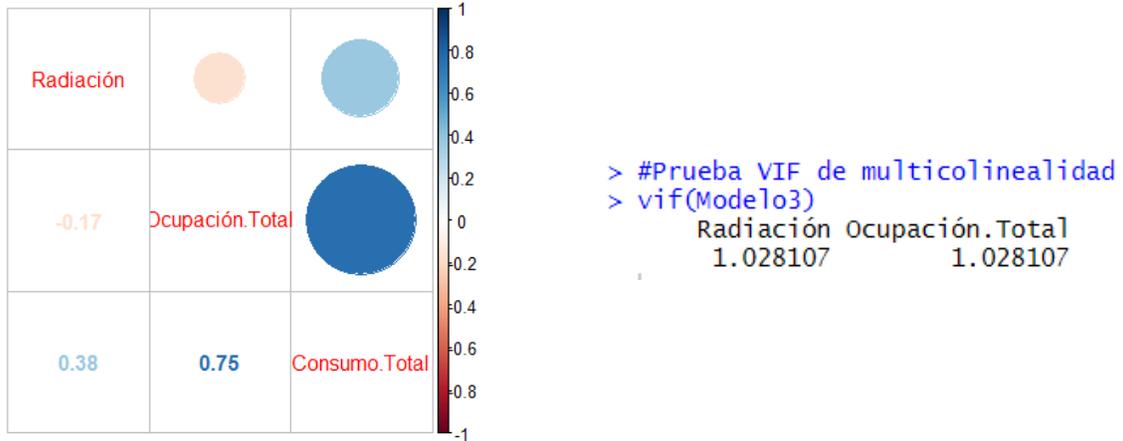
**d. Independencia**



```
> #Durbin Watson Test (Independencia)
> dwtest(Modelo3)
Durbin-watson test
data: Modelo3
DW = 2.3954, p-value = 0.6707
```

La representación gráfica de los residuos muestra que los residuos no tienen ninguna tendencia marcada y no poseen algún tipo de autocorrelación entre ellos, es decir, que son independientes, El estadístico de Durbin Watson, confirma que no hay problemas de independencia al obtenerse un P value de  $0,6707 \geq 0,05$ .

**e. Multicolinealidad**



La figura de correlación de variables presenta el diagrama y los coeficientes de correlación entre las variables independientes del modelo (Radiación y Ocupación Total), donde se evidencia que la dependencia entre las variables es baja. Entre más pequeño el valor de R menor es la dependencia entre las variables, para este caso, la correlación entre ellas es de -0,17. Además, como los valores de VIF (Factor de Inflación de Varianza) para cada variable es menor a 10, el modelo no presenta problemas de multicolinealidad.

En la Tabla 92 se resumen los modelos de regresión lineal obtenidos y el cumplimiento de los supuestos estadísticos que validan el modelo.

Tabla 92. Consolidado cumplimiento de supuestos estadísticos de los modelos de Regresión

Modelo \ Prueba	Linealidad	Normalidad	Homocedasticidad	Independencia	Multicolinealidad
Univariable $Electricidad_{LB} = 0,5082 \cdot Ocupación + 8015$	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	No Aplica
Multivariable $Electricidad_{LB} = 64,83 \cdot Radiación + 0,4681 \cdot Ocupación - 16060$	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

**Ajuste de bondad de los modelos de regresión lineal**

En la Tabla 93 se presenta la prueba de bondad de ajuste de los modelos de regresión lineal univariable y multivariable. Esta prueba se realiza, empleando la ecuación obtenida y los datos originales con los que fue creado el modelo, su fin es obtener el error porcentual absoluto medio (MAPE) de cada modelo y así conocer que también se ajusta a sus datos originales. El MAPE indica el tamaño del error del pronóstico debido a que se toma sólo la magnitud del error (valor absoluto), lo cual da la idea de la exactitud esperada del pronóstico.

Para el modelo de regresión lineal univariable el MAPE es del 15,16% y para el modelo de regresión lineal multivariable es del 8,73%. Según los valores obtenidos por cada modelo de regresión lineal para la serie de datos iniciales, el modelo que mejor pronostica en el modelo de regresión múltiple.

Tabla 93. Ajuste de bondad de los modelos de regresión lineal

Mes/Año	Modelo Univariable 2017			Modelo Multivariable 2017		
	Consumo Estimado	Diferencia	Error	Consumo Estimado	Diferencia	Error
Enero	10940,54	-2319,54	26,9%	10314,11	-1693,11	19,6%
Febrero	18025,78	1646,22	8,4%	18582,92	1089,08	5,5%
Marzo	17311,59	3470,41	16,7%	16326,96	4455,04	21,4%
Abril	19451,23	-2331,23	13,6%	20437,67	-3317,67	19,4%
Mayo	20878,81	40,19	0,2%	21719,10	-800,10	3,8%
Junio	9284,59	1584,41	14,6%	10827,79	41,21	0,4%
Julio	10472,15	690,85	6,2%	12110,89	-947,89	8,5%
Agosto	11501,00	7304,00	38,8%	18327,81	477,19	2,5%
Septiembre	12222,13	6397,87	34,4%	17527,40	1092,60	5,9%
Octubre	17180,98	-173,98	1,0%	15838,42	1168,58	6,9%
Noviembre	16845,14	-1984,14	13,4%	16456,86	-1595,86	10,7%
Diciembre	8644,41	-621,41	7,7%	8032,03	-9,03	0,1%
<b>RMSE</b>	3255,665934			1865,953174		
<b>MAPE</b>	15,16%			8,73%		

**Validación de los modelos y capacidad de pronóstico**

La información que se utilizó para crear los modelos corresponde al 2017, para realizar la validación de los mismos se usaron los datos de los 3 meses siguientes (enero, febrero y marzo de 2018) equivalente a un 25% de datos con los que se establecieron los modelos. En cada uno de ellos se evalúa el error porcentual absoluto medio (MAPE) y a partir del 4 mes se presentan los valores en los que variará el pronóstico de valores de la LBE.

**Modelo univariable**

La Tabla 94 presenta los valores obtenidos al evaluar la capacidad de pronóstico del modelo de regresión lineal univariable, con un MAPE del 28,18% que representa el error de pronóstico del modelo.

Tabla 94. Capacidad de pronóstico del modelo de Regresión lineal univariable

Mes/Año	2018					
	Consumo Real	Consumo Estimado	Error	Error Porcentual	Error Absoluto	Error Absoluto Porcentual
Enero	11968	11235,72	732,28	6,12%	732,28	6,1%
Febrero	18612	10321,97	8290,03	44,54%	8290,03	44,5%
Marzo	17855	11805,16	6049,84	33,88%	6049,84	33,9%
<b>Medidas de Error de Pronóstico</b>			<b>ME</b>	<b>MPE</b>	<b>MAE</b>	<b>MAPE</b>
<b>Valores</b>			5024,05	28,18%	5024,05	28,18%
<b>Capacidad de Pronóstico del Modelo</b>			Exactitud		Nivel de Incertidumbre	

El modelo de pronóstico univariable sobrestima el consumo total de energía con un sesgo promedio e incertidumbre de  $\pm 5024,05$  kWh/mes (que representa un 28,18% del valor real) como es presentado en la Tabla 95 y la Figura 229.

Tabla 95. Capacidad de pronóstico modelo univariable

Mes	Consumo Real	Sesgo	Error Máximo	Error Mínimo
Enero	11968			
Febrero	18612			
Marzo	17855			
Abril	18971	23995,05	23995,05	13946,95
Mayo	18237	23261,05	23261,05	13212,95
Junio	10451	15475,05	15475,05	5426,95
Julio	13730	18754,05	18754,05	8705,95
Agosto	19142	24166,05	24166,05	14117,95
Septiembre	18290	23314,05	23314,05	13265,95
Octubre	17515	22539,05	22539,05	12490,95
Noviembre	14198	19222,05	19222,05	9173,95
Diciembre	9414	14438,05	14438,05	4389,95

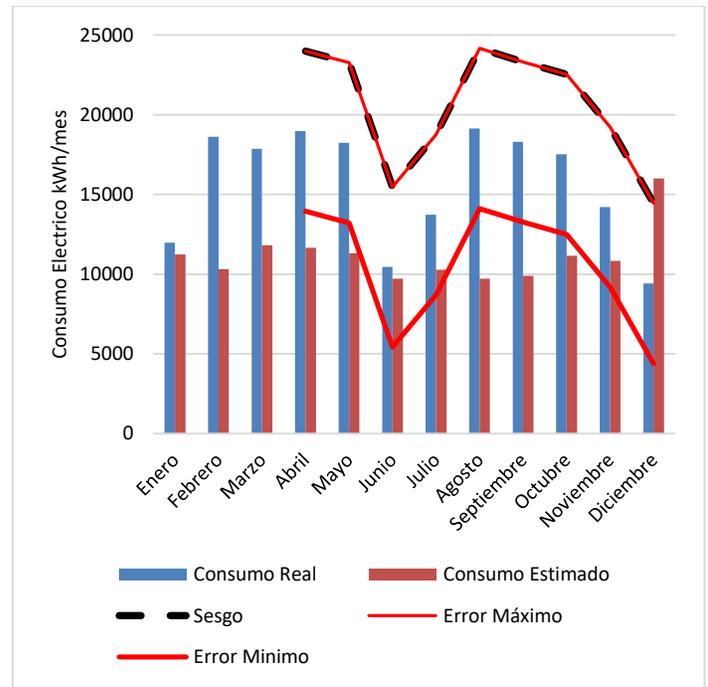


Figura 229. Capacidad de pronóstico modelo univariable

**Modelo Multivariable**

La Tabla 96, presenta los valores obtenidos al evaluar la capacidad de pronóstico del modelo de regresión lineal multivariable, con un MAPE del 22,85% que representa el error de pronóstico del modelo.

Tabla 96. Capacidad de pronóstico del modelo de Regresión lineal multivariable

Mes/Año	2018					
	Consumo Real	Consumo Estimado	Error	Error Porcentual	Error Absoluto	Error Absoluto Porcentual
Enero	11968	10261,94	1706	14,26%	1706,06	14,26%
Febrero	18612	12106,34	6506	34,95%	6505,66	34,95%
Marzo	17855	14399,28	3456	19,35%	3455,72	19,35%
<b>Medidas de Error de Pronóstico</b>			<b>ME</b>	<b>MPE</b>	<b>MAE</b>	<b>MAPE</b>
<b>Valores</b>			3889,14	22,85%	3889,14	22,85%
<b>Capacidad de Pronóstico del Modelo</b>			Exactitud		Nivel de Incertidumbre	

El modelo de pronóstico sobrestima el consumo total de energía con un sesgo promedio e incertidumbre de ± 3889,14 kWh/mes (que representa un 28,18% del valor real), como es presentado en la Tabla 97 y la Figura 230.

Tabla 97. Capacidad de pronóstico modelo multivariable

Mes	Consumo Real	Sesgo	Error Máximo	Error Mínimo
Enero	11968			
Febrero	18612			
Marzo	17855			
Abril	18971	22860,14	22860,14	15081,86
Mayo	18237	22126,14	22126,14	14347,86
Junio	10451	14340,14	14340,14	6561,86
Julio	13730	17619,14	17619,14	9840,86
Agosto	19142	23031,14	23031,14	15252,86
Septiembre	18290	22179,14	22179,14	14400,86
Octubre	17515	21404,14	21404,14	13625,86
Noviembre	14198	18087,14	18087,14	10308,86
Diciembre	9414	13303,14	13303,14	5524,86

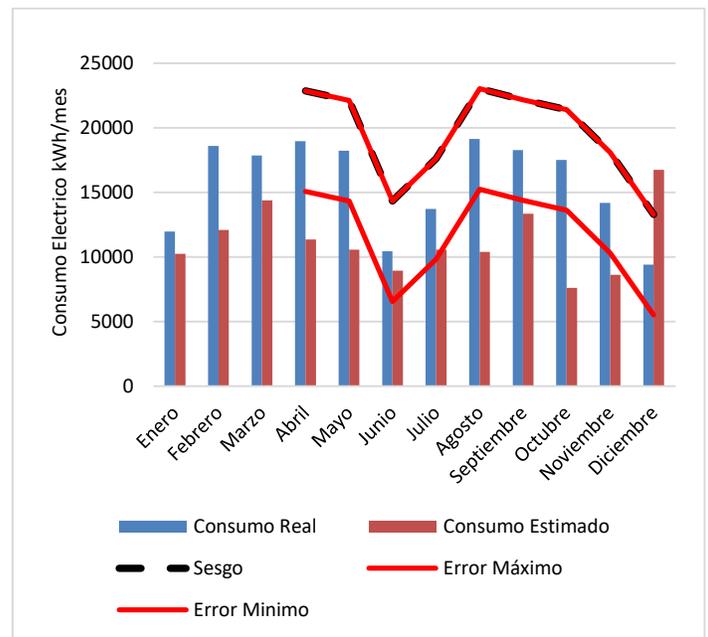


Figura 230. Capacidad de pronóstico modelo multivariable

**7.2.1.3. Modelo de Regresión Lineal para el año 2018**

Con información disponible del año 2018 (Tabla 98), se construyó el modelo de regresión lineal multivariable con todas las variables disponibles (Temperatura, Humedad, Radiación y Ocupación Total).

Tabla 98. Información mensual de variables monitoreadas en el edificio para el 2018

Mes/Variable	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Radiación [W/m2]	Ocupación [horas]	Consumo Total [kWh]
Enero	23,533	77,879	360,255	6337,50	11968
Febrero	24,755	73,395	401,687	4539,50	18612
Marzo	25,187	73,040	415,983	7458,00	17855
Abril	23,700	78,738	371,425	7160,00	18971
Mayo	23,698	80,082	363,996	6490,00	18237
Junio	24,908	74,671	361,735	3340,50	10451
Julio	25,137	71,986	378,773	4443,83	13730
Agosto	24,846	70,698	383,925	3339,17	19142
Septiembre	25,496	68,678	426,743	3720,50	18290
Octubre	24,290	74,760	207,902	6157,00	17515
Noviembre	23,899	80,624	340,688	5544,33	14198
Diciembre	24,500	75,626	392,649	15711,00	9414

Call:

```
lm(formula = Consumo_Total ~ Temperatura + Humedad + Radiacion +
    OcupTotal, data = X2018_Mensual)
```

Residuals:

```
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-5258.3 -2161.6   792.1  2212.4  3528.4
```

Coefficients:

```
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.404e+05  1.570e+05   0.895   0.401
Temperatura  -3.276e+03  4.348e+03  -0.753   0.476
Humedad      -5.854e+02  7.552e+02  -0.775   0.464
Radiacion     5.465e+00  2.327e+01   0.235   0.821
OcupTotal    -4.180e-01  3.724e-01  -1.122   0.299
```

Residual standard error: 3865 on 7 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.2491, Adjusted R-squared: -0.1799

F-statistic: 0.5806 on 4 and 7 DF, p-value: 0.6867

El análisis estadístico de las variables muestra que ninguna de estas es realmente significativa para el modelo de regresión, en tanto todas tienen un p value mayor a 0,05. Además, el valor de  $R^2$  ajustado del modelo es negativo (-0,1799), lo que indica que el modelo obtenido explica en un 0% la variabilidad de las observaciones (datos), es decir, que las variables no describen el comportamiento de la variable consumo.

**Modelo de Regresión Lineal con información semanal**

Con el fin de obtener un modelo de regresión lineal multivariable, un poco más depurado o detallado y, según la información disponible, se realizó un modelo con datos semanales del año 2018. Se encontró que a lo largo del año (52 semanas), se presentan diferentes tipos de “semana” según el periodo académico, como lo presentan la

Tabla 99 y la Figura 231.

Tabla 99. Distribución del tipo de semana para el año 2018

Periodo	Detalle	Semanas
Invierno	Vacaciones de semestre 2 (entre diciembre y enero)	2, 3, 49, 50, 51
Semestre 1	Periodo de clases académicas	4 – 22 (Excepto la Sem 13)
Vacaciones	Periodo que la Universidad se encuentra totalmente cerrada	1, 13 (Semana Santa), 26, 52
Verano	Vacaciones de semestre 1 (entre junio y Julio)	23, 24, 25, 27, 28, 29
Semestre 2	Periodo de clases académicas	30 – 48

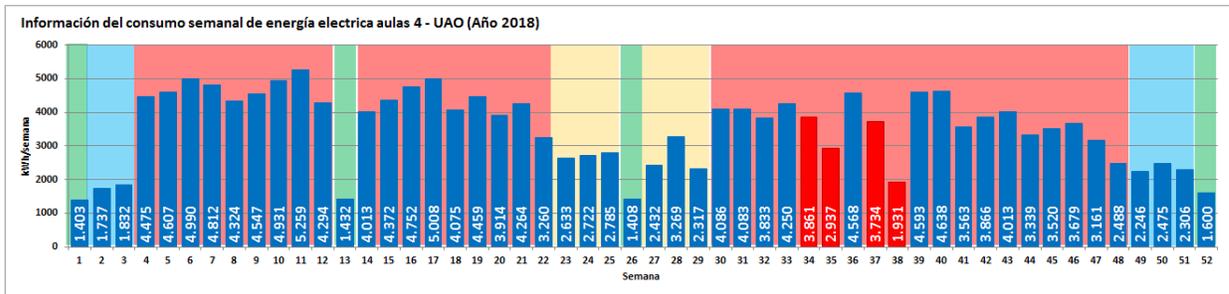


Figura 231. Distribución del tipo de semana para el año 2018

Al procesar los datos medidos de consumo de energía se encontró que el medidor presentó problemas y no registró información en varios momentos de las semanas 34, 35, 37 y 38 (Semanas en rojo en la Figura 231). Por lo tanto, la información de estas semanas fue excluida en los análisis realizados.

Para la obtención del modelo de regresión lineal multivariable, se utilizó la información del tipo de semana clasificada como semestre, pues son los periodos con mayor consumo de energía y, donde se realizan las actividades académicas.

La Tabla 100. Presenta la información de las semanas clasificadas como semestre.

Tabla 100. Datos semanales – Periodo Semestre del año 2018.

Semana	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Radiación [W/m <sup>2</sup> ]	Ocupación [horas]	Consumo Total [kWh]	Tipo de Semana
4	24,59	74,85	341,06	380,50	4432,777	Semestre
5	25,32	73,02	348,18	596,00	4644,356	Semestre
6	25,34	73,14	389,64	1004,50	4981,32	Semestre
7	24,69	75,58	389,60	1132,50	4836,71	Semestre
8	23,98	74,57	412,97	1211,50	4359,954	Semestre
9	24,87	69,54	452,53	1731,50	4537,477	Semestre
10	26,04	69,44	423,77	1722,00	4955,343	Semestre
11	26,08	67,26	470,15	1643,50	5234,621	Semestre
12	24,48	76,72	418,05	1658,50	4277,57	Semestre
14	22,66	80,75	379,72	1612,00	4027,239	Semestre
15	23,56	77,46	401,31	1626,50	4376,808	Semestre
16	24,61	76,98	362,71	1708,50	4717,731	Semestre
17	23,93	79,79	325,64	1907,00	4930,622	Semestre
18	24,22	78,48	416,59	1522,50	4137,512	Semestre
19	23,05	82,28	322,40	1323,50	4388,022	Semestre
20	23,71	79,80	363,80	1473,50	3990,811	Semestre
21	23,94	78,78	356,55	1486,50	4284,221	Semestre
22	24,14	80,08	360,68	1301,50	3251,571	Semestre
30	24,29	75,86	355,96	619,50	4088,809	Semestre
31	23,64	77,97	359,43	644,17	4115,94	Semestre
32	24,15	70,53	333,94	771,50	3822,71	Semestre
33	25,08	70,17	390,96	818,00	4257,771	Semestre
36	25,28	68,41	384,73	1006,50	4512,883	Semestre
39	25,66	68,40	422,90	1160,50	4586,678	Semestre
40	25,10	70,62	456,87	1178,00	4732,091	Semestre
41	23,31	76,17	386,45	1218,00	3718,854	Semestre
42	24,53	73,81	393,36	1353,50	3985,087	Semestre
43	24,39	76,15	394,03	1554,50	3825,184	Semestre
44	23,65	80,55	358,06	1618,50	3093,856	Semestre
45	23,76	80,51	373,16	1692,00	3539,902	Semestre
46	24,49	78,84	359,11	1553,00	3732,104	Semestre
47	24,24	79,82	332,53	1310,00	3182,082	Semestre
48	22,85	83,66	322,75	1111,33	2471,073	Semestre

Se realizó el modelo de regresión lineal multivariable con las variables disponibles y se encontró que para los datos fuente del modelo, ninguna de las variables es realmente significativa dado que todas tienen en el modelo un p value mayor a 0,05. Por lo anterior, era de esperar que el modelo desarrollado no tuviera un buen  $R^2$  ajustado, así el valor de

0,3622 indica que el modelo explica apenas el 36,22% de la variabilidad de las observaciones (datos).

```
> names(X2018_Semana_AnalisisR) <- make.names(names(X2018_Semana_AnalisisR))
> Modelo1<-lm(Consumo.Total~Temperatura+Humedad+Radiación+Ocupación.Total,data=X2018_Semana_AnalisisR)
> summary(Modelo1)
```

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Temperatura + Humedad + Radiación +
    Ocupación.Total, data = X2018_Semana_AnalisisR)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-911.70 -351.34  43.55  352.27  947.47
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1510.8725   7924.0816    0.191  0.850
Temperatura    234.8866    191.0816    1.229  0.229
Humedad       -47.1084     45.2597   -1.041  0.307
Radiación      0.6718     3.6535    0.184  0.855
Ocupación.Total  0.2050     0.2895    0.708  0.485
```

```
Residual standard error: 487.3 on 28 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4419,    Adjusted R-squared:  0.3622
F-statistic: 5.543 on 4 and 28 DF,  p-value: 0.002044
```

Así mismo, se realizaron las pruebas para verificar el cumplimiento de los supuestos estadísticos por parte del modelo desarrollado. Se hizo uso de la prueba global (gvlma de R Studio) y de la prueba VIF para descartar multicolinealidad, de esta manera se obtuvo que el modelo cumple con los supuestos estadísticos.

```
ASSESSMENT OF THE LINEAR MODEL ASSUMPTIONS
USING THE GLOBAL TEST ON 4 DEGREES-OF-FREEDOM:
Level of Significance = 0.05
```

```
Call:
gvlma(x = Modelo1)
```

	Value	p-value	Decision
Global Stat	1.96684	0.7419	Assumptions acceptable.
Skewness	0.00279	0.9579	Assumptions acceptable.
Kurtosis	0.38301	0.5360	Assumptions acceptable.
Link Function	0.27573	0.5995	Assumptions acceptable.
Heteroscedasticity	1.30530	0.2532	Assumptions acceptable.

```
>
> #Prueba VIF de multicolinealidad
> vif(Modelo1)
      Temperatura      Humedad      Radiación  Ocupación.Total
      3.525351      5.557190      2.699026      1.722461
```

Sin embargo, el modelo desarrollado anteriormente no es un buen modelo, pues el nivel de correlación es muy bajo para usarse como herramienta de pronóstico. Solo describe el 36,22% de variación o comportamiento de los datos.

Teniendo en cuenta las características de los datos y de los periodos semestrales del año 2018, se decidió partir la información y trabajar modelos de regresión por periodo semestral 2018 – 1 y periodo semestral 2018 – 3.

**Periodo 2018 – 1**

La Tabla 101. Presenta los datos medidos para el periodo 2018 – 1.

Tabla 101. Datos semanales – Semestre 1 del 2018.

Semana	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Radiación [W/m2]	Ocupación [horas]	Consumo Total [kWh]	Tipo de Semana
4	24,59	74,85	341,06	380,50	4432,777	Semestre
5	25,32	73,02	348,18	596,00	4644,356	Semestre
6	25,34	73,14	389,64	1004,50	4981,32	Semestre
7	24,69	75,58	389,60	1132,50	4836,71	Semestre
8	23,98	74,57	412,97	1211,50	4359,954	Semestre
9	24,87	69,54	452,53	1731,50	4537,477	Semestre
10	26,04	69,44	423,77	1722,00	4955,343	Semestre
11	26,08	67,26	470,15	1643,50	5234,621	Semestre
12	24,48	76,72	418,05	1658,50	4277,57	Semestre
14	22,66	80,75	379,72	1612,00	4027,239	Semestre
15	23,56	77,46	401,31	1626,50	4376,808	Semestre
16	24,61	76,98	362,71	1708,50	4717,731	Semestre
17	23,93	79,79	325,64	1907,00	4930,622	Semestre
18	24,22	78,48	416,59	1522,50	4137,512	Semestre
19	23,05	82,28	322,40	1323,50	4388,022	Semestre
20	23,71	79,80	363,80	1473,50	3990,811	Semestre
21	23,94	78,78	356,55	1486,50	4284,221	Semestre
22	24,14	80,08	360,68	1301,50	3251,571	Semestre

Se realizó el modelo de regresión lineal multivariable con las variables disponibles y se encontró que para los datos fuente del modelo, la variable Humedad resulta realmente significativa para un modelo de regresión con un p value de 0,0475. El modelo desarrollado con todas las variables posee un  $R^2$  Ajustado de 0,449, es decir, que el modelo explica el 44,9 % de la variabilidad de las observaciones (datos).

```
> names(X2018_1_Semana_AnalisisR) <- make.names(names(X2018_1_Semana_AnalisisR))
> Modelo1<-lm(Consumo.Total~Temperatura+Humedad+Radiación+Ocupación.Total,data=X2018_1_Semana_AnalisisR)
> summary(Modelo1)
```

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Temperatura + Humedad + Radiación +
    Ocupación.Total, data = X2018_1_Semana_AnalisisR)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-844.74 -122.35   26.19  196.72  469.14
```

```
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  16876.3214  9942.2155   1.697  0.1134
Temperatura    -7.7072   208.4028  -0.037  0.9711
Humedad      -129.1702   59.0140  -2.189  0.0475 *
Radiación     -7.8953    3.7520  -2.104  0.0554 .
Ocupación.Total  0.4594    0.2576   1.784  0.0978 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 343.7 on 13 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5786,    Adjusted R-squared:  0.449
F-statistic: 4.463 on 4 and 13 DF,  p-value: 0.0173
```

Al realizar las pruebas para verificar el cumplimiento de los supuestos estadísticos por parte del modelo desarrollado (Prueba global (gvlma de R Studio) y prueba VIF), se encontró que el modelo no cumple en su totalidad con los supuestos estadísticos.

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Temperatura + Humedad + Radiación +
    Ocupación.Total, data = X2018_1_Semana_AnalisisR)
```

```
Coefficients:
      (Intercept)      Temperatura      Humedad      Radiación  Ocupación.Total
      16876.3214         -7.7072        -129.1702         -7.8953          0.4594
```

```
ASSESSMENT OF THE LINEAR MODEL ASSUMPTIONS
USING THE GLOBAL TEST ON 4 DEGREES-OF-FREEDOM:
Level of Significance = 0.05
```

```
Call:
gvlma(x = Modelo1)
```

```
Global Stat      Value p-value      Decision
Skewness         3.481 0.06209      Assumptions acceptable.
Kurtosis         2.075 0.14970      Assumptions acceptable.
Link Function    1.457 0.22742      Assumptions acceptable.
Heteroscedasticity 2.508 0.11330      Assumptions acceptable.
```

```
>
> #Prueba VIF de multicolinealidad
> vif(Modelo1)
      Temperatura      Humedad      Radiación  Ocupación.Total
      5.304228      9.044484      3.526093      1.560588
```

**Periodo 2018 – 3**

La Tabla 102. Presenta los datos medidos para el periodo 2018 – 3.

Tabla 102. Datos semanales – Semestre 3 del 2018.

Semana	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Radiación [W/m2]	Ocupación [horas]	Consumo Total [kWh]	Tipo de Semana
30	24,29	75,86	355,96	619,50	4088,809	Semestre
31	23,64	77,97	359,43	644,17	4115,94	Semestre
32	24,15	70,53	333,94	771,50	3822,71	Semestre
33	25,08	70,17	390,96	818,00	4257,771	Semestre
36	25,28	68,41	384,73	1006,50	4512,883	Semestre
39	25,66	68,40	422,90	1160,50	4586,678	Semestre
40	25,10	70,62	456,87	1178,00	4732,091	Semestre
41	23,31	76,17	386,45	1218,00	3718,854	Semestre
42	24,53	73,81	393,36	1353,50	3985,087	Semestre
43	24,39	76,15	394,03	1554,50	3825,184	Semestre
44	23,65	80,55	358,06	1618,50	3093,856	Semestre
45	23,76	80,51	373,16	1692,00	3539,902	Semestre
46	24,49	78,84	359,11	1553,00	3732,104	Semestre
47	24,24	79,82	332,53	1310,00	3182,082	Semestre
48	22,85	83,66	322,75	1111,33	2471,073	Semestre

Se construyó un modelo de regresión lineal multivariable con todas las variables disponibles (Temperatura, Humedad, Radiación y Ocupación Total).

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Temperatura + Humedad + Radiación +
    Ocupación.Total, data = X2018_3_Semana_Filtrado_1_85)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-204.476  -55.812   -4.824  145.446  219.503
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -2881.2476   4573.5470  -0.630   0.5463
Temperatura    191.8413    124.0978   1.546   0.1607
Humedad       -6.2413     24.1854  -0.258   0.8029
Radiación      9.0069      2.7077   3.326   0.0104 *
Ocupación.Total -0.6743     0.1964  -3.434   0.0089 **
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 177.3 on 8 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8965,    Adjusted R-squared:  0.8447
F-statistic: 17.31 on 4 and 8 DF,  p-value: 0.0005272
```

El análisis estadístico de las variables, muestra que las variables Temperatura y Humedad no son significativas en el modelo, dado que su p value es mayor a 0,05. En este caso, las variables significativas para describir el comportamiento del Consumo Total de energía son Ocupación Total y Radiación.

Para obtener las variables más apropiadas para definir el modelo de regresión multivariable, se utilizó la función *step* del software estadístico R Studio, que permite realizar una regresión gradual que agrega y elimina iterativamente predictores (variables independientes) en el modelo de regresión, para encontrar el subconjunto de variables que da como resultado el modelo con mejor rendimiento, siendo un modelo que reduce el error de predicción.

```
> #Modelo de Regresión Óptimo
> step(Modelo1,direction = "both",trace=0)

Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Temperatura + Radiación + Ocupación.Total,
    data = X2018_3_Semana_Filtrado_1_85)

Coefficients:
(Intercept)      Temperatura      Radiación  Ocupación.Total
-3952.7752         213.4759          9.3195        -0.7089
```

Empleando la función en los datos del modelo, se obtuvo que el mejor modelo de regresión lineal multivariable es el compuesto por las variables Temperatura, Radiación y Ocupación Total, dando así lugar al siguiente modelo:

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Temperatura + Radiación + Ocupación.Total,
    data = X2018_3_Semana_Filtrado_1_85)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-210.244  -57.788   -4.553   129.381   210.599

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -3952.7752   1815.2523  -2.178 0.057405 .
Temperatura  213.4759    86.6238   2.464 0.035898 *
Radiación     9.3195    2.2927   4.065 0.002822 **
Ocupación.Total -0.7089    0.1359  -5.218 0.000551 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 167.8 on 9 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8956,    Adjusted R-squared:  0.8608
F-statistic: 25.73 on 3 and 9 DF,  p-value: 9.5e-05
```

Ahora, el modelo desarrollado se describe como:

$$Electricidad_{lineabase} = 213,47 \cdot Temperatura + 9,31 \cdot Radiación - 0,708 \cdot Ocupación - 3952,7 + \varepsilon_i$$

El modelo tiene un  $R^2$  Ajustado= 0,8608 que indica que el modelo explica el 86,08% de la variabilidad de las observaciones (datos), el valor de  $R^2$  Ajustado mide el porcentaje de la variación en la respuesta que es explicada por el modelo, pero ajustado al número de variables predictoras del mismo. El modelo tiene un valor p de  $9,5 \times 10^{-3}$  para el estadístico F que indica que la relación lineal es estadísticamente significativa ( $9,5 \times 10^{-3} < 0,05$ ).

En cuanto a los intervalos de confianza del modelo se presenta el rango o nivel de significancia del mismo en las siguientes ecuaciones que describen el modelo de regresión lineal multivariable.

```
> confint(Modelo2)
```

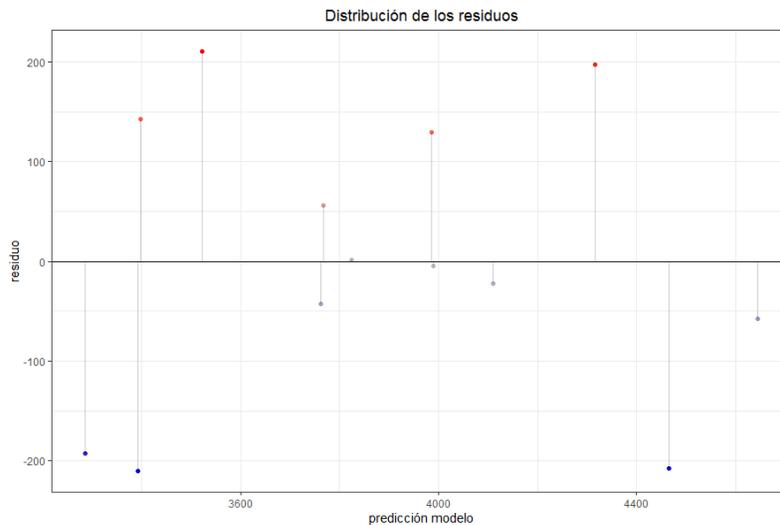
	2.5 %	97.5 %
(Intercept)	-8059.161339	153.6108630
Temperatura	17.519291	409.4325911
Radiación	4.132961	14.5059728
Ocupación.Total	-1.016190	-0.4015549

$$Electricidad_{LB(2,5\%)} = 17,52 \cdot Temperatura + 4,13 \cdot Radiación - 1,02 \cdot Ocupación - 8059,16 + \varepsilon_i$$

$$Electricidad_{LB(97,5\%)} = 409,43 \cdot Temperatura + 14,51 \cdot Radiación - 0,40 \cdot Ocupación + 153,61 + \varepsilon_i$$

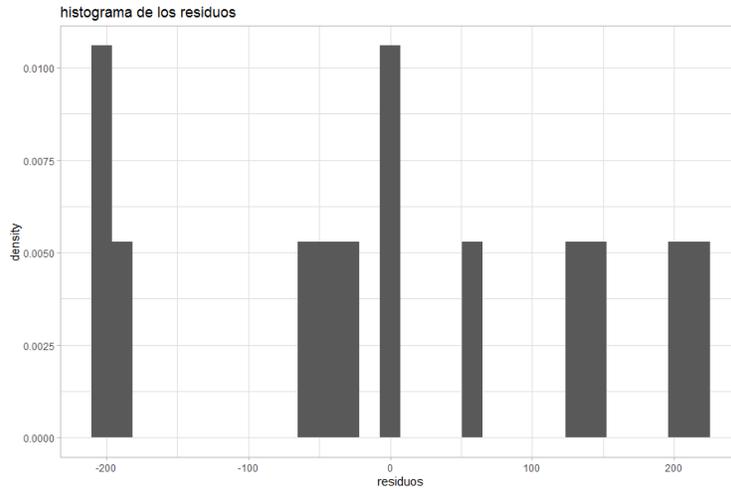
Para garantizar que el modelo desarrollado es válido, se prueban los mismos supuestos estadísticos que para el modelo de regresión lineal univariable, adicionando la prueba de multicolinealidad.

### a. Linealidad



La gráfica de distribución de los residuos, muestra que los residuos se distribuyen de forma aleatoria entorno al 0 por lo que se acepta el supuesto de linealidad.

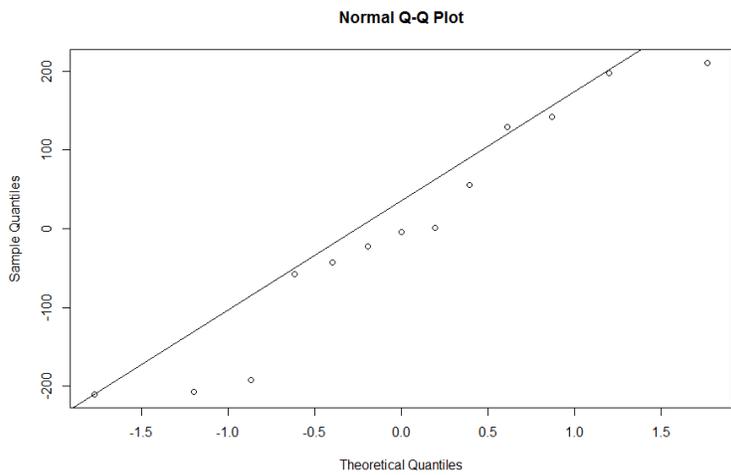
**b. Normalidad:**



```
> #Shapiro Wilks Test (Normalidad)
> shapiro.test(residuals(Modelo2))
```

Shapiro-wilk normality test

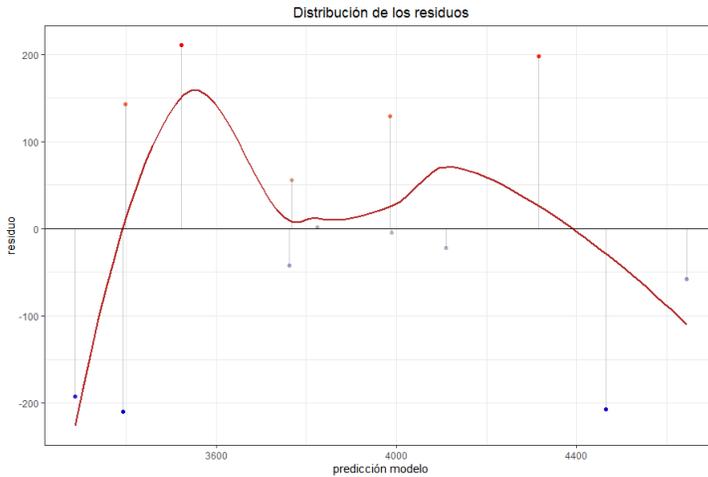
```
data: residuals(Modelo2)
W = 0.92789, p-value = 0.3198
```



La representación por medio del histograma presenta que los residuos se distribuyen de forma normal con media 0. El gráfico Q-Q que sitúa los cuartiles de la distribución de la muestra respecto a los cuartiles del modelo de distribución normal, presenta que ambas distribuciones siguen un comportamiento sobre una línea recta y se acepta el supuesto de linealidad. Además, el estadístico Shapiro Wilks obtiene un P value de 0,3198 que resulta  $\geq 0,05$ .

Tanto la representación gráfica como el contraste de hipótesis confirman la distribución normal de los residuos.

**c. Homocedasticidad**



```
> #Breusch Pagan Test (Homocedasticidad)
> lmtest::bptest(Modelo2)

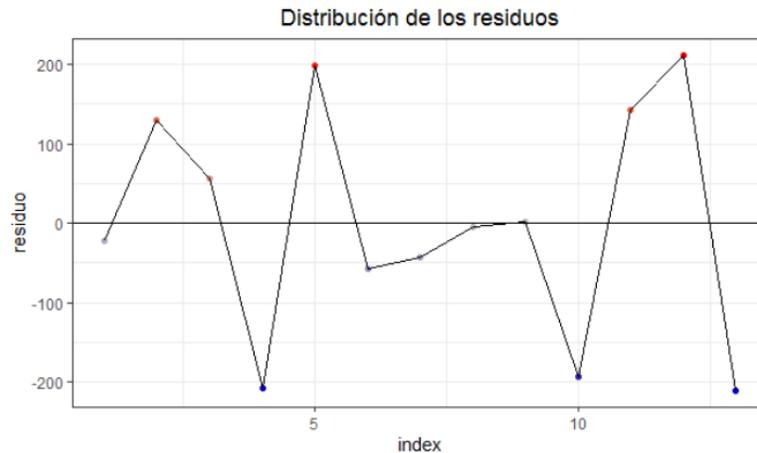
studentized Breusch-Pagan test

data: Modelo2
BP = 4.4925, df = 3, p-value = 0.213
```

El análisis de la gráfica de distribución de los residuos muestra que la variabilidad de los residuos es constante a lo largo del eje X (el tamaño de los residuos no aumenta ni disminuye de forma sistemática ni significativa con variaciones de y) y la prueba estadística de Breusch Pagan arroja un P value de 0,213 que resulta  $\geq 0,05$ .

Ni la representación gráfica ni el contraste de hipótesis muestran evidencias sobre la falta de homocedasticidad.

**d. Independencia**



```
> #Durbin Watson Test (Independencia)
> require(lmtest)
> dwtest(Modelo2)

Durbin-Watson test

data: Modelo2
DW = 2.6047, p-value = 0.7294
```

La representación gráfica de los residuos muestra que los residuos no tienen ninguna tendencia marcada y no poseen algún tipo de autocorrelación entre ellos, es decir, que son independientes, El estadístico de Durbin Watson, confirma que no hay problemas de independencia al obtenerse un P value de  $0,7294 \geq 0,05$ .

**e. Multicolinealidad**

```
> #Prueba VIF de multicolinealidad
> vif(Modelo2)
      Temperatura      Radiación Ocupación.Total
      1.505737         1.500589         1.121735
```

Como los valores de VIF (Factor de Inflación de Varianza) para cada variable es menor a 10, el modelo no presenta problemas de multicolinealidad.

**Ajuste de bondad del modelo de regresión lineal**

En la Tabla 103, se presenta la prueba de bondad de ajuste del modelo de regresión lineal multivariable. Esta prueba se realiza empleando la ecuación obtenida y los datos originales con los que fue creado el modelo, su fin es obtener el error porcentual absoluto medio (MAPE) del modelo y así conocer que también se ajusta a sus datos originales. El MAPE indica el tamaño del error del pronóstico debido a que se toma sólo la magnitud del error (valor absoluto), lo cual da la idea de la exactitud esperada del pronóstico. El modelo desarrollado tiene un MAPE del 13,15%.

Tabla 103. Ajuste de bondad del modelo de regresión lineal

Semana	2018 - 3					
	Consumo Real	Consumo Estimado	Error	Error Porcentual	Error Absoluto	Error Absoluto Porcentual
30	4088,809	4107,868	-19,06	-0,47%	19,06	0,5%
31	4115,94	3983,952	131,99	3,21%	131,99	3,2%
32	3822,71	3765,36	57,35	1,50%	57,35	1,5%
33	4257,771	4461,821	-204,05	-4,79%	204,05	4,8%
36	4512,883	4313,056	199,83	4,43%	199,83	4,4%
39	4586,678	4640,505	-53,83	-1,17%	53,83	1,2%
40	4732,091	4824,833	-92,74	-1,96%	92,74	2,0%
41	3718,854	3758,791	-39,94	-1,07%	39,94	1,1%
42	3985,087	3987,623	-2,54	-0,06%	2,54	0,1%
43	3825,184	3821,667	3,52	0,09%	3,52	0,1%
44	3093,856	3283,506	-189,65	-6,13%	189,65	6,1%
45	3539,902	3395,531	144,37	4,08%	144,37	4,1%
46	3732,104	3518,97	213,13	5,71%	213,13	5,7%
47	3182,082	3390,187	-208,11	-6,54%	208,11	6,5%
48	2471,073	3143,07	-672,00	-27,19%	672,00	27,2%
<b>Medidas de Error de Pronóstico</b>			<b>ME</b>	<b>MPE</b>	<b>MAE</b>	<b>MAPE</b>
<b>Valores</b>			-222,32	-9,34%	364,41	13,15%

### Validación del modelo y capacidad de pronóstico

La información que se utilizó para crear el modelo corresponde al tercer semestre del 2018, para realizar la validación del mismo se usaron los datos de las 3 semanas del semestre siguiente 2019 – 1. Para el modelo, se evalúa el error porcentual absoluto medio (MAPE) y se usa como referencia para conocer el error de pronóstico del modelo.

La Tabla 104. Presenta los valores obtenidos al evaluar la capacidad de pronóstico del modelo de regresión lineal multivariable semanal, con un MAPE del 6,95% que representa el error de pronóstico del modelo.

Tabla 104. Capacidad de pronóstico del modelo de Regresión lineal multivariable semanal

Semana 2019 - 1	Consumo Real	Consumo Estimado	Error	Error Porcentual	Error Absoluto	Error Absoluto Porcentual
6	4430,55	3845,18	585,37	13,21%	585,37	13,2%
7	4881,30	4829,09	52,21	1,07%	52,21	1,1%
8	4743,08	4432,16	310,92	6,56%	310,92	6,6%
<b>Medidas de Error de Pronóstico</b>			<b>ME</b>	<b>MPE</b>	<b>MAE</b>	<b>MAPE</b>
<b>Valores</b>			316,16	6,95%	316,16	6,95%

Los resultados obtenidos en cada uno de los modelos nos muestran algunas ventajas relacionadas con la preparación de los datos y el tiempo de reporte de la información de la de la línea de base energética para una edificación, desde la utilización de datos mensuales, semanales y diarios. De igual forma los resultados que este análisis puede aportar a los ahorros energéticos y seguimiento de indicadores que se pueden obtener en una edificación cuando se emplea tratamiento estadístico y validación a los resultados obtenidos. Elemento que constituyen un aporte para la implementación de sistemas de gestión energética.

#### 7.2.1.3. Modelos de Regresión Lineal para el año 2019

Una vez obtenidos los datos climáticos, de ocupación y consumo del año 2019 se desarrollaron varios modelos de regresión lineal según los datos y la periodicidad de los mismos.

#### Modelo Mensual

La Tabla 105. Presenta la información mensual de las variables monitoreadas para el edificio para el año 2019.

Tabla 105. Información mensual de variables monitoreadas en el edificio para el 2019

Mes/Variable	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Radiación [W/m2]	Ocupación [horas]	Consumo Total [kWh]
Enero	24,36	73,75	401,43	694,00	8157,39
Febrero	24,79	74,98	391,62	3776,00	18338,60
Marzo	24,75	75,21	391,16	3893,50	19270,85
Abril	26,16	72,55	394,59	3259,00	15445,27
Mayo	25,56	74,20	354,94	4223,00	18875,69
Junio	24,32	79,25	363,57	2249,00	12134,52
Julio	24,72	71,83	399,34	4188,00	20270,80
Agosto	25,29	65,39	453,03	5340,00	24242,27
Septiembre	24,96	69,86	414,62	5711,50	22723,39
Octubre	23,62	77,72	402,03	6395,50	21390,40
Noviembre	23,79	78,55	365,73	5424,80	17109,19
Diciembre	24,31	76,44	364,82	1053,50	10417,76

Se construyó el modelo de regresión lineal óptimo en el software estadístico R Studio.

```
Call:
lm(formula = Consumo.Eléctrico ~ Humedad + Ocupación, data = X2019_Mensual)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2126.8  -796.1   180.2   803.3  2236.3

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 38239.9325   9145.2804   4.181  0.00237 **
Humedad     -401.6449    119.3429  -3.365  0.00832 **
Ocupación     2.3123     0.2596   8.908 9.28e-06 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1505 on 9 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9249,    Adjusted R-squared:  0.9082
F-statistic: 55.44 on 2 and 9 DF,  p-value: 8.705e-06
```

El modelo desarrollado se describe como:

$$Electricidad_{lineabase} = -401,64 \cdot Humedad + 2,31 \cdot Ocupación + 38239,93 + \varepsilon_i$$

El modelo tiene un  $R^2$  Ajustado= 0,9082 indica que el modelo explica el 90,82% de la variabilidad de las observaciones (datos), El valor de  $R^2$  ajustado mide el porcentaje de la variación en la respuesta siendo explicada por el modelo, sin embargo, se ajusta al número de variables predictoras en el modelo, El modelo tiene un valor p de  $8,7 \times 10^{-6}$  para el estadístico F que indica que la relación lineal es estadísticamente significativa ( $8,7 \times 10^{-6} < 0,05$ ).

Para garantizar que el modelo desarrollado es válido, se realizó la prueba global de supuestos estadísticos y la prueba de multicolinealidad.

```
Call:
lm(formula = Consumo.Eléctrico ~ Humedad + Ocupación, data = X2019_Mensual)
```

```
Coefficients:
(Intercept)      Humedad      Ocupación
 38239.933    -401.645       2.312
```

```
ASSESSMENT OF THE LINEAR MODEL ASSUMPTIONS
USING THE GLOBAL TEST ON 4 DEGREES-OF-FREEDOM:
Level of Significance = 0.05
```

```
Call:
gvlma(x = Modelo2)
```

```
Value p-value Decision
Global Stat 3.18654 0.5271 Assumptions acceptable.
Skewness 0.04109 0.8394 Assumptions acceptable.
Kurtosis 0.39576 0.5293 Assumptions acceptable.
Link Function 1.56085 0.2115 Assumptions acceptable.
Heteroscedasticity 1.18885 0.2756 Assumptions acceptable.
```

```
> #Prueba VIF de multicolinealidad
> vif(Modelo2)
Humedad Ocupación
1.05835 1.05835
```

Los resultados de la prueba global (gvlma) y la prueba VIF para multicolinealidad, confirman que el modelo de regresión desarrollado cumple con los supuestos estadísticos y es válido para cuantificar el consumo de energía en función de las variables relevantes “humedad” y “ocupación Total”.

### Modelo Semanal

La Tabla 106, presenta la información semanal de las variables monitoreadas para el edificio para el año 2019.

Tabla 106. Información semanal de las variables monitoreadas en el edificio para el año 2019

Semana	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Radiación [W/m2]	Ocupación [horas]	Consumo Total [kWh]
1	24,91	69,73	477,03	0,00	1352,01
2	22,57	80,20	302,76	0,00	1282,69
3	24,29	74,33	355,27	0,00	1760,23
4	25,63	69,90	498,10	0,00	1970,34
5	24,24	76,55	366,78	852,00	2688,81
6	24,76	75,31	341,03	934,50	4430,55
7	25,54	70,43	429,74	948,00	4881,30
8	24,64	77,61	410,04	979,00	4743,08
9	24,37	74,14	415,42	962,50	4664,74

10	25,59	70,78	434,79	950,00	4763,52
11	24,86	75,40	384,66	961,50	4600,34
12	23,47	81,07	318,53	960,00	4452,79
13	25,33	74,10	410,54	816,00	4142,01
14	25,36	74,68	350,57	968,00	4495,67
15	27,20	67,22	483,71	977,50	4522,65
16	25,46	76,08	352,19	0,00	1151,32
17	26,35	72,92	404,77	966,50	4276,74
18	27,79	66,15	401,73	782,00	3970,04
19	26,43	71,72	338,52	941,50	4257,00
20	25,37	74,85	334,78	957,50	4553,22
21	24,58	77,91	373,33	991,50	4570,51
22	23,57	80,92	329,27	981,50	4003,17
23	24,13	79,59	348,42	809,00	2632,40
24	24,15	81,12	372,54	394,00	3831,92
25	24,78	77,95	352,43	624,50	3319,15
26	24,37	78,04	378,87	337,50	1911,52
27	24,77	72,22	380,29	1155,50	3883,44
28	24,65	70,76	396,25	936,50	4338,04
29	25,08	70,06	430,69	748,00	5634,30
30	24,22	74,90	371,03	730,50	4364,22
31	25,08	71,10	414,40	1190,00	5471,80
32	25,55	67,06	469,17	1029,00	5370,51
33	25,22	61,92	452,15	1302,50	5959,31
34	25,05	64,17	476,28	1115,50	5033,77
35	25,50	65,04	434,95	1320,50	5949,49
36	25,75	64,98	430,62	1354,00	6178,90
37	26,30	64,62	406,20	1365,50	6276,09
38	23,46	76,48	352,93	1417,00	4718,13
39	24,50	72,04	459,89	1348,00	4899,27
40	23,30	78,70	400,92	1426,00	4557,72
41	23,92	76,36	423,16	1550,00	5365,00
42	23,43	77,93	433,47	1218,00	4529,88
43	23,45	79,60	384,64	1403,50	4636,99
44	24,28	74,59	384,33	1373,00	5048,91
45	24,23	77,19	442,11	1217,00	5009,57
46	22,72	84,52	278,50	1229,50	3762,01
47	23,18	79,19	375,78	1369,30	3252,12
48	24,97	74,72	358,54	1261,00	4173,76
49	24,05	75,47	355,36	558,00	3279,15
50	23,65	77,02	352,04	322,50	2552,07

51	24,24	78,01	361,22	173,00	2309,01
52	25,31	74,29	371,43	0,00	1597,90

Se construyó el modelo de regresión lineal óptimo en el software estadístico R Studio.

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Humedad + Ocupación.Total, data = Datos_Aulas_4_2019_Semana
1)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1546.76  -342.90   -34.66   362.68  1583.26

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  7866.8599   1276.6939     6.162 1.32e-07 ***
Humedad      -79.8534     16.7129    -4.778 1.65e-05 ***
Ocupación.Total  2.3777     0.1919    12.390 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 597.4 on 49 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8015,    Adjusted R-squared:  0.7934
F-statistic: 98.91 on 2 and 49 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

El modelo desarrollado se describe como:

$$Electricidad_{lineabase} = -79,85 \cdot Humedad + 2,37 \cdot Ocupación + 7866,86 + \varepsilon_i$$

El modelo tiene un  $R^2$  Ajustado= 0,7934 indica que el modelo explica el 79,34% de la variabilidad de las observaciones (datos), El valor de  $R^2$  ajustado mide el porcentaje de la variación en la respuesta siendo explicada por el modelo, sin embargo, se ajusta al número de variables predictoras en el modelo, El modelo tiene un valor  $p < 2,2 \times 10^{-16}$  para el estadístico F que indica que la relación lineal es estadísticamente significativa ( $2,2 \times 10^{-16} < 0,05$ ).

Para garantizar que el modelo desarrollado es válido, se realizó la prueba global de supuestos estadísticos y la prueba de multicolinealidad.

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Humedad + Ocupación.Total, data = Datos_Aulas_4_2019_Semana1)

Coefficients:
            Humedad  Ocupación.Total
            7866.860             -79.853             2.378

ASSESSMENT OF THE LINEAR MODEL ASSUMPTIONS
USING THE GLOBAL TEST ON 4 DEGREES-OF-FREEDOM:
Level of Significance = 0.05

Call:
gv1ma(x = Modelo2)

Global Stat      Value p-value      Decision
Skewness         3.68140    0.4508 Assumptions acceptable.
Kurtosis         0.09082    0.7631 Assumptions acceptable.
Link Function    1.62551    0.2023 Assumptions acceptable.
Heteroscedasticity 1.88988    0.1692 Assumptions acceptable.
Heteroscedasticity 0.07518    0.7839 Assumptions acceptable.
```

```

> #Prueba VIF de multicolinealidad
> vif(Modelo2)
      Humedad Ocupación.Total
1.021707      1.021707

```

Los resultados de la prueba global (gvlma) y la prueba VIF para multicolinealidad, confirman que el modelo de regresión desarrollado cumple con los supuestos estadísticos y es válido para cuantificar el consumo de energía en función de las variables relevantes “humedad” y “ocupación Total”.

### Modelo Diario

Con la información diaria disponible se desarrollaron modelos de regresión lineal para cada mes iniciando desde febrero (enero no se tuvo en cuenta, pues la ocupación del edificio es casi nula). Para cada mes se obtuvo el modelo de regresión óptimo y la validación de los supuestos estadísticos como se presenta a continuación para el mes de marzo.

La Tabla 107, presenta la información diaria de las variables monitoreadas para el edificio para marzo de 2019.

Tabla 107. Información diaria de las variables monitoreadas para marzo

Día	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Radiación [W/m <sup>2</sup> ]	Ocupación [horas]	Consumo Total [kWh]
1/03/2019	24,19	74,87	397,58	131,50	683,29
2/03/2019	24,41	72,62	460,41	74,50	467,61
3/03/2019	24,00	74,59	428,35	0,00	183,44
4/03/2019	25,01	70,74	479,00	164,00	689,30
5/03/2019	24,64	74,18	370,57	193,50	779,28
6/03/2019	25,31	71,29	458,18	199,00	914,51
7/03/2019	25,83	70,29	396,72	192,50	876,22
8/03/2019	25,94	70,23	488,64	130,50	768,01
9/03/2019	26,82	67,22	548,95	70,50	601,52
10/03/2019	25,60	71,51	301,45	0,00	134,68
11/03/2019	25,24	71,45	438,03	160,50	832,47
12/03/2019	23,36	86,00	223,19	193,00	779,22
13/03/2019	25,34	74,24	499,58	199,50	913,60
14/03/2019	23,38	80,93	248,74	190,50	679,32
15/03/2019	24,57	73,72	403,94	131,00	722,08
16/03/2019	26,31	68,70	530,41	87,00	540,20
17/03/2019	25,77	72,74	348,75	0,00	133,45
18/03/2019	25,19	72,09	415,96	160,50	868,38
19/03/2019	21,62	90,52	129,49	202,00	769,97
20/03/2019	23,51	80,08	439,82	199,50	716,45
21/03/2019	24,10	76,89	469,92	193,50	830,15
22/03/2019	23,05	82,73	299,13	128,00	575,84

23/03/2019	24,34	77,91	302,72	76,50	527,48
24/03/2019	22,50	87,29	172,70	0,00	164,52
25/03/2019	24,14	76,09	483,39	0,00	245,10
26/03/2019	24,94	73,35	402,49	191,50	855,69
27/03/2019	26,06	69,50	506,45	205,50	866,25
28/03/2019	25,63	73,44	426,42	199,00	951,00
29/03/2019	22,39	88,76	240,75	130,50	627,13
30/03/2019	26,56	70,75	392,56	89,50	347,42
31/03/2019	27,55	66,83	421,73	0,00	249,42

Se construyó el modelo de regresión lineal óptimo en el software estadístico R Studio.

Call:

```
lm(formula = Consumo.Total ~ Radiación + Ocupación, data = Datos_Aulas_4_2019_Marzo)
```

Residuals:

```
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-164.076  -47.620    8.342   44.891  123.354
```

Coefficients:

```
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  57.4007    56.3454   1.019  0.31705
Radiación     0.4091     0.1294   3.161  0.00376 **
Ocupación     3.2240     0.1812  17.795 < 2e-16 ***
```

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```
Residual standard error: 74.7 on 28 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9221,    Adjusted R-squared:  0.9165
F-statistic: 165.7 on 2 and 28 DF,  p-value: 3.042e-16
```

El modelo desarrollado se describe como:

$$Electricidad_{lineabase} = 0,409 \cdot Radiación + 3,22 \cdot Ocupación + 57,40 + \varepsilon_i$$

El modelo tiene un  $R^2$  Ajustado= 0,9165 indica que el modelo explica el 91,65% de la variabilidad de las observaciones (datos), El valor de  $R^2$  ajustado mide el porcentaje de la variación en la respuesta siendo explicada por el modelo, sin embargo, se ajusta al número de variables predictoras en el modelo, El modelo tiene un valor p de  $3,04 \times 10^{-16}$  para el estadístico F que indica que la relación lineal es estadísticamente significativa ( $3,04 \times 10^{-16} < 0,05$ ).

Para garantizar que el modelo desarrollado es válido, se realizó la prueba global de supuestos estadísticos y la prueba de multicolinealidad.

```
Call:
lm(formula = Consumo.Total ~ Radiación + Ocupación, data = Datos_Aulas_4_2019_Marzo)

Coefficients:
(Intercept)    Radiación    Ocupación
  57.4007         0.4091         3.2240
```

```
ASSESSMENT OF THE LINEAR MODEL ASSUMPTIONS
USING THE GLOBAL TEST ON 4 DEGREES-OF-FREEDOM:
Level of Significance = 0.05
```

```
Call:
gvlma(x = Modelo2)

Global Stat      Value p-value      Decision
Skewness         1.03313  0.3094 Assumptions acceptable.
Kurtosis         0.08207  0.7745 Assumptions acceptable.
Link Function    1.90301  0.1677 Assumptions acceptable.
Heteroscedasticity 0.90754  0.3408 Assumptions acceptable.
```

```
> #Prueba VIF de multicolinealidad
> vif(Modelo2)
Radiación Ocupación
 1.001417  1.001417
```

Los resultados de la prueba global (gvlma) y la prueba VIF para multicolinealidad, confirman que el modelo de regresión desarrollado cumple con los supuestos estadísticos y es válido para cuantificar el consumo de energía en función de las variables relevantes "Radiación" y "Ocupación Total".

La Tabla 108, recopila los modelos de regresión desarrollados para el año 2019. Donde se presenta el modelo y su ecuación, el valor de R2 ajustado y el cumplimiento de los supuestos estadísticos.

En general, los modelos de regresión obtenidos poseen un nivel de correlación aceptable (mayor al 75%), a excepción de los modelos diarios de los meses de Junio y Julio que presentan valores de correlación baja (25,66 % y 29,91% respectivamente) esto debido a que son meses de baja ocupación, la mayor parte del tiempo es de vacaciones y por la dinámica del edificio, la variable que resulta ser más representativa e importante al momento de desarrollar un modelo de regresión para estimar el consumo eléctrico es la Ocupación.

Tabla 108. Modelos de regresión lineal multivariable para el 2019

MODELO		LBE	R <sup>2</sup> AJUST.	SUPUESTOS ESTADÍSTICOS
MENSUAL		$Consumo = -401,64 * Hum + 2,31 * Ocup + 38239,93$	90,82%	Si cumple
SEMANAL		$Consumo = -79,85 * Hum + 2,37 * Ocup + 7866,86$	79,34%	Si cumple
D I A R I O	M E S	<b>Ene</b> $Consumo = 0,28 * Rad + 1,27 * Ocup + 120,5$	82,12%	Si cumple
		<b>Feb</b> $Consumo = 43,3 * Temp + 3,03 * Ocup - 830,11$	90,94%	Si cumple
		<b>Mar</b> $Consumo = 0,40 * Rad + 3,22 * Ocup + 57,4$	91,65%	Si cumple
		<b>Abr</b> $Consumo = 2,22 * Ocup + 328,48$	87,91%	Si cumple
		<b>May</b> $Consumo = 104,79 * Temp + 19,98 * Hum + 2,83 * Ocup - 3925,08$	76,63%	Si cumple
		<b>Jun</b> $Consumo = 183,83 * Temp + 43,36 * Hum + 1,41 * Ocup - 7574,07$	25,66%	Si cumple
		<b>Jul</b> $Consumo = 2,17 * Ocup + 385,29$	29,91%	Si cumple
		<b>Ago</b> $Consumo = 106,89 * Temp + 2,50 * Ocup - 2337,38$	79,38%	Si cumple
		<b>Sep</b> $Consumo = -17,98 * Hum + 2,88 * Ocup + 1475,58$	91,01%	Si cumple
		<b>Oct</b> $Consumo = -13,66 * Hum + 2,19 * Ocup + 1316,64$	89,34%	Si cumple
		<b>Nov</b> $Consumo = 132,97 * Temp + 23,77 * Hum + 0,87 * Rad + 1,55 - 5064,31$	71,63%	Si cumple

Una vez obtenidos los modelos de regresión lineal con datos diarios, semanal y mensual. Se realizó el pronóstico del consumo de energía eléctrica para los diferentes meses del año. El proceso realizado para cada mes es ilustrado con el mes de marzo en la Tabla 109.

Tabla 109. Pronóstico de consumo de energía eléctrica para el mes de marzo de 2019 utilizando las LBE obtenidas.

<b>Pronóstico con modelo diario de LBE</b>						
<b>LBE Mes de Febrero: <math>Consumo = 43,3 * Temp + 3,03 * Ocup - 830,11</math></b>						
<b>Fecha</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Humedad</b>	<b>Radiación</b>	<b>Ocupación</b>	<b>Consumo Real</b>	<b>Consumo Estimado</b>
1/03/2019	24,19	74,87	397,58	131,50	683,29	616,61
2/03/2019	24,41	72,62	460,41	74,50	467,61	453,31
3/03/2019	24,00	74,59	428,35	0,00	183,44	209,25
4/03/2019	25,01	70,74	479,00	164,00	689,30	751,00
5/03/2019	24,64	74,18	370,57	193,50	779,28	824,56
6/03/2019	25,31	71,29	458,18	199,00	914,51	870,52
7/03/2019	25,83	70,29	396,72	192,50	876,22	873,26
8/03/2019	25,94	70,23	488,64	130,50	768,01	689,36
9/03/2019	26,82	67,22	548,95	70,50	601,52	545,34
10/03/2019	25,60	71,51	301,45	0,00	134,68	278,38
11/03/2019	25,24	71,45	438,03	160,50	832,47	750,35
12/03/2019	23,36	86,00	223,19	193,00	779,22	767,90
13/03/2019	25,34	74,24	499,58	199,50	913,60	873,34
14/03/2019	23,38	80,93	248,74	190,50	679,32	761,02
15/03/2019	24,57	73,72	403,94	131,00	722,08	631,93
16/03/2019	26,31	68,70	530,41	87,00	540,20	573,54
17/03/2019	25,77	72,74	348,75	0,00	133,45	285,71
18/03/2019	25,19	72,09	415,96	160,50	868,38	748,20
19/03/2019	21,62	90,52	129,49	202,00	769,97	719,66
20/03/2019	23,51	80,08	439,82	199,50	716,45	793,91
21/03/2019	24,10	76,89	469,92	193,50	830,15	801,41
22/03/2019	23,05	82,73	299,13	128,00	575,84	556,82
23/03/2019	24,34	77,91	302,72	76,50	527,48	456,20
24/03/2019	22,50	87,29	172,70	0,00	164,52	144,15
25/03/2019	24,14	76,09	483,39	0,00	245,10	215,30
26/03/2019	24,94	73,35	402,49	191,50	855,69	831,74
27/03/2019	26,06	69,50	506,45	205,50	866,25	922,44
28/03/2019	25,63	73,44	426,42	199,00	951,00	884,29
29/03/2019	22,39	88,76	240,75	130,50	627,13	535,94
30/03/2019	26,56	70,75	392,56	89,50	347,42	591,89
31/03/2019	27,55	66,83	421,73	0,00	249,42	362,74

**Consumo Real (kWh/mes): 19292,99**  
**Consumo Estimado (kWh/mes): 19320,08**

<b>Pronóstico con modelo semanal de LBE</b>						
<b>LBE Semanal:</b> $Consumo = -79,85 * Hum + 2,37 * Ocup + 7866,86$						
Semana	Temperatura	Humedad	Radiación	Ocupación	Consumo Real	Consumo Estimado
9	24,20	74,02	428,78	206,00	1334,35	2445,6282
10	25,59	70,78	434,79	950,00	4763,52	4473,8846
11	24,86	75,40	384,66	961,50	4600,34	4132,4898
12	23,47	81,07	318,53	960,00	4452,79	3675,9225
13	25,33	74,10	410,54	816,00	4142,01	3889,854
<b>Consumo Real (kWh/mes): 19292,99</b> <b>Consumo Estimado (kWh/mes): 18617, 78</b>						
<b>Pronóstico con modelo mensual de LBE</b>						
<b>LBE Mensual:</b> $Consumo = -401,64 * Hum + 2,31 * Ocup + 38239,93$						
Mes	Temperatura	Humedad	Radiación	Ocupación	Consumo Real	Consumo Estimado
Marzo	24,75	75,21	391,16	3893,50	19292,99	17034,4489
<b>Consumo Real (kWh/mes): 19292,99</b> <b>Consumo Estimado (kWh/mes): 17034,45</b>						
Consumo Real	Consumo Estimado LBE					
	Mod Diario	Mod Semanal	Mod Mensual			
19292,99	19320,08	18617,78	17034,45			
Diferencia	-27,09	675,21	2258,54			
MAPE	0,1%	3,5%	11,7%			

La Tabla 110, presenta las estimaciones realizadas para cada mes con su respectivo valor MAPE.

Tabla 110. Pronóstico de consumo eléctrico mes a mes empleando LBE diarias, semanales y mensual para el 2019.

Mes	Consumo Real [kWh]	Consumo Estimado LBE									
		Mod Diario				Mod Semanal			Mod Mensual		
		Consumo Estimado LBE [kWh]	Mes LBE	Diferencia [kWh]	MAPE	Consumo Estimado LBE [kWh]	Diferencia [kWh]	MAPE	Consumo Estimado LBE [kWh]	Diferencia [kWh]	MAPE
Febrero	18282,015	11297,14	Enero	6984,88	38,2%	16805,22	1476,80	8,1%	16856,33	1425,69	7,8%
Marzo	19292,99	19320,08	Febrero	-27,09	0,1%	18617,78	675,21	3,5%	17034,45	2258,54	11,7%
Abril	14801,464	15661,49	Marzo	-860,03	5,8%	16463,64	-1662,18	11,2%	16635,44	-1833,98	12,4%
Mayo	19172,776	19572,97	Abril	-400,20	2,1%	19812,89	-640,11	3,3%	18203,96	968,82	5,1%
Junio	12369,744	12604,90	Mayo	-235,15	1,9%	12983,70	-613,95	5,0%	11610,77	758,98	6,1%
Julio	21059,361	8580,08	Junio	12479,28	59,3%	20677,71	381,65	1,8%	19072,51	1986,85	9,4%
Agosto	24720,47	23569,17	Julio	1151,30	4,7%	25720,67	-1000,19	4,0%	24325,69	394,78	1,6%
Septiembre	23052,766	24225,25	Agosto	-1172,48	5,1%	22300,83	751,94	3,3%	23387,98	-335,21	1,5%
Octubre	21967,904	20865,54	Septiembre	1102,37	5,0%	23574,53	-1606,62	7,3%	21814,02	153,88	0,7%
Noviembre	17373,539	19237,61	Octubre	-1864,07	10,7%	18298,91	-925,37	5,3%	19235,86	-1862,32	10,7%
Diciembre	10455,589	11075,96	Noviembre	-620,37	5,9%	9634,64	820,95	7,9%	9973,85	481,73	4,6%

La Tabla 111 presenta los modelos de LBE propuestos como ideales para realizar el pronóstico de consumo de energía mes a mes del año 2019.

Tabla 111. Modelos de LBE propuestos para pronosticar 2019

MES	MODELO	LBE	MAPE (%)
FEB	Semanal	$Consumo = -79,85 * Hum + 2,37 * Ocup + 7866,86$	8,1
MAR	Diario	$Consumo = 43,3 * Temp + 3,03 * Ocup - 830,11$	0,1
ABR	Diario	$Consumo = 0,40 * Rad + 3,22 * Ocup + 57,4$	5,8
MAY	Diario	$Consumo = 2,22 * Ocup + 328,48$	2,1
JUN	Diario	$Consumo = 104,79 * Temp + 19,98 * Hum + 2,83 * Ocup - 3925,08$	1,9
JUL	Semanal	$Consumo = -79,85 * Hum + 2,37 * Ocup + 7866,86$	1,8
AGO	Diario	$Consumo = 2,17 * Ocup + 385,29$	4,7
SEP	Diario	$Consumo = 106,89 * Temp + 2,50 * Ocup - 2337,38$	5,1
OCT	Diario	$Consumo = -17,98 * Hum + 2,88 * Ocup + 1475,58$	5,0
NOV	Diario	$Consumo = -13,66 * Hum + 2,19 * Ocup + 1316,64$	10,7
DIC	Diario	$Consumo = 132,97 * Temp + 23,77 * Hum + 0,87 * Rad + 1,55 - 5064,31$	5,9

De acuerdo a los resultados obtenidos se realiza la construcción y prueba de 3 modelos de regresión lineal, con el fin de encontrar el modelo de mejor capacidad de pronóstico (menor MAPE). Al revisar los modelos y sus errores MAPE, se encuentra que para el funcionamiento normal del edificio (semestre corriente) el modelo diario funciona adecuadamente y presenta bajos errores. Mientras que para los periodos de vacaciones donde la ocupación es baja, el modelo diario no es el que mejor modela el consumo, en este caso, el modelo

semanal se ajusta mejor que el diario. Es decir, en ciertos meses el error MAPE es menor con otros modelos (por ej. Nov el modelo mensual es menor que el diario).

Lo que se busca es plantear un modelo homogéneo con la misma periodicidad de datos necesarios para su construcción siempre y cuando el análisis de datos lo permita. Lo anterior, con el fin de que el modelo planteado sea funcional para la persona encargada de realizar seguimiento a las líneas bases e indicadores propuestos en el edificio (gestor energético, personal de mantenimiento etc.).

Finalmente, los 3 modelos propuestos funcionan para estimar la línea base (LBE), la selección de uno u otro depende de los niveles de errores e incertidumbre y la disposición de los datos para la estimación de cada uno.

### **7.2.3. Modelo de Simulación**

Uno de los modelos propuestos por la norma ISO50006, para estimar líneas bases es el modelo de simulación. En este caso la propuesta es utilizar la simulación energética como herramienta para estimar los valores de línea base LBE e indicadores. Lo anterior, teniendo en cuenta que modelar es analizar en función del tiempo las necesidades energéticas de un edificio, al proporcionar unas condiciones básicas de confort, según su diseño y su entorno condicionado por variables como la radiación solar, la ocupación, orientación del edificio o caracterización térmica de sus componentes arquitectónicos. En ese sentido, se trata de analizar la situación actual del edificio aulario (aulas 4), referente al consumo energético, mediante los datos obtenidos a través del programa de simulación dinámica Design Builder que previamente ha sido calibrado con los datos experimentales de monitorización continua con un sistema BMS. El objetivo de plantear la simulación energética como alternativa para estimar líneas base energética, parte de contar con pronósticos de consumo. Estos se pueden analizar según los niveles de ocupación y de esa forma tener un rango de estimación para distintos escenarios en los que, incluso, se podría realizar mejoras energéticas que permitan contar con la actualización de una línea base en distintos momentos en los que se tiene en cuenta horas de operación, sistemas de climatización (HVAC) distribuidos vs centralizados, variación en las necesidades de los ocupantes y cambios tecnológicos y arquitectónicos. Elementos necesarios para actualizar una línea base energética.

## **7.3. INDICADORES ENERGÉTICOS Y AMBIENTALES APLICADOS A EDIFICIOS**

El objetivo principal de los indicadores de eficiencia energética (EEI) [13] [15] es obtener una comprensión de las principales influencias en el consumo final de energía tanto de manera global, como por subsectores. A su vez, son usados como herramienta que permiten la evaluación de resultados alcanzados, la evaluación de objetivos, entre otros, cuando se han establecido políticas de eficiencia energética.

Entre los antecedentes relacionados con indicadores de desempeño, Pérez et al. [16] establece que la eficiencia energética es un objetivo central para la política energética y una piedra angular para el desarrollo sostenible. Sin embargo, la falta de un conjunto válido de indicadores de eficiencia energética (EEI) suficientemente precisos, robustos y repetibles está afectando significativamente el éxito de tales políticas y causando confusión y especulación en este campo. Por lo tanto, es crucial identificar métodos adecuados para medir la eficiencia energética y lograr un consenso sobre el uso de un conjunto válido de EEI. Alves et al. [17] estableció diferentes indicadores para evaluar el rendimiento energético de los sistemas HVAC, en los que encontró diferencia al cambiar la ubicación geográfica y las condiciones climáticas que afectan a los sistemas, lo que puede llevar a conceptos erróneos sobre la eficiencia energética, pues es importante utilizar correctamente los indicadores que mejor se ajustan a la ubicación. Perroni et al. [18] presenta un estudio sobre el rendimiento energético de una empresa representado por un marco, un mapa de indicadores, y un modelo de proceso de entrada / salida longitudinal, en el cual establece que los indicadores de rendimiento pueden integrarse en tres niveles jerárquicos: eficiencia energética por fuente; eficiencia energética del proceso; y la eficiencia energética de la empresa extendida. Estudios encontrados presentan el uso de indicadores de eficiencia energética (EEI) en edificaciones, en el artículo “Buildings energy consumption generation gap: A post-occupancy assessment in a case study of three higher education buildings” Bordeau et al. [19] realizó un estudio comparativo del consumo de energía de tres edificios de campus universitarios en París que cubren más de 50,000 m<sup>2</sup> de superficie útil, el histórico de datos utilizado fue de 3 años, se usaron herramientas estadísticas para su posterior análisis, donde se encontró que el principal propulsor del consumo de energía eléctrica es la Ocupación. Khoshbakht et al. [20] estudió las características de uso de energía en diferentes edificios de 80 campus universitarios en Australia, basado en el método estadístico análisis de frontera estocástico (SFA) obtuvieron los valores de referencia de la intensidad del uso de energía (EUI) que para el campus en general fue de 216 kWh/m<sup>2</sup>, edificios de actividades académicas 137 kWh/m<sup>2</sup>, edificios de ciencias 164 kWh/m<sup>2</sup>, edificio de salud 136 kWh/m<sup>2</sup>.

Ocampo et al. [21] desarrolla una metodología que considera las recomendaciones de ISO 50001: 2011 e ISO 50006: 2014 para establecer líneas de base de energía e indicadores de rendimiento energético en edificios de instituciones de educación para identificar potenciales de reducción de consumo de energía eléctrica en edificios y establecer estrategias de gestión de energía relacionadas con la electricidad, se estudiaron tres edificios de la Universidad Federal de Itajubá, los resultados mostraron que los posibles ahorros anuales en el consumo de energía eléctrica para el campus podrían ser de alrededor del 9,6%.

En esta tesis doctoral los indicadores que vamos a seleccionar para realizar el estudio energético, económico y ambiental para un edificio son los presentados en la Tabla 112.

Tabla 112. Indicadores

INDICADOR	FÓRMULA		
<b>Intensidad Energética</b>	$IE = \frac{kWh}{m^2 \text{ año}}$		
<b>Indicadores de Uso Final</b>	$IE_{iluminación} = \frac{kWh_{iluminación}}{m^2 \text{ año}_{iluminado}}$	$IE_{refrigeración} = \frac{kWh_{refrigeración}}{m^2 \text{ año}_{refrigerado}}$	$IE_{ofimáticos} = \frac{kWh_{ofimáticos}}{m^2 \text{ año}_{ofimáticos}}$
<b>Indicador IE referido al consumo de energía primaria. Edificios nZEB</b>	$E_{primaria_{NoRenovable}} = \text{ConsumoElectTotalRED}_{Medido} * \text{FactorElectricidadNoRenovableColombia}_{MatrizEnergética}$ $E_{primaria_{Renovable}} = \text{ConsumoRenovableFV}_{Medido} * 1 + \text{ConsumoTotalRED}_{Medido} * \text{FactorElectRenovableColombia}_{MatrizEnergética}$ $E_{primaria_{Total}} = E_{primaria_{NoRenovable}} + E_{primaria_{Renovable}}$ $EER\% = \frac{E_{primaria_{Renovable}}}{E_{primaria_{TOTAL}}} * 100$		
<b>Impacto Ambiental</b>	$I_M = \frac{C_{final} * \text{FactorElectricidad}_{CO2}}{m^2}$		
<b>Eficiencia Energética</b>	$IEE = \frac{E_{medida}}{E_{Base}}$		
<b>Sumas acumulativas CUSUM</b>	$CUSUM = [(E_{medida} - E_{tendencia})_i + (E_{medida} - E_{tendencia})_{i-1}]$		

### 7.3.1. Indicador de Intensidad Energética IE.

Es un indicador de eficiencia energética, que permite explicar las razones de un buen o mal comportamiento energético del edificio y proporcionan información útil sobre los aspectos a tener en cuenta a la hora de proponer recomendaciones que mejoren dicho comportamiento. Este indicador, en base anual y referidos a la unidad de superficie útil del edificio, se obtendrá de la energía final consumida por el edificio para satisfacer, en unas condiciones climáticas determinadas, las necesidades asociadas a unas condiciones normales de funcionamiento y ocupación, que incluirá la energía consumida en: calefacción, refrigeración, ventilación, producción de agua caliente sanitaria e iluminación; a fin de mantener las condiciones de confort térmico y lumínico así como la calidad del aire interior. Las unidades empleadas para expresar este indicador serán: el kWh /m<sup>2</sup> de superficie útil del edificio, para valores de consumo de energía.

$$IE = \frac{kWh}{m^2 \text{ año}}$$

Las tablas 113 y 114, enseñan los Indicadores de Eficiencia Energética (IE) por vectores energéticos y por servicios de uso final de los años 2017 – 2019. La Tabla 115 y las Figuras 232 – 233, presentan los indicadores de Generación de Energía Solar FV y Consumo de Energía Eléctrica Total.

Tabla 113. Indicadores de Eficiencia Energética por vectores energéticos en el Campus UAO de los años 2017 – 2019

Consumo de energía eléctrica total			
Año	2017	2018	2019
Consumo Total [kWh/año]	3.737.623	3.545.597	3.658.441
Área campus [m2]	49.798		
IE [kwh/m2 Año]	75,06	71,20	73,47
Consumo de energía de Gas Natural			
Año	2017	2018	2019
Consumo Total [m3]	15.662	24.220	
Área campus [m2]	49.798		
IE [kwh/m2 Año]	0,31	0,49	-----
Generación de energía renovable mediante solar fotovoltaica-FV			
Año	2017	2018	2019
Generación FV [kWh/año]	424.450	545.660	537.160
Área campus [m2]	49.798		
IE [kwh/m2 Año]	8,52	10,96	10,79

Tabla 114. Indicadores de Eficiencia Energética por servicios de uso final en el Campus UAO de los años 2017 – 2019

Tipo de uso	Electricidad (Kwh)	Indicador IE (kWh/m2 año)
Refrigeración	1.504.561	30,21
Iluminación	606.389	12,18
Equipos Ofimáticos	440.559	8,85
Equipos Auxiliares	1.185.805	23,81

Tabla 115. Indicadores de Eficiencia Energética de Generación FV y consumo de energía eléctrica total del Campus UAO de los años 2017 – 2019

Año	2017				2018				2019			
	Generación Sistema FV		Consumo Eléctrico		Generación Sistema FV		Consumo Eléctrico		Generación Sistema FV		Consumo Eléctrico	
	KWh/mes	IE	KWh/mes	IE	KWh/mes	IE	KWh/mes	IE	KWh/mes	IE	KWh/mes	IE
Enero	14.490	0,29	280.370	5,63	45.889	0,92	260.424	5,23	44.154	0,89	193.481	3,89
Febrero	16.880	0,34	344.658	6,92	46.453	0,93	322.472	6,48	43.081	0,87	262.178	5,26
Marzo	17.340	0,35	350.748	7,04	50.768	1,02	302.893	6,08	45.354	0,91	283.337	5,69
Abril	17.580	0,35	296.426	5,95	43.382	0,87	315.173	6,33	42.641	0,86	247.512	4,97
Mayo	28.210	0,57	342.111	6,87	42.996	0,86	324.232	6,51	41.529	0,83	307.745	6,18
Junio	43.970	0,88	254.574	5,11	40.330	0,81	236.592	4,75	43.131	0,87	203.416	4,08
Julio	49.670	1,00	289.544	5,81	43.397	0,87	281.635	5,66	48.891	0,98	253.210	5,08
Agosto	48.990	0,98	346.242	6,95	48.193	0,97	332.242	6,67	50.617	1,02	300.874	6,04
Septiembre	51.230	1,03	366.798	7,37	47.643	0,96	321.359	6,45	47.446	0,95	298.430	5,99
Octubre	44.810	0,90	344.414	6,92	47.875	0,96	333.627	6,70	47.149	0,95	312.343	6,27
Noviembre	45.388	0,91	315.131	6,33	40.099	0,81	287.228	5,77	40.582	0,81	277.115	5,56
Diciembre	45.892	0,92	206.608	4,15	48.635	0,98	227.720	4,57	42.585	0,86	181.639	3,65

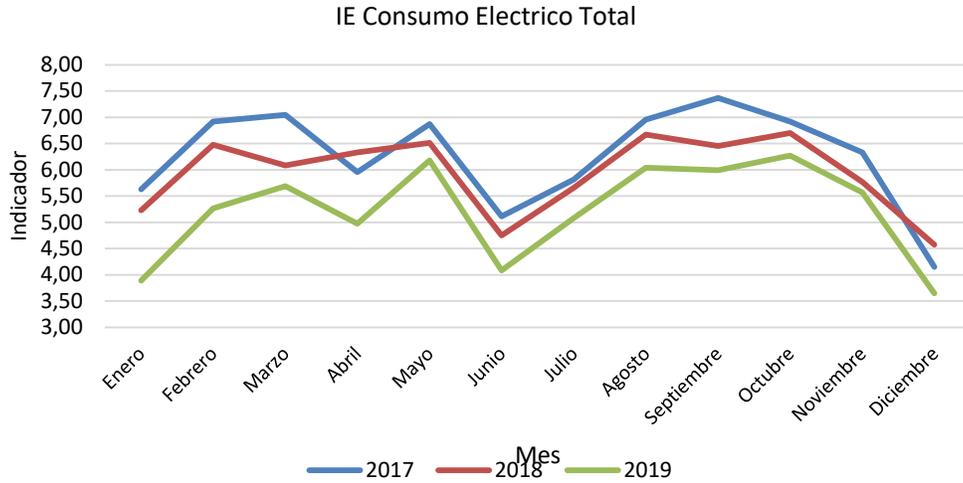


Figura 232. Indicadores de Eficiencia Energética del consumo de energía eléctrica total del Campus UAO de los años 2017 – 2019

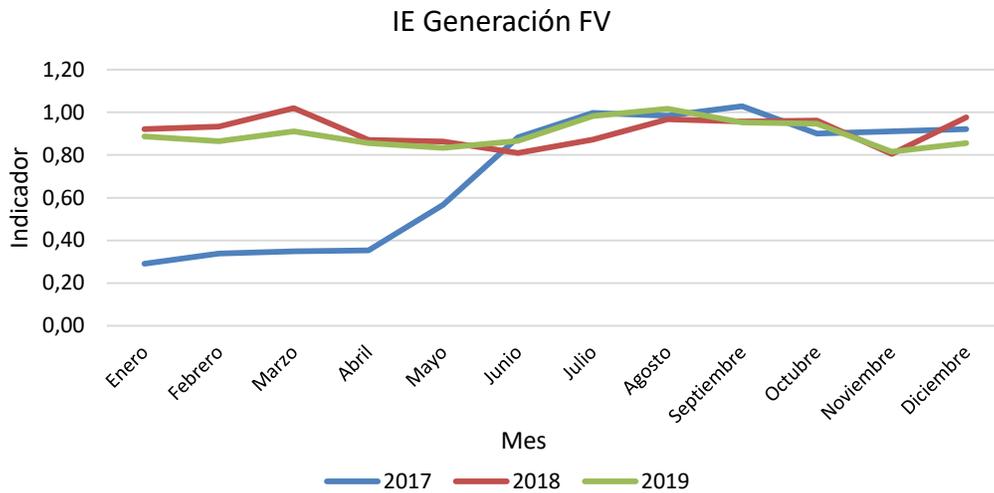


Figura 233. Indicadores de Eficiencia Energética de Generación FV del Campus UAO de los años 2017 – 2019

Durante el periodo comprendido entre 2017 a 2019 la producción de energía del sistema solar FV se conserva inalterable, por efecto de la condición climática del lugar donde se encuentra instalado el sistema solar FV. Recordemos que el sistema se encuentra en zona tropical ubicado a unos 3º de latitud norte, cercano a la línea ecuatorial donde las condiciones climáticas del valle interandino donde se encuentra la ciudad de Cali, ofrecen unas características bimodales del clima: dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas al año unido a una alta disponibilidad de recurso solar todo el año. Por ejemplo, para el año 2019 el comportamiento bimodal del clima evidencia una mayor producción de energía del sistema solar durante los meses secos (enero – marzo y agosto – octubre) y se reduce en los demás meses del año cuando se presenta la temporada de lluvias.

Del mismo modo, se presentan en las tablas 116 – 118 y en las figuras 234 y 235 os indicadores anteriores para el edificio de Aulas 4.

Tabla 116. Indicadores de Eficiencia Energética por energéticos en el Edificio de Aulas 4 de los años 2017 – 2019

Consumo de energía eléctrica total			
Año	2017	2018	2019
Consumo Total [kWh/año]	186.462	188.381	208.376
Área útil [m2]	3.087,85		
IE [kwh/m2 Año]	60,39	61,01	67,48
Generación de energía renovable mediante solar fotovoltaica-FV			
Año	2017	2018	2019
Generación FV [kWh/año]	34.832	54.666	50.821
IE [kwh/m2 Año]	11,28	17,70	16,46

Tabla 117. Indicadores de Eficiencia Energética por servicios de uso final en el Edificio de Aulas 4 de los años 2017 – 2019

Tipo de uso	Consumo eléctrico (Kwh)	Indicador IE kWh/m2 año
Enfriamiento	91.558,4	29,65
Iluminación interior	10.014,0	3,24
Iluminación exterior	1.735,8	0,56
Equipos Ofimáticos	84.630,1	27,41
Área útil [m2]	3.087,85	

Tabla 118. Indicadores de Eficiencia Energética de Generación FV y consumo de energía eléctrica total del Campus UAO de los años 2017 – 2019

Año	2017				2018				2019			
	Generación Sistema FV		Consumo Eléctrico		Generación Sistema FV		Consumo Eléctrico		Generación Sistema FV		Consumo Eléctrico	
	KWh/mes	IE	KWh/mes	IE	KWh/mes	IE	KWh/mes	IE	KWh/mes	IE	KWh/mes	IE
Enero	0	0,00	8.621	2,79	4.455	1,44	11.968	3,88	4.329	1,40	8.157	2,64
Febrero	0	0,00	19.672	6,37	4.520	1,46	18.612	6,03	4.177	1,35	18.339	5,94
Marzo	0	0,00	20.782	6,73	4.864	1,58	17.855	5,78	3.446	1,12	19.271	6,24
Abril	0	0,00	17.120	5,54	4.412	1,43	18.971	6,14	3.128	1,01	15.445	5,00
Mayo	2.253	0,73	20.919	6,77	4.376	1,42	18.237	5,91	4.125	1,34	18.876	6,11
Junio	4.394	1,42	10.869	3,52	4.332	1,40	10.451	3,38	4.160	1,35	12.135	3,93
Julio	4.945	1,60	11.163	3,62	4.581	1,48	13.730	4,45	4.856	1,57	20.271	6,56
Agosto	4.933	1,60	18.805	6,09	4.999	1,62	19.142	6,20	4.890	1,58	24.242	7,85
Septiembre	4.998	1,62	18.620	6,03	4.671	1,51	18.290	5,92	4.603	1,49	22.723	7,36
Octubre	4.371	1,42	17.007	5,51	4.645	1,50	17.515	5,67	4.890	1,58	21.390	6,93
Noviembre	4.461	1,44	14.861	4,81	3.990	1,29	14.198	4,60	4.071	1,32	17.109	5,54
Diciembre	4.477	1,45	8.023	2,60	4.821	1,56	9.414	3,05	4.146	1,34	10.418	3,37

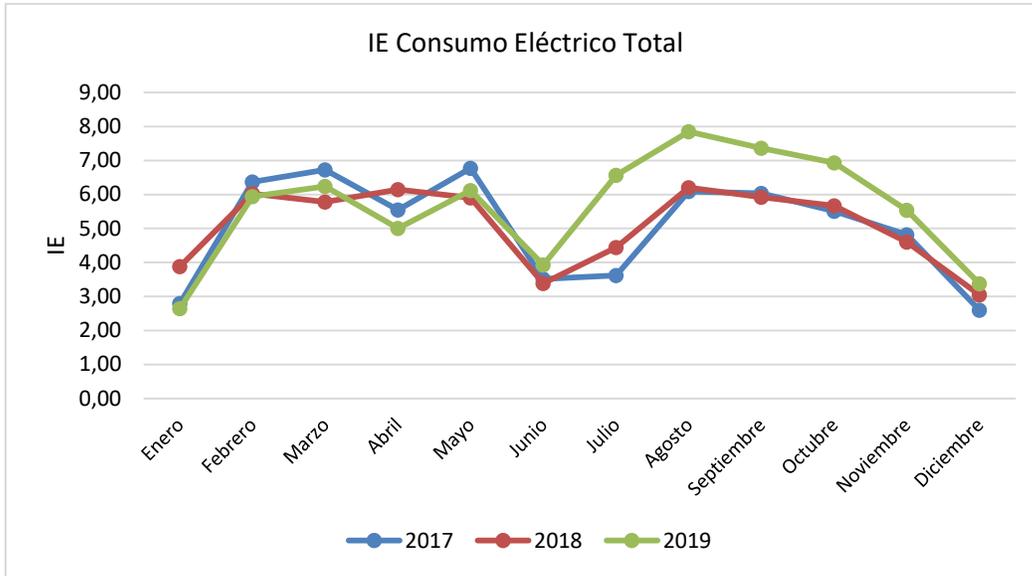


Figura 234. Indicadores de Eficiencia Energética del consumo de energía eléctrica total del Edificio de Aulas 4 de los años 2017 – 2019

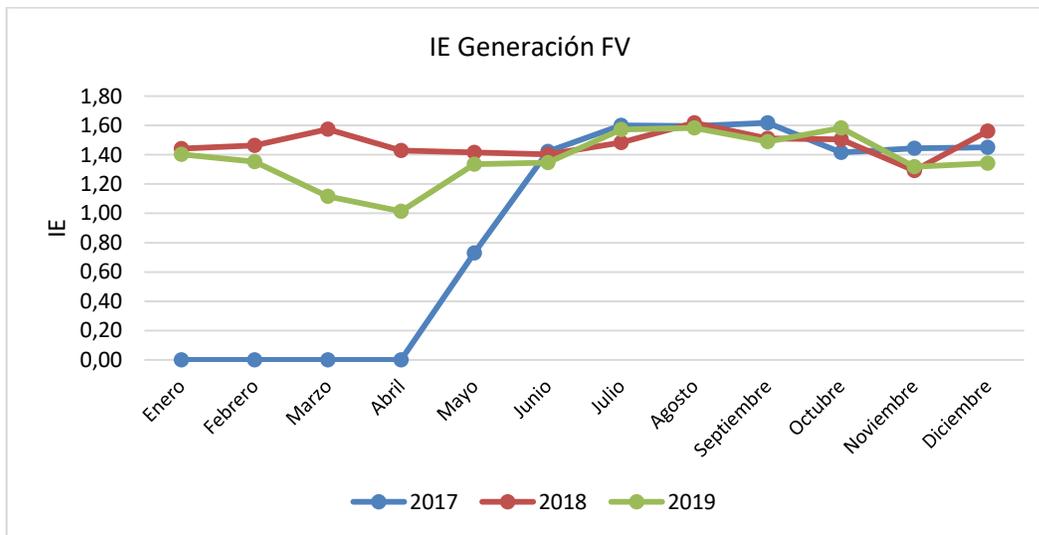


Figura 235. Indicadores de Eficiencia Energética de la generación de Energía Solar FV en el Edificio de Aulas 4 de los años 2017 – 2019

Si consideramos las medidas MAE's que hemos integrado al edificio aulas 4 el cálculo de los nuevos indicadores IE por servicio resultan unos valores que se muestran en la Tabla 119, donde se observa que ha habido una reducción en el sistema de refrigeración que era el más consumidor de energía, lo que demuestra, que se ha conseguido una optimización de la eficiencia energética del edificio y eso significa un mayor ahorro de energía y costes económicos, así como una mayor descarbonización y mejora del medioambiente.

Tabla 119. Escenario de IE con implementación de MAE's en el edificio de aulas 4

Tipo de uso	Electricidad (Kwh)	Indicador IE kWh/m2 año
Enfriamiento	73.041,19	23,65
Iluminación interior	13.421,92	4,35
Iluminación exterior	1.735,82	0,56
Equipos Ofimáticos	84.630,13	27,41
Área útil [m2]	3.087,85	

**7.3.2. Indicador IE referido al consumo de Energía primaria Edificios nZEB**

**Energía primaria:** Energía suministrada al edificio procedente de fuentes renovables y no renovables, que no ha sufrido ningún proceso previo de conversión o transformación. Es la energía contenida en los combustibles y otras fuentes de energía e incluye la energía necesaria para generar la energía final consumida, incluyendo las pérdidas por su transporte hasta el edificio, almacenamiento, etc. (Figura 236)

$$\text{Energía primaria} = \text{Energía final} + \text{Pérdidas en transformación} + \text{Pérdidas en transporte}$$

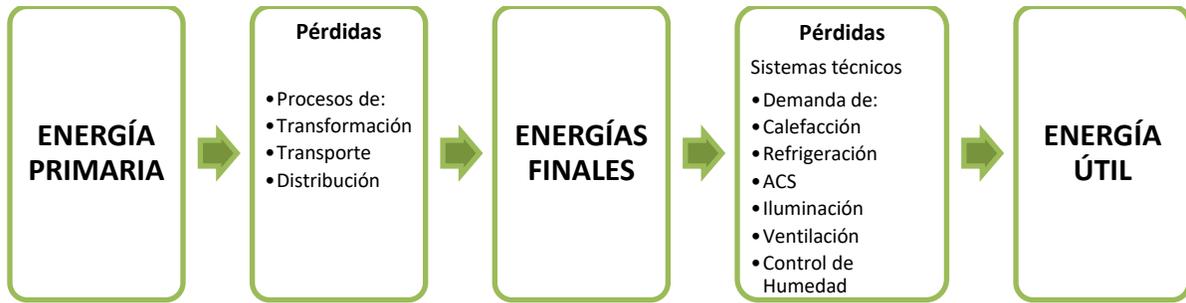


Figura 236. Etapas de Energía primaria a Energía Útil

La energía primaria puede descomponerse en energía primaria procedente de fuentes renovables, o energía primaria renovable, y en energía primaria procedente de fuentes no renovables o energía primaria no renovable, de acuerdo con la Directiva de Energías Renovables (2009/28/CE).

De forma simplificada, la relación entre energía final y primaria se puede expresar con un coeficiente de paso que refleja, para una zona geográfica determinada, el efecto de las pérdidas en transformación y transporte en cada una de las partes de la energía primaria (renovable y no renovable) de cada vector energético.

Energía procedente de fuentes renovables: energía procedente de fuentes renovables no fósiles, es decir, energía eólica, solar aerotérmica, geotérmica, hidrotérmica y oceánica, hidráulica, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración y biogás. Debe tenerse en cuenta que no toda la energía generada a partir de fuentes renovables puede ser considerada renovables. La energía generada a partir de fuentes renovables puede tener, en algunos casos, un componente de energía no renovable que debe ser tratado como tal en el cálculo energético [22][46].

Las ecuaciones de cálculo para nuestros edificios se expresan como:

$$E_{primaria_{NoRenovable}} = Consumo_{ElectTotalRED_{Medido}} * Factor_{ElectricidadNoRenovableColombia_{MatrizEnergetica}}$$

$$E_{primaria_{Renovable}} = Consumo_{RenovableFV_{Medido}} * 1 + Consumo_{TotalRED_{Medido}} * Factor_{ElectRenovableColombia_{MatrizEnergetica}}$$

$$E_{primaria_{Total}} = E_{primaria_{NoRenovable}} + E_{primaria_{Renovable}}$$

$$EER\% = \frac{E_{primaria_{Renovable}}}{E_{primaria_{TOTAL}}} * 100$$

Estudiaremos dos casos para obtener el factor de paso de energía final a energía primaria en función de la matriz de generación energética. El primer caso sería obtener el factor de paso en Colombia y el segundo caso sería en España un país de la EU.

#### A) Caso Colombia

En Colombia el recurso hídrico permite que la generación de energía eléctrica tenga un alto porcentaje de representación en la matriz energética (70%), sin embargo, el recurso hídrico se concentra en centrales hidroeléctricas que almacenan dicho recurso en embalses para su operación. Las grandes centrales hidroeléctricas se consideran centrales de generación eléctrica convencional, dado que al almacenar el agua a partir de embalses alteran los cursos de los ríos provocando impactos socioambientales. Dichos impactos no permiten considerar a este tipo de generación eléctrica de tipo renovable, aunque su recurso lo sea. Sucede lo contrario con los aprovechamientos a “filo de agua” típicos de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH’s) las cuales aprovechan una parte del caudal del río para convertirlo en energía eléctrica, sin necesidad de embalse, y luego se retorna el recurso al cauce lo que genera un bajo impacto socioambiental.

Los factores de paso se construyeron tomando como referencia el balance energético para Colombia BECO [23] [47], reportado la página de la unidad de planeamiento minero energético.

La Tabla 120 presenta los factores de paso de energía final a energía primaria para el caso de Colombia.

Tabla 120. Factores de paso de energía final a Energía primaria – Colombia

Tipo	Energético	2017			Factor CO2 [kg CO2/kW]
		Generación [GW]	Consumo [GW]	Factor Electricidad	
Renovable	Eólica	68	56970	1,19 E-03	0,0818
	Solar FV	3		5,27 E-05	
Total Renovable		71		1,25 E-03	
No Renovable	Hidroeléctrica	44.682		0,784	
	Térmica	21.272		0,373	
Total No Renovable		65.954		1,158	

Las tablas 121 y 122 presentan los IE de energía primaria no renovable, renovable y total para el CAMPUS UAO.

Tabla 121. IE de energía primaria no renovable Kw h, renovable y total en el CAMPUS UAO

Año/Consumo	2017			2018			2019		
	Consumo de Energía primaria no renovable	Energía primaria consumida renovable Solar FV	Consumo de energía primaria Total	Consumo de Energía primaria no renovable	Energía primaria consumida renovable Solar FV	Consumo de energía primaria Total	Consumo de Energía primaria no renovable	Energía primaria consumida renovable Solar FV	Consumo de energía primaria Total
<b>Total Año</b>	3.313.173	424.450	3.737.623	2.999.937	545.660	3.545.597	3.121.281	537.160	3.658.441
<b>IE kWh/m2 año</b>		<b>2017</b>		<b>2018</b>		<b>2019</b>			
<b>EpNoRenovable</b>		77,024		69,742		72,563			
<b>EpRenovable</b>		8,606		11,033		10,865			
<b>EpTotal</b>		85,631		80,775		83,428			
<b>EER</b>		10,05%		13,66%		13,02%			

Tabla 122. IE de energía primaria no renovable, renovable y total en kWh en el Edificio de Aulas 4

Año/Consumo	2017			2018			2019		
	Consumo de Energía primaria no renovable	Energía primaria consumida renovable Solar FV	Consumo de energía primaria Total	Consumo de Energía primaria no renovable	Energía primaria consumida renovable Solar FV	Consumo de energía primaria Total	Consumo de Energía primaria no renovable	Energía primaria consumida renovable Solar FV	Consumo de energía primaria Total
<b>Total Año</b>	151.630	34.832	186.462	133.715	54.666	188.381	157.555	50.821	208.376
<b>IE kWh/m2 año</b>		<b>2017</b>		<b>2018</b>		<b>2019</b>			
<b>EpNoRenovable</b>		56,849		50,133		59,071			
<b>EpRenovable</b>		11,342		17,758		16,522			
<b>EpTotal</b>		68,191		67,890		75,593			
<b>EER</b>		16,63%		26,16%		21,86%			

**B) Caso de España**

En este caso se realiza el análisis considerando la energía hidráulica como renovable, los factores de paso son presentados en la Tabla 123.

Tabla 123. Factores de paso de energía final a Energía primaria – España

Tipo	Energético	2017			Factor CO2 [kg CO2/kW]
		Generación [GW]	Consumo [GW]	Factor Electricidad	
Renovable	Eólica	68	56.970	1,19 E-03	0,0818
	Solar FV	3		5,27 E-05	
	Hidroeléctrica	44.682		7,84 E-01	
<b>Total Renovable</b>	44.753	<b>7,86 E-01</b>			
No Renovable	Térmica	21.272		0,373	
<b>Total No Renovable</b>		21.272	<b>0,373</b>		

Las tablas 124 y 125, presentan los IE de energía primaria no renovable, renovable y total para el edificio de Aulas 4 respectivamente.

Tabla 124. IE de energía primaria no renovable, renovable y total en kWh en el CAMPUS UAO

Año/Consumo	2017			2018			2019		
	Consumo de Energía primaria no renovable	Energía primaria consumida renovable Solar FV	Consumo de energía primaria Total	Consumo de Energía primaria no renovable	Energía primaria consumida renovable Solar FV	Consumo de energía primaria Total	Consumo de Energía primaria no renovable	Energía primaria consumida renovable Solar FV	Consumo de energía primaria Total
<b>Total Año</b>	3.313.173	424.450	3.737.623	2.999.937	545.660	3.545.597	3.121.281	537.160	3.658.441
<b>IE kWh/m2 año</b>		<b>2017</b>		<b>2018</b>		<b>2019</b>			
<b>EpNoRenovable</b>		24,842		22,494		23,404			
<b>EpRenovable</b>		60,788		58,281		60,024			
<b>EpTotal</b>		85,631		80,775		83,428			
<b>EER</b>		70,99%		72,15%		71,95%			

Tabla 125. IE de energía primaria no renovable, renovable y total en kWh en el Edificio de Aulas 4

Año/Consumo	2017			2018			2019		
	Consumo de Energía primaria no renovable	Energía primaria consumida renovable Solar FV	Consumo de energía primaria Total	Consumo de Energía primaria no renovable	Energía primaria consumida renovable Solar FV	Consumo de energía primaria Total	Consumo de Energía primaria no renovable	Energía primaria consumida renovable Solar FV	Consumo de energía primaria Total
<b>Total Año</b>	151.630	34.832	186.462	133.715	54.666	188.381	157.555	50.821	208.376

IE kWh/m2 año	2017	2018	2019
EpNoRenovable	18,335	16,169	19,052
EpRenovable	49,855	51,721	56,541
EpTotal	68,191	67,890	75,593
EER	73,11%	76,18%	74,80%

La Tabla 126 presenta una tabla comparativa de los IE de energía primaria no renovable, renovable y total en el edificio de aulas 4 en su estado actual y del edificio con las MAE'S propuestas.

Tabla 126. Tabla comparativa Edificio de aulas 4 vs Edificio con MAE's propuestas

Año/Consumo	EDIFICIO ACTUAL			EDIFICIO CON MAE'S PROPUESTAS		
	Consumo de Energía KWh/mes	Sistema Solar Fotovoltaica KWh/mes	Consumo Total kWh/mes	Consumo de Energía KWh/mes	Sistema Solar Fotovoltaica KWh/mes	Consumo Total kWh/mes
Total Año	151.630	34.832	186.462	137.997	34.832	172.829
IE kwh/m2 año	EDIFICIO ACTUAL		EDIFICIO CON MAE'S PROPUESTAS			
EpNoRenovable	19,052		11,336			
EpRenovable	56,541		51,738			
EpTotal	68,191		63,074			
EER	16,63%		17,97%			

### EDIFICIO nZEB DE CONSUMO DE ENERGIA CASI NULO

El concepto de edificio nZEB viene expresado en la EPBD 2010 de conformidad con el artículo 2, apartado 2, y EN 15603:2008, donde se entiende por «edificio de consumo de energía casi nulo, nZEB» como un edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto, que se determinará de conformidad con el anexo I. La cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de fuentes renovables producida *in situ* o en el entorno.

Por lo tanto, la definición de un edificio nZEB, muestra el hecho de que la integración de energía renovable y las medidas de eficiencia energética en un edificio van unidas.

En la EU los indicadores para saber si un edificio se comporta como un nZEB son la Ep no renovable y el EER. Para un edificio universitario con carga interna media alta en EU y considerando un clima suave marítimo el valor límite de Ep no renovable es 90 kwh/m2 año y en España sería 135 kwh/m2 año. Además, en EU el EER sería mayor del 20%.

Si analizamos nuestros indicadores en el caso A y en el caso B, se observan que la Ep no renovable cumpliría como nZEB en los dos casos para el Campus y para el aula 4 sin embargo el indicador de Ep renovable queda reducido en el caso A, lo que sería necesario integrar más sistemas de energía renovables y sin embargo si cumpliría en el caso B como nZEB.

**En resumen, si consideramos los factores de paso de España tanto el campus UAO como el edificio aulas 4 según los criterios EU y de España en el nuevo CTE HE0 serían edificios nZEB sin embargo si consideramos los factores de paso de Colombia, aun siendo muy eficientes los edificios no cumplirían el porcentaje de energías renovables como nZEB, siendo necesario incrementar las energías renovables.**

### **7.3.3. Indicador del Impacto Ambiental – Emisiones de CO2**

El cambio climático es, sin duda, el mayor reto al que se enfrenta la sociedad actual. Según informes del IPCC se estima que las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1,0°C con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0,8 °C a 1,2 °C. Si el ritmo de calentamiento global continúa al ritmo actual, es posible que el calentamiento global llegue a 1,5 °C entre 2030 y 2050.

Como explican los objetivos de la Agenda 2030, nuestra vulnerabilidad al cambio climático nos debe hacer trabajar en la mitigación de los riesgos y en la adaptación al mismo. Las prioridades de actuación son reducir el impacto ambiental negativo de las ciudades, atendiendo especialmente a la calidad del aire y a la gestión de residuos, y proteger el patrimonio cultural y natural. Especial importancia con el cambio climático tienen los objetivos de desarrollo sostenibles. En ellos se pretende adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. La lucha contra el cambio climático, tanto la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como la adaptación al cambio climático, son una prioridad en la actualidad.

La alerta climática planteada por la comunidad científica ha hecho que, en el horizonte 2020- 2050, las emisiones de CO<sub>2</sub> se constituyan como el principal vector de transformación del sector de la energía. La descarbonización sistemática y profunda del sistema energético es el horizonte político prioritario a lograr en el siglo XXI. Europa se ha comprometido a limitar sus emisiones de CO<sub>2</sub>, con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible.

Esto se ve reflejado en el Objetivo 7 de los ODS. “Energía asequible y no contaminante” cuyas metas son aumentar considerablemente la proporción de energía renovable, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias en los próximos 10 años.

Para conocer cuantitativamente la huella de carbono y el impacto ambiental en los edificios usaremos un indicador llamado  $I_M$  cuya ecuación de cálculo es la siguiente:

$$I_M = \frac{C_{final} * FactorElectricidad_{CO2}}{m^2}$$

Factor de CO<sub>2</sub> = 0.0818 [KG CO<sub>2</sub>/Kw], fuente: UPME (Colombia)

La Tabla 127 y las figuras 237 – 239, presentan las emisiones de CO2 y el indicador ambiental  $I_M$  mensual y anual de los años 2017 – 2019 en el campus UAO.

Tabla 127. Consumo de energía final total y emisiones de CO2 por meses en el CAMPUS UAO

Año	2017			2018			2019		
	Consumo de energía final Total [kWh/mes]	Kg CO2	IM [Kg CO2/m2]	Consumo de energía final Total [kWh/mes]	Kg CO2	IM [Kg CO2/m2]	Consumo de energía final Total [kWh/mes]	Kg CO2	IM [Kg CO2/m2]
Enero	280.370	22.934	0,46	260.424	21.303	0,43	237.635	19.439	0,39
Febrero	344.658	28.193	0,57	322.472	26.378	0,53	305.260	24.970	0,50
Marzo	350.748	28.691	0,58	302.893	24.777	0,50	328.690	26.887	0,54
Abril	296.426	24.248	0,49	315.173	25.781	0,52	290.152	23.734	0,48
Mayo	342.111	27.985	0,56	324.232	26.522	0,53	349.274	28.571	0,57
Junio	254.574	20.824	0,42	236.592	19.353	0,39	246.547	20.168	0,40
Julio	289.544	23.685	0,48	281.635	23.038	0,46	302.101	24.712	0,50
Agosto	346.242	28.323	0,57	332.242	27.177	0,55	351.491	28.752	0,58
Septiembre	366.798	30.004	0,60	321.359	26.287	0,53	345.877	28.293	0,57
Octubre	344.414	28.173	0,57	333.627	27.291	0,55	359.493	29.406	0,59
Noviembre	315.131	25.778	0,52	287.228	23.495	0,47	317.697	25.988	0,52
Diciembre	206.608	16.901	0,34	227.720	18.627	0,37	224.224	18.342	0,37
<b>Total Año</b>	<b>3.737.623</b>	<b>305.738</b>	<b>6,14</b>	<b>3.545.597</b>	<b>290.030</b>	<b>5,82</b>	<b>3.658.441</b>	<b>299.260</b>	<b>6,01</b>

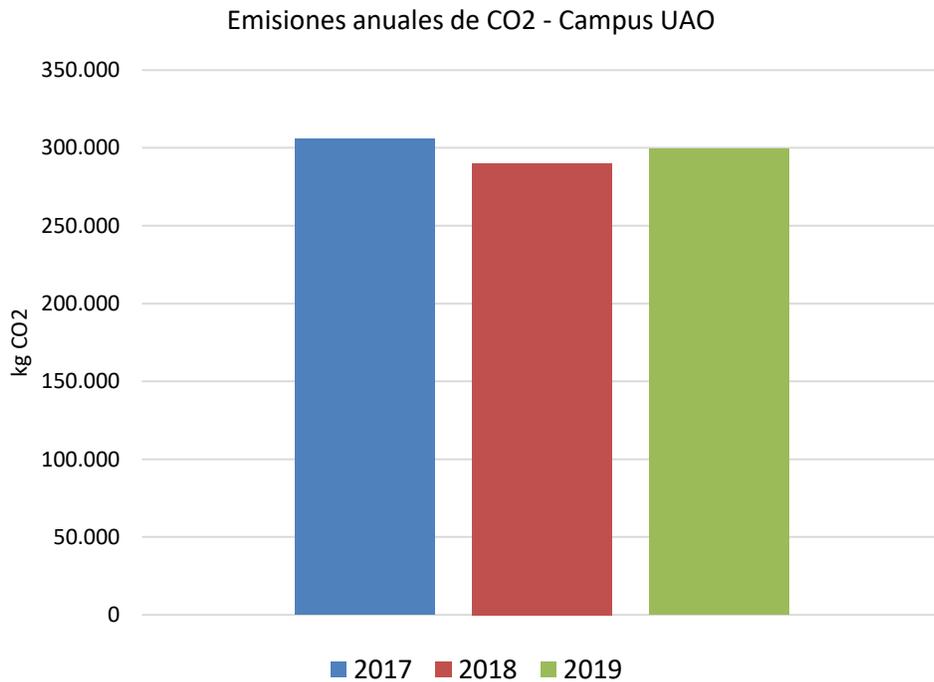


Figura 237. Emisiones anuales de CO2 de los años 2017 – 2019 campus UAO

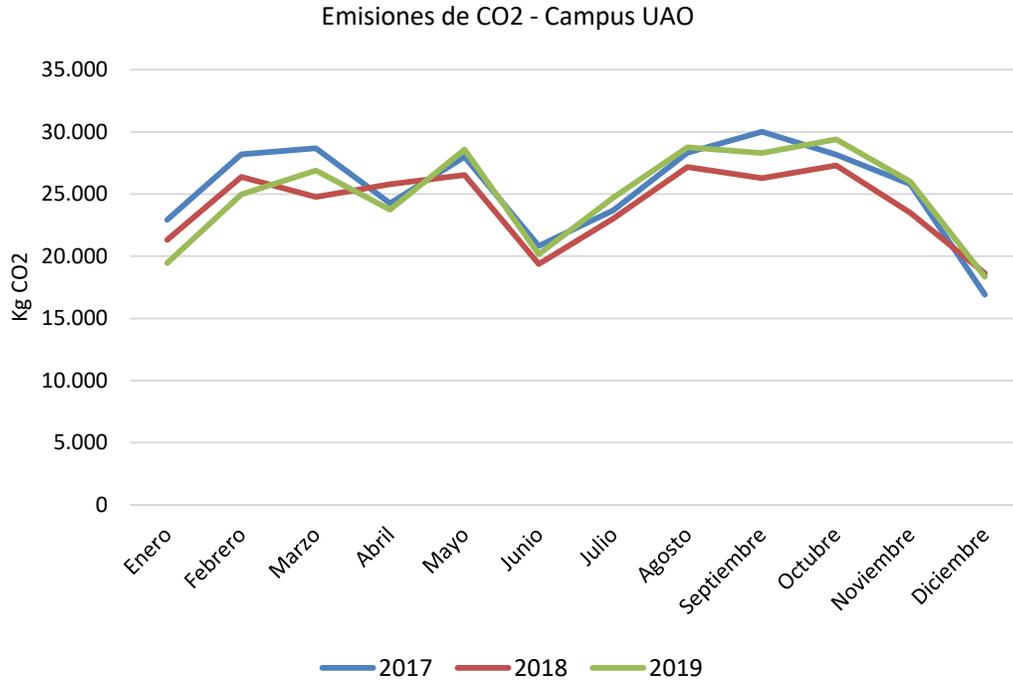


Figura 238. Emisiones mensuales de CO2 de los años 2017 – 2019 campus UAO

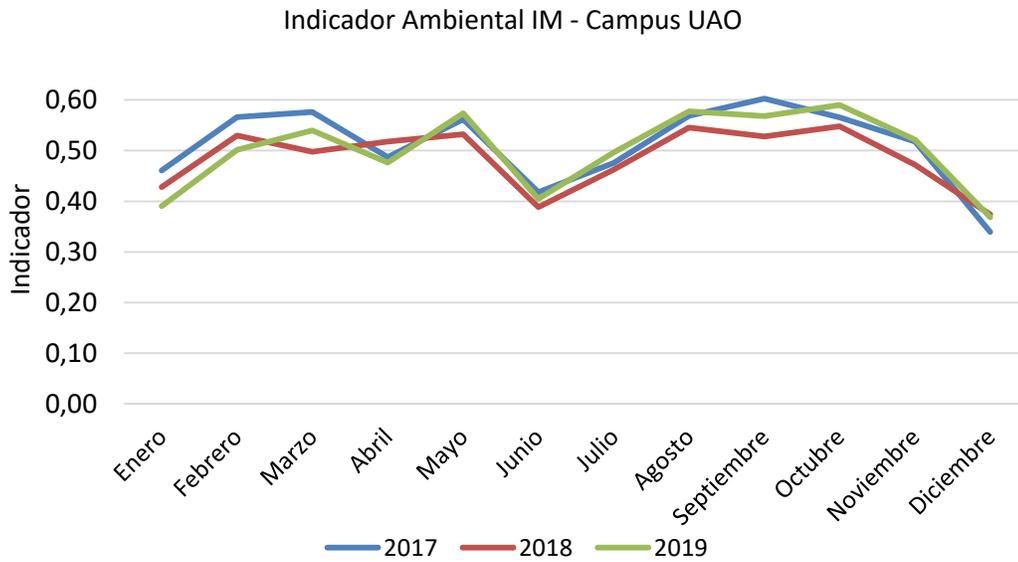


Figura 239. Indicador Ambiental mensual de los años 2017 – 2019 campus UAO

Tabla 128 y las figuras 240 – 242, presentan las emisiones de CO2 y el indicador ambiental  $I_M$  mensual y anual de los años 2017 – 2019 en el Edificios de Aula 4 de UAO.

Tabla 128. Consumo de energía final total y emisiones de CO2 por meses en el Edificio de Aulas 4

Año	2017			2018			2019		
	Consumo de energía final Total [kWh/mes]	Kg CO2	IM [Kg CO2/m2]	Consumo de energía final Total [kWh/mes]	Kg CO2	IM [Kg CO2/m2]	Consumo de energía final Total [kWh/mes]	Kg CO2	IM [Kg CO2/m2]
Enero	8.621	705,20	0,23	11.968	978,99	0,32	8.157	667,27	0,22
Febrero	19.672	1.609,17	0,52	18.612	1.522,43	0,49	18.339	1.500,10	0,49
Marzo	20.782	1.699,97	0,55	17.855	1.460,55	0,47	19.271	1.576,36	0,51
Abril	17.120	1.400,42	0,45	18.971	1.551,85	0,50	15.445	1.263,42	0,41
Mayo	20.919	1.711,17	0,55	18.237	1.491,76	0,48	18.876	1.544,03	0,50
Junio	10.869	889,08	0,29	10.451	854,88	0,28	12.135	992,60	0,32
Julio	11.163	913,13	0,30	13.730	1.123,11	0,36	20.271	1.658,15	0,54
Agosto	18.805	1.538,25	0,50	19.142	1.565,80	0,51	24.242	1.983,02	0,64
Septiembre	18.620	1.523,12	0,49	18.290	1.496,10	0,48	22.723	1.858,77	0,60
Octubre	17.007	1.391,17	0,45	17.515	1.432,73	0,46	21.390	1.749,73	0,57
Noviembre	14.861	1.215,63	0,39	14.198	1.161,36	0,38	17.109	1.399,53	0,45
Diciembre	8.023	656,28	0,21	9.414	770,03	0,25	10.418	852,17	0,28
<b>Total</b>	<b>186.462</b>	<b>15.253</b>	<b>4,94</b>	<b>188.381</b>	<b>15.410</b>	<b>4,99</b>	<b>208.376</b>	<b>17.045</b>	<b>5,52</b>

Emisiones anuales de CO2 - Aulas 4

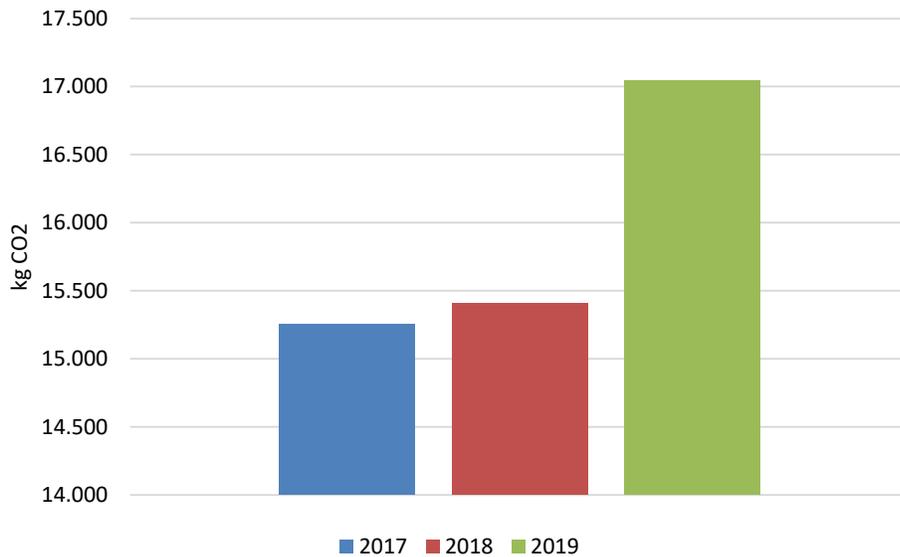


Figura 240. Emisiones anuales de CO2 de los años 2017 – 2019 campus UAO

Como se evidencia en las emisiones de CO2 y los indicadores ambientales  $I_M$  del edificio de Aulas 4, el valor en el año 2019 aumentó en un 10,6% con respecto al año 2018, debido al incremento en el consumo de energía del edificio, al normalizar sus actividades e incluir la climatización total de sus aulas. En el mismo porcentaje que incrementó el consumo de energía eléctrica, incrementaron las emisiones de CO2.

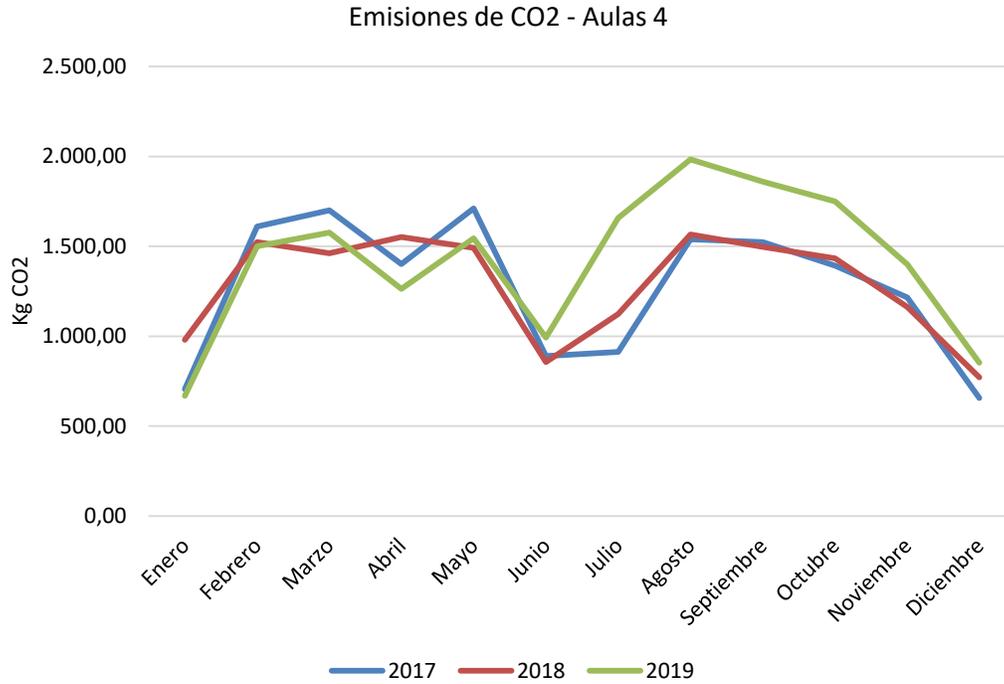


Figura 241. Emisiones mensuales de CO2 de los años 2017 – 2019 campus UAO

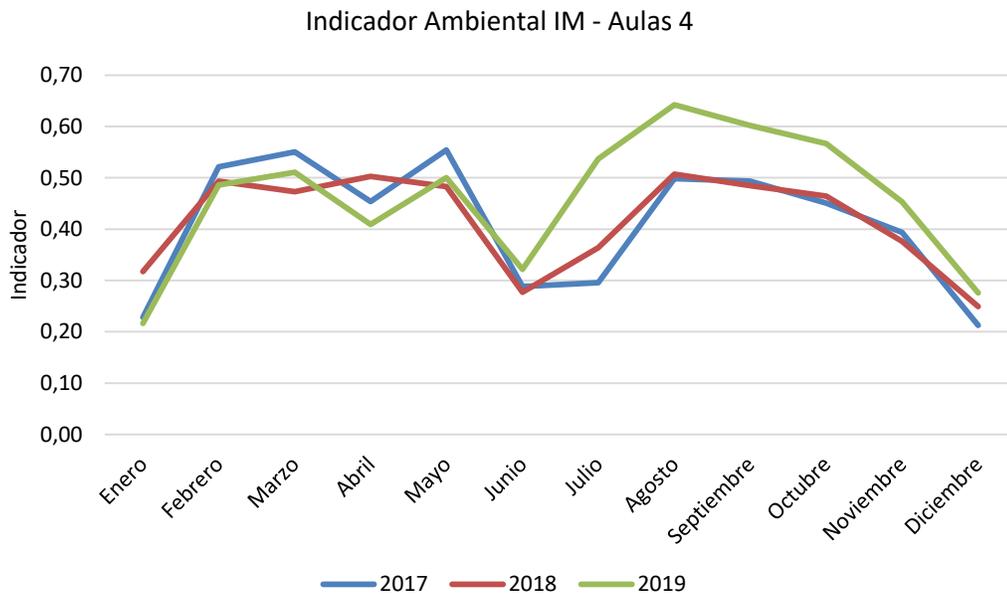


Figura 242. Indicador Ambiental mensual de los años 2017 – 2019 campus UAO

**7.3.4. Indicadores de Gestión Energética**

A continuación, se presenta los resultados de los indicadores de gestión energética o indicadores que reflejan el desempeño energético (IDE) del edificio de aulas 4. Estos indicadores permiten evaluar, de manera integral, todos los aspectos de la gestión energética asociados al funcionamiento del edificio. Abarca la planeación del mismo en función de las actividades desarrolladas en el campus, desde el punto de vista energético, el desempeño con miras a mejores prácticas de uso de energía, la estandarización como un proceso de mejora continua, y la medición de resultados de las políticas y acciones implementadas.

Tabla 129 siguiente tabla se presenta los consumos mensuales de los años 2017, 2018, 2019 y los valores estimados de sus líneas bases según el modelo de regresión multivariable.

Tabla 129. Consumo eléctrico real y estimado para los años 2017 – 2019 del edificio de aulas 4

Año	2017		2018		2019	
	Consumo Real	Consumo Estimado LBE	Consumo Real	Consumo Estimado LBE	Consumo Real	Consumo Estimado LBE
Enero	8.621	10.314	11.968	10.262	8.157	10.224
Febrero	19.672	18.583	18.612	12.106	18.339	16.856
Marzo	20.782	16.327	17.855	14.399	19.271	17.034
Abril	17.120	20.438	18.971	11.371	15.445	16.635
Mayo	20.919	21.719	18.237	10.576	18.876	18.204
Junio	10.869	10.828	10.451	8.955	12.135	11.611
Julio	11.163	12.111	13.730	10.576	20.271	19.073
Agosto	18.805	18.328	19.142	10.393	24.242	24.326
Septiembre	18.620	17.527	18.290	13.347	22.723	23.388
Octubre	17.007	15.838	17.515	7.626	21.390	21.814
Noviembre	14.861	16.457	14.198	8.622	17.109	19.236
Diciembre	8.023	8.032	9.414	10.236	10.418	9.974
Anual	186.462	186.502	188.383	128.470	208.376	208.375

**7.3.4.1. Indicador de eficiencia energética (IEE)**

Este indicador permite comparar el comportamiento de los resultados de consumo energético de una instalación en el edificio durante un período operativo, respecto a los valores de consumo energético base o de tendencia del mismo.

Matemáticamente se define como:

$$IEE = \frac{E_{medida}}{E_{Base}}$$

Para evaluar el indicador de eficiencia, se calcula el cociente entre el valor de consumo de energía, medido para un período de referencia, respecto al consumo de tendencia calculado a partir de la LBE para el mismo periodo. El resultado del indicador de eficiencia puede analizarse de acuerdo a tres estados, los cuales se encuentran dentro de los rangos numéricos < 1, >1, e =1.

La Tabla 130, presenta el indicador de Eficiencia Energética mensual del Edificio de aulas 4, para los años 2017, 2018 y 2019. En la Figura 243, se evidencia el indicador IEE anual de los años mencionados anteriormente.

Tabla 130. Indicador de Eficiencia Energética IEE del edificio de aulas 4 años 2017 – 2019

INDICADOR DE EFICIENCIA IEE						
Mes/Año	2017		2018		2019	
Enero	●	0,84	●	1,17	●	0,80
Febrero	●	1,06	●	1,54	●	1,09
Marzo	●	1,27	●	1,24	●	1,13
Abril	●	0,84	●	1,67	●	0,93
Mayo	●	0,96	●	1,72	●	1,04
Junio	●	1,00	●	1,17	●	1,05
Julio	●	0,92	●	1,30	●	1,06
Agosto	●	1,03	●	1,84	●	1,00
Septiembre	●	1,06	●	1,37	●	0,97
Octubre	●	1,07	●	2,30	●	0,98
Noviembre	●	0,90	●	1,65	●	0,89
Diciembre	●	1,00	●	0,92	●	1,04
Anual	●	1,00	●	1,47	●	1,00

Donde:  
 ● Zona de Eficiencia  
 ● Igualdad a la tendencia  
 ● Zona de Ineficiencia

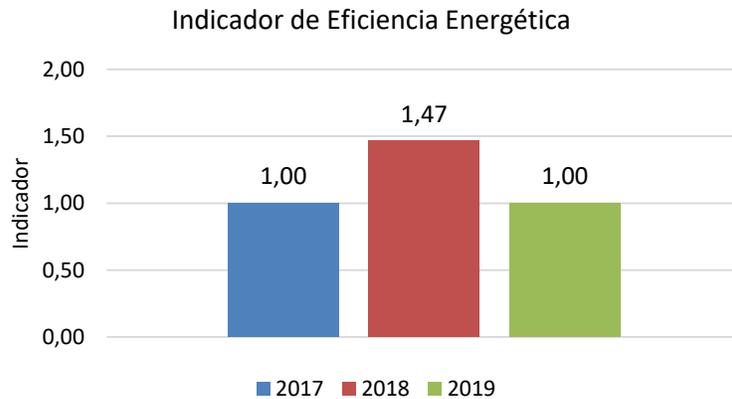


Figura 243. Indicador de Eficiencia Energética anual – Edificio de Aulas 4

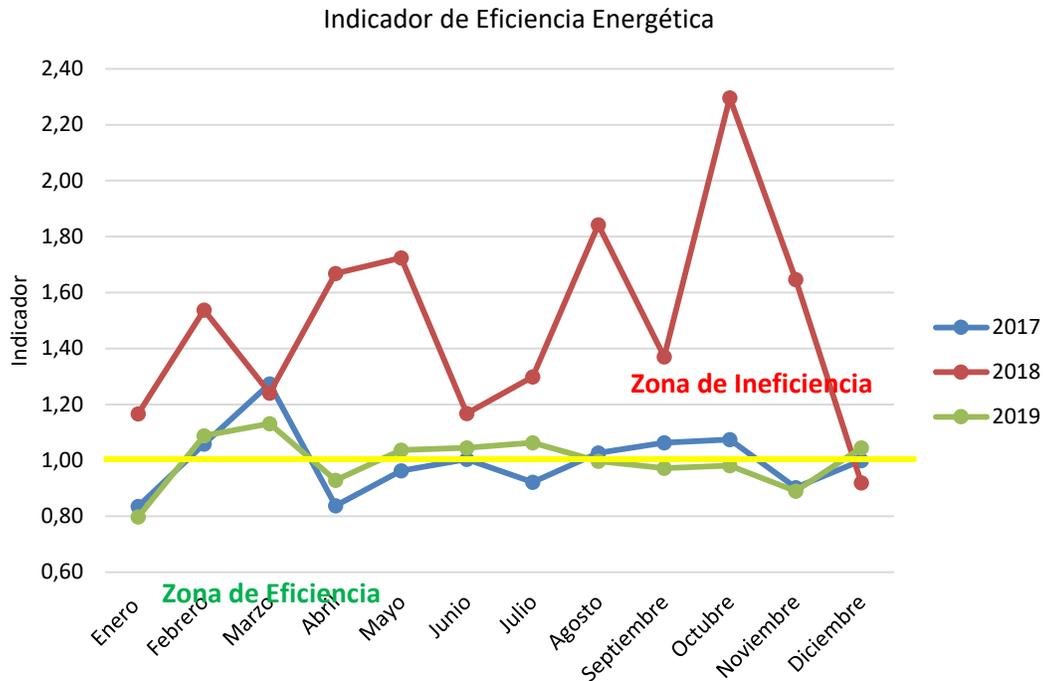


Figura 244. Indicador de Eficiencia Energética IEE del edificio de aulas 4 años 2017 – 2019

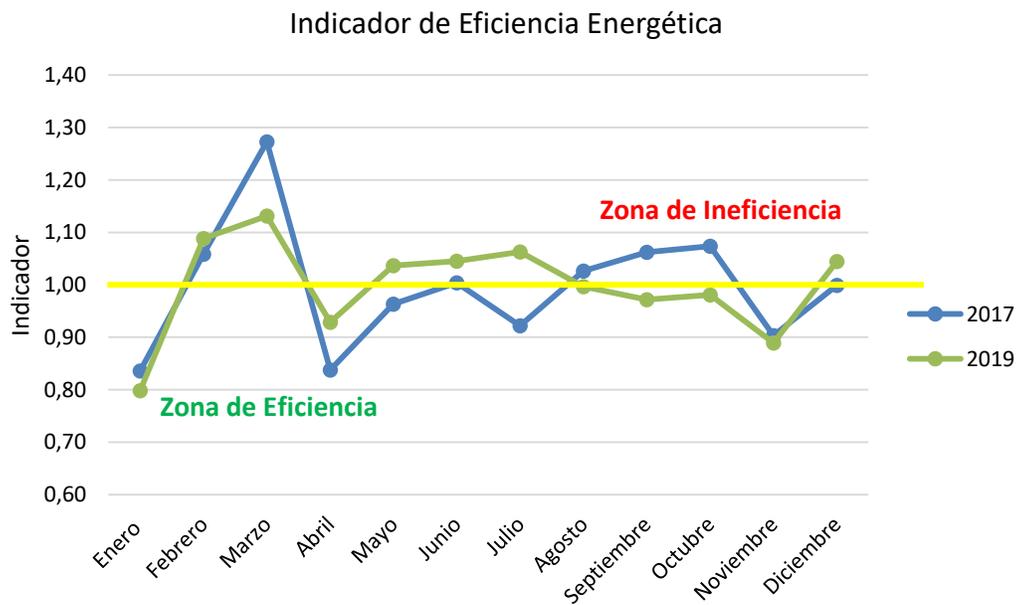


Figura 245. Indicador de Eficiencia Energética IEE del edificio de aulas 4 años 2017 y 2019

En la Figura 244 se puede visualizar el comportamiento del indicador de eficiencia para los años 2017, 2018, 2019, donde en el 2018 se aprecia una fluctuación del indicador con respecto a la base de comparación (1) con una tendencia hacia la ineficiencia. Lo anterior, en razón a los múltiples cambios que se han realizado en el aula 4 relacionados con: remodelación y adecuación oficina egresados, 10 salones de postgrado (piso 4) y cambio

del sistema de climatización de todas las aulas auditorios del edificio. De otro lado, para el 2019 se observa una estabilidad en el indicador siendo enero y noviembre los meses de mayor eficiencia. En este sentido, el indicador de eficiencia energética IEE puede ser monitoreado en intervalos de tiempo cortos o largos (horario, diario, mensual), dependiendo de la necesidad del usuario. Por su utilidad se recomienda ser utilizado por el personal táctico (directores, jefes de áreas) y operativo (supervisores, operarios).

#### **7.3.4.2. Indicador sumas acumulativa CUSUM**

En la Tabla 131 se presenta los cálculos realizados para obtener el indicador de sumas acumuladas CUSUM, el mismo tiene como objetivos mostrar a lo largo del tiempo los sobre consumos y la energía que se ha dejado de consumir, para brindar una alternativa de gestión que permita monitorear al final del periodo de análisis diario, semana, mensual y anual los ahorros obtenidos. Como IDE, ofrece un mecanismo básico y efectivo para la verificación y monitoreo de las mejoras en el desempeño energético y de los ahorros reales alcanzados dentro de los límites establecidos.

Por lo tanto, este indicador, hace visible cualquier ahorro o sobreconsumo energético o, en términos económicos relacionados a la energía que haya tenido la organización. El gráfico se utiliza para monitorear la tendencia de la empresa, en cuanto a la variación de sus consumos energéticos, respecto a un período o línea de base energética usada como referencia. Sí no hay cambios en los patrones del consumo, la curva CUSUM simplemente fluctuará alrededor de una línea horizontal. Sin embargo, cualquier cambio que produzca ahorros o sobreconsumos causará que la curva cambie de dirección: una tendencia de la curva hacia abajo significa ahorros, mientras que la ascendencia significa pérdidas.

En resumen, se plantea el CUSUM como un indicador de desempeño energético estratégico para la alta dirección de una organización, puesto que permite realizar seguimiento al desempeño de todas las áreas o dependencias, dentro de los límites del SGE. Y, sumado a ello, proporciona resultados totales de las acciones ejecutadas de un plan de acción para la gestión energética, en forma de unidades de energía ahorradas o consumidas en exceso, lo cual puede traducirse directamente en dinero.

La Tabla 131, presenta el Indicador de sumas acumulativas CUSUM de los años 2017, 2018 y 2019 del edificio de aulas 4.

Tabla 131. CUSUM edificio de aulas 4 años 2017 – 2019

CUSUM						
Año	2017		2018		2019	
Mes	Energía ahorrada o sobreconsumida	CUSUM	Energía ahorrada o sobreconsumida	CUSUM	Energía ahorrada o sobreconsumida	CUSUM
Enero	-1.693,1	-1.693,1	1.706,1	1.706,1	-2.066,8	-2.066,8
Febrero	1.089,1	-604,0	6.505,7	8.211,7	1.482,3	-584,6
Marzo	4.455,0	3.851,0	3.455,7	11.667,4	2.236,4	1.651,8
Abril	-3.317,7	533,3	7.599,9	19.267,4	-1.190,2	461,7
Mayo	-800,1	-266,8	7.661,2	26.928,6	671,7	1.133,4
Junio	41,2	-225,5	1.496,0	28.424,6	523,7	1.657,1
Julio	-947,9	-1.173,4	3.154,0	31.578,5	1.198,3	2.855,4
Agosto	477,2	-696,2	8.749,1	40.327,6	-83,4	2.772,0
Septiembre	1.092,6	396,4	4.942,7	45.270,3	-664,6	2.107,4
Octubre	1.168,6	1.564,9	9.888,8	55.159,1	-423,6	1.683,8
Noviembre	-1.595,9	-30,9	5.575,9	60.735,0	-2.126,7	-442,9
Diciembre	-9,0	-40,0	-822,1	59.912,9	443,9	1,0

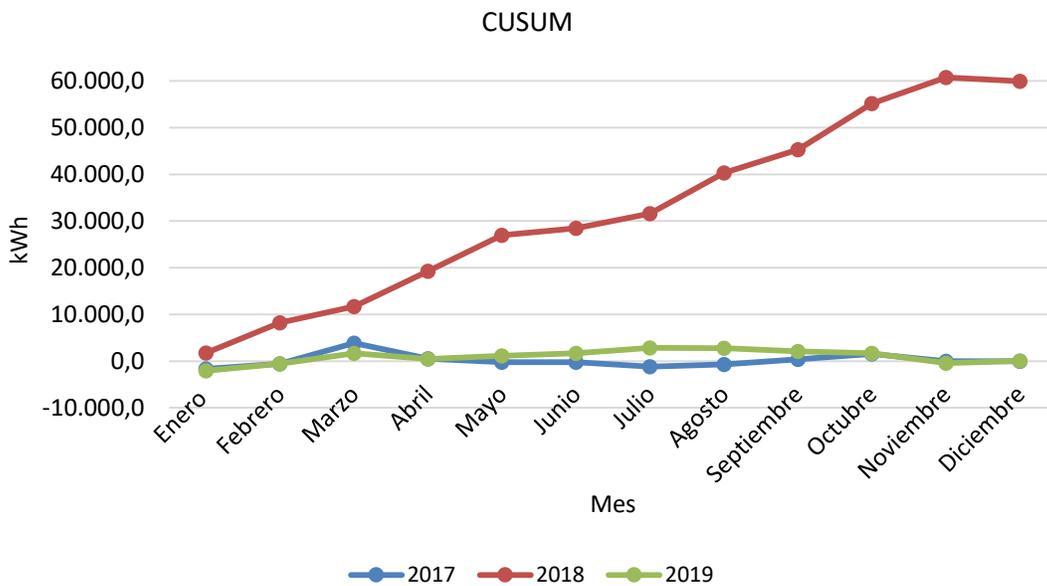


Figura 246. Indicador de Sumas Acumulativas CUSUM del edificio de aulas 4 años 2017 – 2019

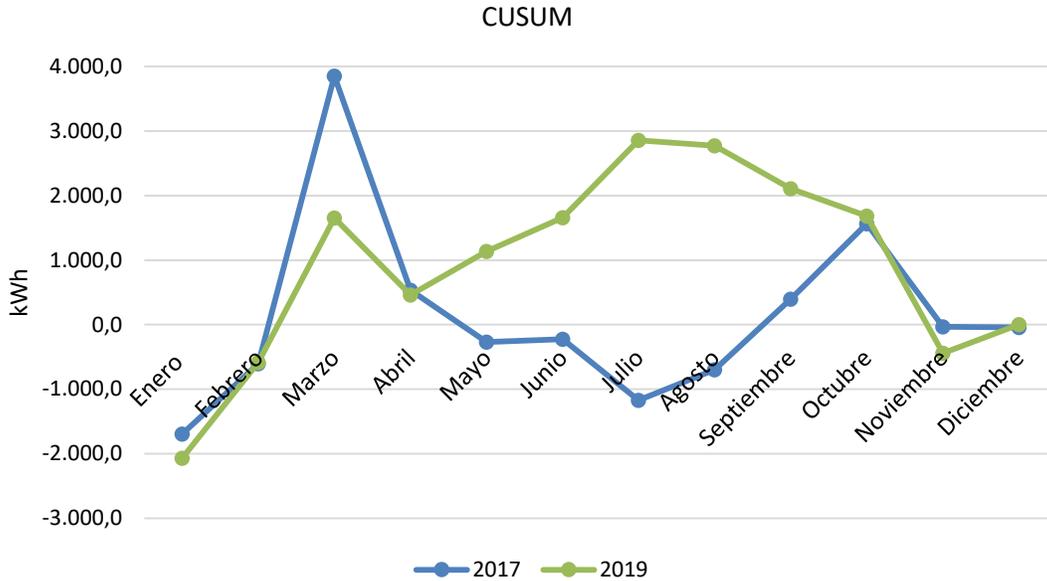


Figura 247. Indicador de Sumas Acumulativas CUSUM del edificio de aulas 4 años 2017 y 2019

Los resultados mostrados en la Figura 246 y 247 dejan en evidencia que la gestión energética realizada en el año 2018 tuvo algunas dificultades, debido a todas las adecuaciones que se realizaron en el aula. Lo anterior se muestra con una tendencia casi constante hacia la ineficiencia donde el modelo establecido como línea base, subestima los consumos de energía dando como resultado un sobre consumo de 59.912 kWh. Mientras que, en el 2019 los meses de mayor tendencia al ahorro son enero y noviembre. Es importante destacar que, pese a la los cambios tecnológicos relacionados con la instalación de ascensor y la climatización y remodelación de salones, los mismo no ha sido significativos debido a la tecnología adquirida. Este incremento ha representado 10.5% con respecto al año 2018.

En cuanto al análisis del indicador CUSUM para el 2019 se observa que el modelo planteado como línea base, realiza un pronóstico de consumo muy cercano al valor real, lo que facilita evaluar el desempeño y comportamiento de la eficiencia del aula. En ese sentido, se observa a lo largo del año, en la segunda mitad del mismo, aparece una tendencia marcada hacia la eficiencia dado la estabilidad del aula en cuanto a las adecuaciones realizadas. No obstante, aunque hay varios meses con tendencia a la ineficiencia los valores no son significativos y, hacia el final el año, se observa una relación igual en cuanto al consumo pronosticado frente al real. Esto evidencia que en la operación del aula no existan ahorros ni sobreconsumos.

La Tabla 132, presenta en resumen los indicadores del Campus UAO, la Tabla 133 recopila los indicadores del Edificio de Aulas 4.

Tabla 132. Resumen indicadores del campus UAO

INDICADOR	VALOR DEL INDICADOR		
	2017	2018	2019
Intensidad Energética	75,06	71,20	73,47
Indicador IE referido al consumo de energía primaria No renovable. Edificios nZEB	85,63	80,77	83,48
Impacto Ambiental	6,14	5,82	6,01

Tabla 133. Resumen de indicadores del Edificio de Aulas 4

INDICADOR	VALOR DEL INDICADOR		
	2017	2018	2019
Intensidad Energética	60,39	61,01	67,48
Indicador IE referido al consumo de energía primaria no renovable. Edificios nZEB	68,19	67,89	75,59
Impacto Ambiental	4,94	4,99	5,52
Eficiencia Energética IEE	1,00	1,47	1,00
Sumas acumulativas CUSUM	-40,00	59.913	1,00

#### 7.4. EFECTOS DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LÍNEA BASE E INDICADORES SOBRE LA ESTIMACIÓN DE AHORROS ENERGÉTICOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los indicadores de gestión, el indicador de eficiencia IEE y el indicador de sumas acumuladas CUSUM, así como las variaciones obtenidas cuando se utilizan distintos modelos para la estimación de la línea base tal como lo recomienda la norma ISO50006. En este sentido, en el apartado 6.2 se desarrollaron los modelos propuestos siguiendo lineamientos matemáticos y estadísticos.

Se debe tener en cuenta que la utilización de estos modelos hace parte de las características establecidas en la metodología propuesta. A continuación, se presenta los resultados obtenidos de todos los modelos realizados para el año 2019, con el fin de mostrar las variaciones en los mismos y las opciones en cuanto a la estimación de ahorros.

La Tabla 134, presenta el consumo eléctrico y el estimado, bajo los diferentes modelos planteados en el capítulo para el año 2019. En la

Tabla 135 y en la Figura 248, se muestran los resultados del indicador de eficiencia IEE, en donde es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

La utilización del modelo depende del recurso de datos de medición que se tenga en el las instalaciones del edificio.

El empleo de distintos modelos implica sub estimación y sobre estimación en la estimación de los ahorros. En ese sentido, la validación estadística juega un papel importante en la decisión de usar un modelo de mejor pronóstico y menor error.

Los cálculos de ahorro de energía pueden verse afectados por errores sistemáticos y aleatorios. Los errores sistemáticos son sesgo en la medición, supuestos y análisis. Los errores aleatorios son el resultado de la calidad de la medición, equipo, técnicas de medición y muestreo. De igual forma la funcionalidad de los mismos depende de la inclusión de más variables para su modelación.

Tabla 134. Consumo eléctrico real y estimados en kWh en los diferentes modelos para el año de 2019

2019	Consumo Real	Series de Tiempo						Regresión Lineal	
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Univariable	Multivariable
Enero	8.157,39	9.369,00	10.110,00	9.917,78	15.699,00	10.054,00	10.178,62	9.417,98	10.224,23
Febrero	18.338,60	19.136,00	19.050,00	20.257,09	15.381,00	17.857,00	17.856,71	17.176,60	16.856,33
Marzo	19.270,85	18.186,00	18.508,00	19.251,92	15.358,00	19.770,00	19.228,21	17.472,40	17.034,45
Abril	15.445,27	18.346,00	18.350,00	19.421,75	15.476,00	16.129,00	16.359,01	15.875,11	16.635,44
Mayo	18.875,69	18.855,00	18.993,00	19.960,26	15.182,00	19.770,00	20.158,89	18.301,88	18.203,96
Junio	12.134,52	8.774,00	9.682,00	9.287,88	15.236,00	12.334,00	11.667,40	13.332,53	11.610,77
Julio	20.270,80	11.086,00	11.980,00	11.735,77	15.376,00	12.640,00	12.152,20	18.213,77	19.072,51
Agosto	24.242,27	19.269,00	19.149,00	20.398,15	15.921,00	17.459,00	17.830,02	21.113,82	24.325,69
Septiembre	22.723,39	18.496,00	18.448,00	19.580,60	16.346,00	16.896,00	16.810,70	22.049,03	23.387,98
Octubre	21.390,40	16.742,00	17.044,00	17.723,30	16.715,00	17.459,00	16.724,73	23.770,93	21.814,02
Noviembre	17.109,19	13.979,00	14.199,00	14.798,72	17.038,00	16.896,00	17.100,00	21.327,29	19.235,86
Diciembre	10.417,76	7.494,00	8.222,00	7.933,60	17.281,00	7.909,00	7.920,03	10.322,98	9.973,85
Anual	208.376,13	179.732,00	183.735,00	190.266,83	191.009,00	185.173,00	183.986,52	208.374,33	208.375,09
MAPE		13,7%	11,8%	8,7%	8,3%	11,1%	11,7%	0,0%	0,0%

Tabla 135. Indicador de Eficiencia Energética de los diferentes modelos

2019	INDICADOR DE EFICIENCIA ENERGÉTICA							
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Univariable	Multivariable
Enero	0,87	0,81	0,82	0,52	0,81	0,80	0,87	0,80
Febrero	0,96	0,96	0,91	1,19	1,03	1,03	1,07	1,09
Marzo	1,06	1,04	1,00	1,25	0,97	1,00	1,10	1,13
Abril	0,84	0,84	0,80	1,00	0,96	0,94	0,97	0,93
Mayo	1,00	0,99	0,95	1,24	0,95	0,94	1,03	1,04
Junio	1,38	1,25	1,31	0,80	0,98	1,04	0,91	1,05
Julio	1,83	1,69	1,73	1,32	1,60	1,67	1,11	1,06
Agosto	1,26	1,27	1,19	1,52	1,39	1,36	1,15	1,00
Septiembre	1,23	1,23	1,16	1,39	1,34	1,35	1,03	0,97
Octubre	1,28	1,26	1,21	1,28	1,23	1,28	0,90	0,98
Noviembre	1,22	1,20	1,16	1,00	1,01	1,00	0,80	0,89
Diciembre	1,39	1,27	1,31	0,60	1,32	1,32	1,01	1,04
Anual	1,16	1,13	1,10	1,09	1,13	1,13	1,00	1,00

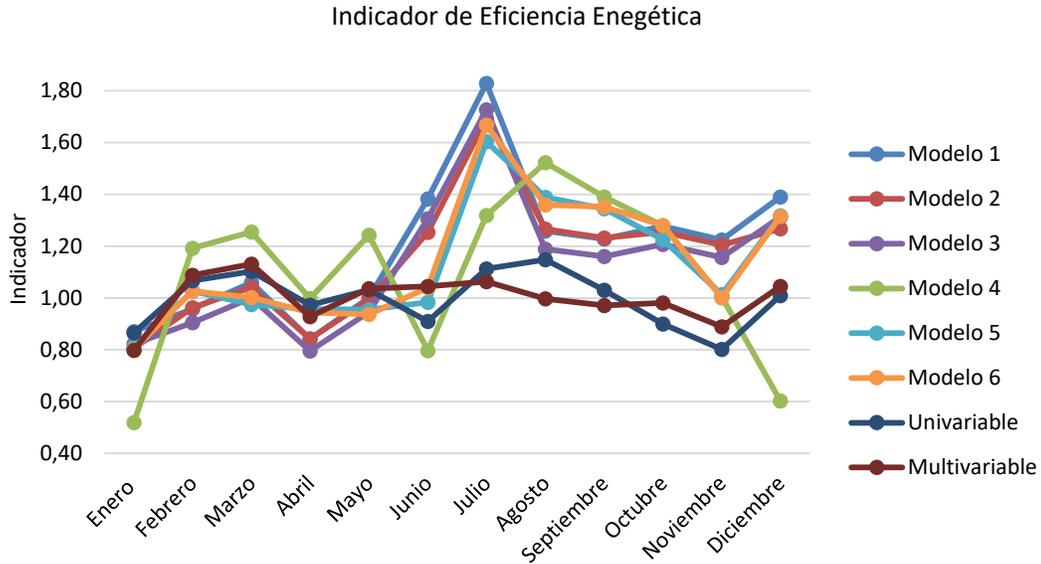


Figura 248. Indicador de Eficiencia Energética mensual de los diferentes modelos

Tabla 136 y la Figura 249 presentan los resultados del Indicador de Sumas acumulativas CUSUM.

Tabla 136. Indicador CUSUM de los diferentes modelos

2019	CUSUM							
	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4	
	Energía Ahorrada o sobreconsumida	CUSUM						
Enero	-1.211,61	-1.211,61	-1.952,61	-1.952,61	-1.760,39	-1.760,39	-7.541,61	-7.541,61
Febrero	-797,40	-2.009,02	-711,40	-2.664,02	-1.918,49	-3.678,88	2.957,60	-4.584,02
Marzo	1.084,85	-924,16	762,85	-1.901,16	18,93	-3.659,96	3.912,85	-671,16
Abril	-2.900,73	-3.824,89	-2.904,73	-4.805,89	-3.976,48	-7.636,44	-30,73	-701,89
Mayo	20,69	-3.804,20	-117,31	-4.923,20	-1.084,57	-8.721,01	3.693,69	2.991,80
Junio	3.360,52	-443,68	2.452,52	-2.470,68	2.846,64	-5.874,37	-3.101,48	-109,68
Julio	9.184,80	8.741,12	8.290,80	5.820,12	8.535,03	2.660,67	4.894,80	4.785,12
Agosto	4.973,27	13.714,39	5.093,27	10.913,39	3.844,12	6.504,79	8.321,27	13.106,39
Septiembre	4.227,39	17.941,78	4.275,39	15.188,78	3.142,79	9.647,58	6.377,39	19.483,78
Octubre	4.648,40	22.590,18	4.346,40	19.535,18	3.667,10	13.314,68	4.675,40	24.159,18
Noviembre	3.130,19	25.720,37	2.910,19	22.445,37	2.310,47	15.625,14	71,19	24.230,37
Diciembre	2.923,76	28.644,13	2.195,76	24.641,13	2.484,15	18.109,30	-6.863,24	17.367,13
2019	Modelo 5		Modelo 6		Univariable		Multivariable	
	Energía Ahorrada o sobreconsumida	CUSUM						
	Enero	-1.896,61	-1.896,61	-2.021,23	-2.021,23	-1.260,59	-1.260,59	-2.066,84
Febrero	481,60	-1.415,02	481,89	-1.539,35	1.161,99	-98,60	1.482,27	-584,57
Marzo	-499,15	-1.914,16	42,64	-1.496,70	1.798,45	1.699,86	2.236,40	1.651,83
Abril	-683,73	-2.597,89	-913,74	-2.410,44	-429,84	1.270,02	-1.190,17	461,66
Mayo	-894,31	-3.492,20	-1.283,20	-3.693,64	573,81	1.843,83	671,73	1.133,39
Junio	-199,48	-3.691,68	467,12	-3.226,52	-1.198,02	645,82	523,75	1.657,14
Julio	7.630,80	3.939,12	8.118,60	4.892,08	2.057,03	2.702,85	1.198,29	2.855,43
Agosto	6.783,27	10.722,39	6.412,25	11.304,33	3.128,45	5.831,30	-83,42	2.772,01
Septiembre	5.827,39	16.549,78	5.912,69	17.217,02	674,36	6.505,66	-664,58	2.107,43
Octubre	3.931,40	20.481,18	4.665,67	21.882,69	-2.380,54	4.125,12	-423,62	1.683,80
Noviembre	213,19	20.694,37	9,19	21.891,88	-4.218,10	-92,98	-2.126,67	-442,86
Diciembre	2.508,76	23.203,13	2.497,73	24.389,61	94,78	1,80	443,90	1,04

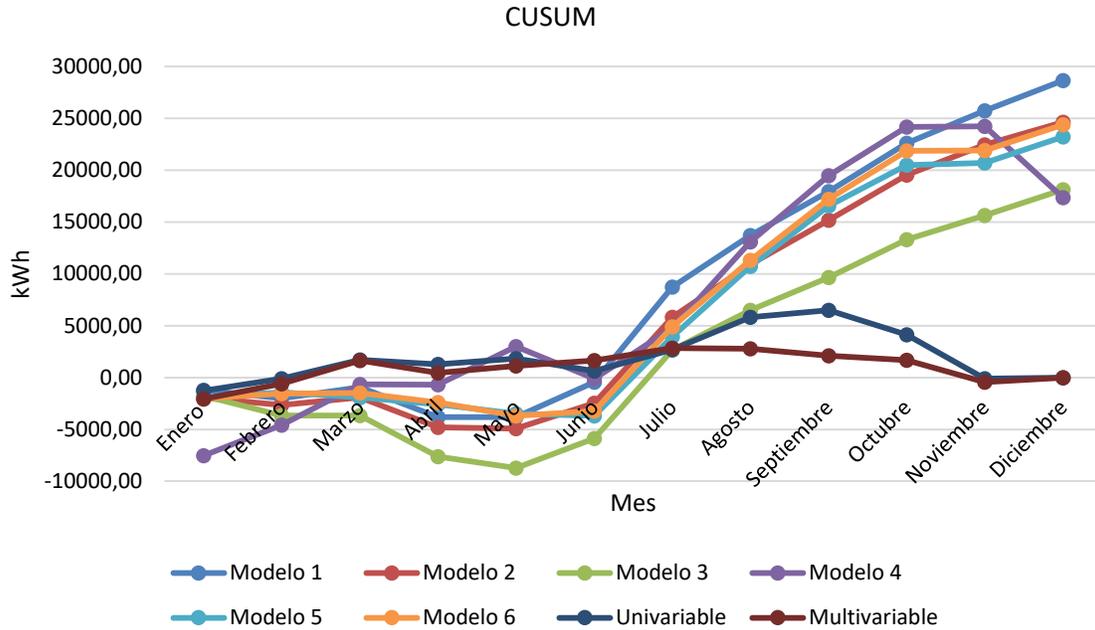


Figura 249. Indicador CUSUM de los diferentes modelos

Esta herramienta genera alertas en cuanto a variaciones positivas o negativas de la eficiencia del proceso, facilitando el análisis y generación de planes de acción en función de las mejores prácticas energéticas en la edificación.

Los resultados obtenidos en la tabla 56 y la Figura 51, nos muestran los ahorros proyectados en cada uno de los modelos planteados para estimar la línea base energética. En este sentido, los modelos 1 al 6 corresponden a los estimados mediante series de tiempo, los resultados en la estimación de ahorros están fuertemente ligados al error de pronóstico del modelo, lo que se traduce para este caso en sobreconsumos del aula y una tendencia marcada hacia la ineficiencia. En el caso de los ahorros obtenidos con el modelo regresión univariable y multivariable, se observa que para algunos meses existe una tendencia marcada hacia la eficiencia, para los meses de enero, abril, junio, octubre y noviembre. No obstante, para el resto de los meses la tendencia es hacia la ineficiencia. Es decir, más consumo con respecto a la tendencia. Finalmente, no se identifica un valor significativo de ahorro energético, pero si se observa una estabilidad en la operación del aula luego de realizar todas las adecuaciones antes mencionadas.

**7.4.1. Análisis del modelo 2019 considerando datos diarios, semanales y mensuales**

En este apartado se analiza el modelo de regresión lineal multivariable con distinta periodicidad de datos diarios, semanal y mensual, lo anterior con la finalidad de evaluar el nivel pronóstico en la estimación de la línea base y su relación con la valoración de ahorros.

Tabla 137. Consumo eléctrico real y estimados en kWh bajo las LBE diaria, semanal, mensual y propuesta de 2019

Mes	2019				
	Consumo Real	Consumo Estimado LBE Diaria	Consumo Estimado LBE Semanal	Consumo Estimado LBE Mensual	Consumo Estimado LBE Propuesta
Febrero	18.282	11.297	16.805	16.856	16.805
Marzo	19.293	19.320	18.618	17.034	19.320
Abril	14.801	15.661	16.464	16.635	15.661
Mayo	19.173	19.573	19.813	18.204	19.573
Junio	12.370	12.605	12.984	11.611	12.605
Julio	21.059	8.580	20.678	19.073	20.678
Agosto	24.720	23.569	25.721	24.326	23.569
Septiembre	23.053	24.225	22.301	23.388	24.225
Octubre	21.968	20.866	23.575	21.814	20.866
Noviembre	17.374	19.238	18.299	19.236	19.238
Diciembre	10.456	11.076	9.635	9.974	11.076
Anual	202.549	186.010	204.891	198.151	203.616
<b>MAPE</b>		8,2%	1,2%	2,2%	0,5%

En la Tabla 137, se observa las diferencias en los consumos estimados de la línea base diaria, semanal, mensual y la línea base propuesta, para la estimación de ahorros energéticos. En este sentido, podemos observar que en la línea base diaria, la estimación funciona de modo adecuado para los meses de operación normal del semestre, donde el modelo depende de variables como humedad, temperatura y ocupación. Mientras que para el mes de julio donde la ocupación es baja por vacaciones, el modelo no cuenta con la capacidad de pronosticar el valor de consumo esperado. En el caso del modelo semanal, los resultados obtenidos son mejores en pronóstico de consumo o línea base, en razón a la integración de variables y la compensación de las mismas al trabajar en periodos de tiempos más amplios, lo propio sucede con el modelo mensual. En resumen, los errores obtenidos de cada uno de los modelos son del orden 8.2%, 1.2%, 2,2% y 0.5% para el modelo diario, semanal, mensual y el de línea base propuesta. Dada las condiciones anteriormente mencionadas, se propone una línea base energética donde se utiliza para los meses de operación normal del Aula el modelo diario y, para los meses de baja ocupación o vacaciones, el modelo semanal. Así los resultados obtenidos muestran valores de pronósticos entre la línea base real y pronosticada con menor nivel de error.

Tabla 138. Indicador de Eficiencia Energética de los modelos de LBE diaria, semanal mensual y propuesta del 2019

INDICADOR DE EFICIENCIA ENERGÉTICA				
Mes/Año	Consumo Estimado LBE Diaria	Consumo Estimado LBE Semanal	Consumo Estimado LBE Mensual	Consumo Estimado LBE Propuesta
Febrero	1,62	1,09	1,08	1,09
Marzo	1,00	1,04	1,13	1,00
Abril	0,95	0,90	0,89	0,95
Mayo	0,98	0,97	1,05	0,98
Junio	0,98	0,95	1,07	0,98
Julio	2,45	1,02	1,10	1,02
Agosto	1,05	0,96	1,02	1,05
Septiembre	0,95	1,03	0,99	0,95
Octubre	1,05	0,93	1,01	1,05
Noviembre	0,90	0,95	0,90	0,90
Diciembre	0,94	1,09	1,05	0,94
Anual	1,09	0,99	1,02	0,99

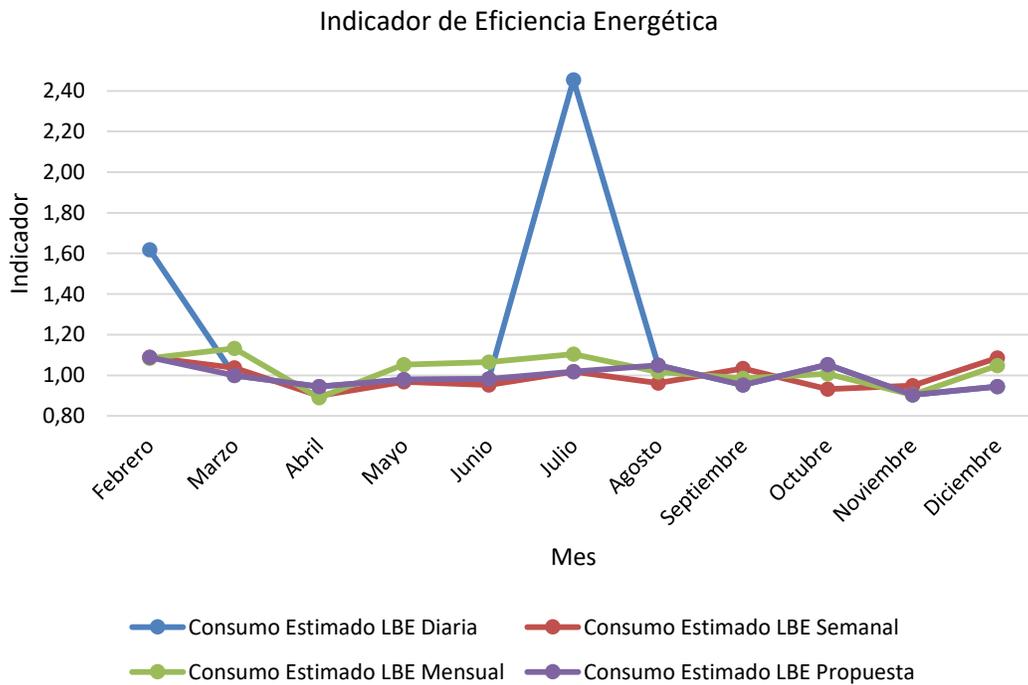


Figura 250. Indicador de Eficiencia Energética de los modelos de LBE diaria, semanal, mensual y propuesta del 2019

En la Tabla 138 y la Figura 250, se muestran los resultados del indicador de eficiencia donde se observa que, en los cuatro modelos propuestos se conserva la misma tendencia hacia la eficiencia o ineficiencia, con la diferencia que el modelo que denominado como línea base propuesta, responde de manera más exacta al pronóstico y, por ende, proporciona mejor respuesta en la caracterización de la eficiencia.

Tabla 139. Indicador CUSUM de los modelos de LBE diaria, semanal mensual y propuesta del 2019

CUSUM				
	Consumo Estimado LBE Diaria		Consumo Estimado LBE Semanal	
Mes	Energía ahorrada o sobreconsumida	CUSUM	Energía ahorrada o sobreconsumida	CUSUM
Febrero	6.984,9	6.984,9	1.476,8	1.476,8
Marzo	-27,1	6.957,8	675,2	2.152,0
Abril	-860,0	6.097,8	-1.662,2	489,8
Mayo	-400,2	5.697,6	-640,1	-150,3
Junio	-235,2	5.462,4	-614,0	-764,2
Julio	12.479,3	17.941,7	381,7	-382,6
Agosto	1.151,3	19.093,0	-1.000,2	-1.382,8
Septiembre	-1.172,5	17.920,5	751,9	-630,8
Octubre	1.102,4	19.022,9	-1.606,6	-2.237,5
Noviembre	-1.864,1	17.158,8	-925,4	-3.162,8
Diciembre	-620,4	16.538,4	821,0	-2.341,9
	Consumo Estimado LBE Mensual		Consumo Estimado LBE Propuesta	
Mes	Energía ahorrada o sobreconsumida	CUSUM	Energía ahorrada o sobreconsumida	CUSUM
Febrero	1.425,7	1.425,7	1.476,8	1.476,8
Marzo	2.258,5	3.684,2	-27,1	1.449,7
Abril	-1.834,0	1.850,3	-860,0	589,7
Mayo	968,8	2.819,1	-400,2	189,5
Junio	759,0	3.578,0	-235,2	-45,7
Julio	1.986,8	5.564,9	381,7	336,0
Agosto	394,8	5.959,7	1.151,3	1.487,3
Septiembre	-335,2	5.624,5	-1.172,5	314,8
Octubre	153,9	5.778,4	1.102,4	1.417,2
Noviembre	-1.862,3	3.916,0	-1.864,1	-446,9
Diciembre	481,7	4.397,8	-620,4	-1.067,3

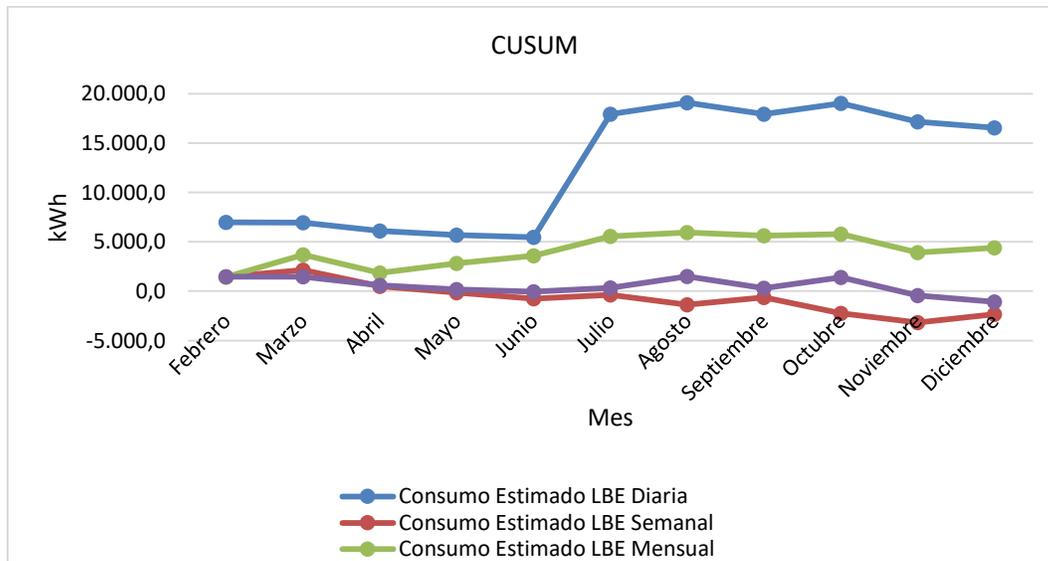


Figura 251. Indicador CUSUM de los modelos de LBE diaria, semanal, mensual y propuesta del 2019

En la Tabla 139 y la Figura 251, se muestran los resultados obtenidos en la evaluación de ahorros de año 2019 para los modelos de línea base diaria, semanal, mensual y propuesta. Esto permite evidenciar las diferencias obtenidas entre un modelo y otro, para el caso de la línea base diaria, se observa una tendencia marcada hacia la ineficiencia y una subestimación de 16538 kWh anuales que representan un 9.1% con respecto al consumo real del aula. Resultado que obedece principalmente a lo mencionado anteriormente con respecto a los errores en el pronóstico de los meses de baja ocupación. De otro lado, en los modelos semanal, mensual se identificaron consumos de 2342 kWh y 4397 kWh respectivamente, los mismos representan un 1.2% y 9.7% por debajo del valor real anual de consumo del Aula. Para el caso del modelo de línea base propuesto, el valor de ahorro corresponde a 1067 kWh los cuales representan el 1.01% con respecto al consumo real. Este modelo permite evaluar de manera más precisa las variaciones mes a mes y, dado el ajuste realizado en los meses de baja ocupación permite obtener un menor porcentaje de error en la estimación de la línea base. Lo anterior da la posibilidad de realizar una gestión detallada en el aula considerando que al momento existe una estabilidad en la operación de la misma.

A manera de conclusión podemos decir que, el uso de cada modelo va a depender del recurso disponible de información, en este caso, de la frecuencia y número de variables asociadas al consumo. Para edificaciones que disponen solo de datos de consumo mensual de facturación, un modelo de series de tiempo resulta adecuado de emplear. Por el contrario, si se dispone de equipos de monitoreo de consumo con recurso para bajar información y adicionalmente de variables meteorológicas y de otras derivadas de la ocupación, el uso de modelos de regresión lineal y multivariable resultan más precisos a la hora de establecer una línea base energética con miras hacer pronóstico de consumo. En este sentido, se aplican una variedad de pruebas estadísticas a los resultados de ahorro de energía y datos para revelar cuál modelo describe mejor y refleja la evolución del consumo de energía en la instalación y, si los porcentajes de mejora del rendimiento energético obtenidos tienen sentido en función de los patrones de operación de la instalación.

El análisis presentado en este capítulo, tiene como finalidad mostrar un abanico de posibilidades con la validación de recursos matemáticos y estadísticos a la hora de seleccionar un modelo para establecer una línea base energética. Los modelos desarrollados muestran que la selección de uno u otro, implica la sobreestimación o subestimación en el pronóstico de consumo de energía que afecta los valores de ahorro. De la misma forma, los modelos de series de tiempo son modelos funcionales cuando no se tienen datos adicionales al consumo de energía, mientras que los modelos de regresión dan resultados más precisos a los acontecimientos en el edificio (ya sean de tipo climatológico, como de ocupación o demás), es decir, la inclusión de más variables en el modelo hace que sea más preciso. Mientras que los modelos de series de tiempo resultan siendo modelos iniciales para empezar a hacer gestión del edificio. De otro lado, es importante evaluar que la variación en las estimaciones de ahorro de energía son el resultado de cambios inevitables en la operación y las condiciones entre la línea de base y los periodos de reporte de la línea base, que afectan significativamente los resultados de la evaluación.

En última instancia, el método seleccionado debe incluir un período de modelado que abarque valores de variables relevantes que se encuentren cerca de los niveles futuros esperados, de modo que los resultados de la evaluación resulten más significativos e indicativos del ahorro de energía futuro de la instalación.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ISO, ISO 50001:2018 Energy management systems - Requirements with guidance for use. SUIZA, 2018.
- [2] B. L. Bowerman, T. O. C. Richard, y B. K. Anne, Pronósticos, series de tiempo y regresión. Un enfoque aplicado, 4 edición. Cengage Learning Books Cole, 2006.
- [3] J. H. Wilson y B. Keating, Pronósticos para los negocios con ForecastX basado en inglés, 5a ed. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [4] ISO 50006, “Energy management systems - Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) - General principles and guidance”, 2016.
- [5] C. Salazar, “Cálculo de correlaciones”, RPubS, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://rpubs.com/camilamila/correlaciones>. [Consultado: 25-mar-2020].
- [6] C. de Igor, “Correlation tests, correlation matrix, and corresponding visualization methods in R”, 2017. [En línea]. Disponible en: [https://rstatic.s3.amazonaws.com/240657\\_5157ff98e8204c358b2118fa69162e18.html](https://rstatic.s3.amazonaws.com/240657_5157ff98e8204c358b2118fa69162e18.html). [Consultado: 25-mar-2020].
- [7] J. Amat, “Correlación lineal y regresión lineal simple en R”, RPubS, 2016. [En línea]. Disponible en: [https://rpubs.com/Joaquin\\_AR/223351](https://rpubs.com/Joaquin_AR/223351). [Consultado: 25-mar-2020].
- [8] E. T. Area, “The effect of linear regression modeling approaches on determining facility wide energy savings”, 2019.
- [9] RStudio, “RStudio | Open source & professional software for data science teams”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://rstudio.com/>. [Consultado: 25-mar-2020].
- [10] J. Amat, “Ejemplo práctico de regresión lineal simple, múltiple, polinomial e interacción entre predictores”, RPubS, 2016. [En línea]. Disponible en: [https://rpubs.com/Joaquin\\_AR/254575](https://rpubs.com/Joaquin_AR/254575). [Consultado: 25-mar-2020].
- [11] R. Castrillón y A. Gonzalez, Metodología Para la Planificación Energética a Partir de la Norma ISO 50001. Cali, 2018.
- [12] Analytics with R, “Linear Regression”. [En línea]. Disponible en: <http://analyticswithr.com/ols.html>. [Consultado: 25-mar-2020].
- [13] L. C. Siebert et al., “Energy efficiency indicators assessment tool for the industry sector”, 2014 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo. PES T D-LA 2014 - Conf. Proc., vol. 2014-Octob, núm. i, pp. 1–6, 2014.
- [14] W. Eichhammer y M. Wilhelm, “Industrial energy efficiency: Indicators for a European cross-country comparison of energy efficiency in the manufacturing industry”, Energy Policy, vol. 25, núm. 7, pp. 759–772, 1997.
- [15] D. Bosseboeuf, B. Chateau, y B. Lapillonne, “Cross-country comparison on energy efficiency indicators: the on-going European effort towards a common methodology”, Energy Policy, vol. 25, núm. 7, pp. 673–682, 1997.
- [16] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, I. R. Maestre, y J. F. Coronel, “Constructing HVAC energy efficiency indicators”, Energy Build., vol. 47, pp. 619–629, abr. 2012.
- [17] O. Alves, E. Monteiro, P. Brito, y P. Romano, “Measurement and classification of energy efficiency in HVAC systems”, Energy Build., vol. 130, pp. 408–419, oct. 2016.

- [18]M. G. Perroni, S. E. Gouvea da Costa, E. Pinheiro de Lima, W. Vieira da Silva, y U. Tortato, “Measuring energy performance: A process based approach”, *Appl. Energy*, vol. 222, núm. April, pp. 540–553, 2018.
- [19]M. Bourdeau, X. Guo, y E. Nefzaoui, “Buildings energy consumption generation gap: A post-occupancy assessment in a case study of three higher education buildings”, *Energy Build.*, vol. 159, pp. 600–611, 2018.
- [20]M. Khoshbakht, Z. Gou, y K. Dupre, “Energy use characteristics and benchmarking for higher education buildings”, *Energy Build.*, vol. 164, pp. 61–76, 2018.
- [21]E. A. Ocampo Batlle, J. C. Escobar Palacio, E. E. Silva Lora, A. M. Martinez Reyes, M. Melian, y M. B. Morejon, “A methodology to estimate baseline energy use and quantify savings in electrical energy consumption in higher education institution buildings: Case study, Federal University of Itajubá (UNIFEI)”, *J. Clean. Prod.*, núm. xxxx, p. 118551, 2019.
- [22]Ministerio de Fomento, Documento de bases para la actualización del Documento Básico DB-HE. España, 2016, p. 13.
- [23]UPME, “BALANCE ENERGETICO COLOMBIANO - BECO”. [En línea]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/BalanceEnergetico.aspx>. [Consultado: 07-may-2020].

## CONCLUSIONES

El desarrollo de esta tesis doctoral nos ha permitido establecer las siguientes conclusiones aplicadas al conjunto de edificios educativos superiores que compone un campus universitario.

1. Se ha realizado un estudio del estado del arte de la energética edificatoria existente en EU y especialmente en Colombia. En él se muestran los parámetros más relevantes que influyen en el comportamiento energético de un edificio, destacando el componente pasivo o arquitectónico y la componente activa cuyos responsables son las instalaciones HVAC e iluminación, así como los sistemas de energía renovables que integran el edificio. En este sentido, es importante para un país como Colombia avanzar en los lineamientos y políticas enfocadas a mejorar la eficiencia energética en las edificaciones. Se ha avanzado en el tema industrial y se tiene una política como el PROURE que, de cierta manera, propone lineamientos en todos los sectores y, en relación al tema de edificios centra su orientación con algunas resoluciones códigos y manuales de construcción para algunas ciudades donde se destaca Bogotá y Cali.

Se necesita avanzar hacia consolidar esquemas de certificación para los edificios, donde se puedan tener etiquetados de eficiencia como los maneja Europa, avanzar en la operación de edificios, donde cobra importancia el tema que nos atañe en esta tesis relacionado con la implementación de los sistemas de gestión y las herramientas y elementos que conduzcan a su correcta implementación en edificios.

Resulta importante el avance e implementación en el sector público como ejemplo, y aunque se han acuñado algunas acciones y actividades en el país, aun es importante avanzar en el tema de los diseños en los edificios nuevos. Esto en razón a que en el país se encuentran previstas gran número de construcciones, de almacenes de amplias superficies como centros comerciales, bodegas, así como las viviendas de interés social. Estas construcciones vienen siendo el resultado de la masificación de este sector, impulsado por parte de políticas del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio en los últimos gobiernos. Por esta razón resulta importante la etapa de diseño, donde se tengan en cuenta criterios de orientación, uso de materiales autóctonos de cada región y, en donde, prevalezca el uso e integración de las energías renovables.

Implementación de una gestión de la demanda propia para el edificio donde el usuario se hace participe en ella, con el uso de medición inteligente que día a día se hará de forma más masiva en el país pues es necesario fortalecer en vía de realizar una buena gestión de los edificios y mejoras en la Eficiencia Energética de las edificaciones tanto nuevas como existentes.

2. Se hace una recopilación de las herramientas de planificación energética que compone un sistema de gestión energética, describiendo su importancia y la relación con aspectos

normativos, haciendo una descripción de las herramientas y técnicas utilizadas para la elaboración del proceso de la revisión energética que provee una visión sobre cómo mejorar su desempeño en una organización. Es decir, optimizar los usos, los consumos y la eficiencia energética y aspectos representativos en lo que se refiere a los conceptos de líneas de base e indicadores energéticos y su aporte en el mejoramiento de la eficiencia energética en edificaciones.

3. Se presenta los soportes teóricos para desarrollar los 4 modelos propuestos por la norma ISO50006, norma de apoyo a la Iso50001, en lo concerniente a la estimación de líneas bases e de indicadores. Para lo anterior se propone el uso de los modelos basados en series de tiempos que utilizan solo la variable consumo y modelos de regresión univariable y multivariable, cuando existan recursos de medición de otros parámetros adicionales al consumo energético. De igual forma, se analiza el uso de la simulación dinámica de edificaciones que utiliza el motor de cálculo energy plus y se denomina Design Builder, como un recurso importante para establecer condiciones iniciales que permitan establecer líneas bases y plantear indicadores cuando se plantean diseños nuevos y cuando se cuente con recursos de información arquitectónica y monitorización en los existentes.

Cada uno de los modelos se sustenta tanto en la validación estadística como en su respectivo análisis de error. Lo anterior como elementos que permiten validar los resultados del pronóstico en las líneas bases y posterior uso de indicadores válidos para hacer seguimiento energético en las edificaciones y responder a los vacíos normativos en torno a los modelos matemáticos y estadísticos a utilizar en cada caso propuesto. Esto, como aporte a la aplicación de la norma, dado que la misma propone los modelos, pero no desarrolla ni las bases teóricas, ni métodos estadísticos, tampoco criterios para determinar si una línea base o un indicador son válidos para establecer una referencia de consumo y posteriormente un ahorro energético.

4. Se desarrolló una metodología para implementar la selección y aplicación de modelos para la estimación de líneas bases e indicadores energéticos en edificios. En la misma, se establecen criterios en cuanto a la selección de los límites y periodo de reporte de la información, la verificación de la fuente y calidad de los datos, así como la revisión de las variables relevantes de mayor afectación al consumo energético, el análisis muestral y los patrones de comportamiento de los datos. Lo anterior, para definir el modelo a usar siguiendo las respectivas validaciones estadísticas con apoyo del software R y, por último, el cálculo de las mejoras del rendimiento energético con fines de cuantificar ahorros energéticos y niveles de eficiencia.
5. Se analizó los efectos en la estimación de ahorros energéticos de los modelos propuestos para estimar la línea base e indicadores, exhibiendo que la selección de uno u otro implica la sobreestimación o subestimación en el pronóstico de consumo de energía que

afecta los valores de ahorros estimados en un análisis de eficiencia energética. En este sentido, los modelos de series de tiempo son modelos funcionales cuando no se tienen datos adicionales al consumo de energía y, resultan siendo modelos para empezar a hacer gestión del edificio mientras que, los modelos de regresión dan resultados más precisos a la operación del edificio, relacionado con las condiciones de tipo climatológico, ocupación horas de usos de los equipos de uso final entre otros más. En este sentido, en la tesis se aplican una variedad de pruebas estadísticas a los resultados de ahorro de energía y datos para revelar cuál modelo describe mejor y refleja la evolución del consumo de energía en la instalación y, contemplar si los porcentajes de mejora del rendimiento energético obtenidos tienen sentido en función de los patrones de operación de la instalación y los periodos seleccionados como reporte de la línea base.

6. Seleccionamos un campus universitario en Cali (Colombia) como caso de estudio experimental y de simulación, correspondiente a la UAO. Se presentan los datos experimentales de medida para el campus de la universidad a fin de determinar parámetros de eficacia energética y consumo de energía. Se seleccionó un edificio singular del campus UAO, el edificio aulario 4, en donde se realizó una monitorización de parámetros físicos que nos permitieron obtener los consumos energéticos, el impacto ambiental y los costes energéticos.
7. Mediante el modelo de simulación energética se obtienen 7 medidas de ahorro energético MAE's (separadas en medidas pasivas que afectan la arquitectura del edificio y en sistemas activos que afectan los equipos HVAC) para optimizar energéticamente el edificio. Además, se propone el uso de acumulación eléctrica mediante baterías combinada con el sistema renovable PV y así evitar la inyección a la Red y el mayor uso del sistema en horas nocturnas.
8. La tesis doctoral finaliza con el cálculo de los indicadores propuestos de intensidad energética, otro indicador de impacto medioambiental, gestión energética y finalmente dos indicadores como lo son EPnorenovable y ERR que nos indican el comportamiento del edificio hacia un edificio de consumo energético casi nulo nZEB. Elementos que resultan importantes en la evaluación de las edificaciones en Colombia.
9. Mediante el cálculo de todos los indicadores propuestos podemos obtener un análisis energético más detallado del edificio, siendo extrapolable a otras edificaciones similares que existen en Colombia con fines de contribuir en nuevas reglamentaciones del gobierno colombiano. Siendo un aporte significativo a lo establecido en la hoja de ruta sobre lineamientos de eficiencia energética en edificaciones en Latinoamérica elaborado por la IEA, en lo concerniente a Reducir la energía operativa y las emisiones a través de herramientas mejoradas de gestión de energía y creación de capacidad operativa de edificaciones existentes.

## TRABAJOS FUTUROS

Los nuevos trabajos futuros de I+D+i que pueden seguir realizándose en esta línea de investigación, serán:

1.- El desarrollo de herramientas propias de calificación energética y etiquetado en edificios, teniendo en cuenta las distintas tipologías de edificaciones para el fortalecimiento de los planes de transición energética en Colombia.

2.-Proponer una metodología propia para Colombia sobre el desarrollo de edificio de consumo energético casi nulo nZEB generando indicadores propios de medición como elemento de aporte a la descarbonización del sector que en nuestro país representa 20 % de la matriz energética.

3.-Desarrollar instrumentos que permitan la evaluación comparativa del rendimiento energético de un edificio, adecuando esquemas de divulgación para permitir la comparación e incentivar la mejora del rendimiento energético y fortalecer el acceso a incentivos tributarios en esta materia.

4.-Hacer extensiva la elaboración de manuales de construcción sostenibles en otras ciudades del país, esto en razón a las distintas condiciones climáticas y requerimientos propios de las regiones en cuanto a tipo y usos de las viviendas. Específicamente en la región pacífico donde se encuentra asentada la mayor parte de la población afro en el País.

5.-Continuar el análisis y modelamiento matemático - estadísticos de estimación y pronóstico de líneas bases e indicadores en gestión energética, incorporando técnicas de inteligencia artificial.

6.-Implementación de herramientas computacionales que permitan integrar la gestión energética de una edificación, incorporando validación estadística y simulación dinámica. De tal forma que permita evaluar distintos escenarios de ahorro y metas energéticas según la evolución de los esquemas de medición con los que pueda contar la edificación.

7.-Integrar a los análisis de gestión de demanda propuestos por las distintas empresas de suministro eléctrico, los modelos y herramientas metodológicas desarrolladas en esta investigación doctoral.

**ANEXOS:**  
**ARTÍCULOS PUBLICADOS**

# Analysis of the Methodology to Obtain Several Key Indicators Performance (KIP), by Energy Retrofitting of the Actual Building to the District Heating Fuelled by Biomass, Focusing on nZEB Goal: Case of Study

Rosaura Castrillón Mendoza <sup>1,2</sup>, Javier M. Rey Hernández <sup>2,3,\*</sup>, Eloy Velasco Gómez <sup>2</sup> ,  
Julio F. San José Alonso <sup>2</sup>  and Francisco J. Rey Martínez <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Energy and Mechanics, University Autónoma de Occidente Cali (UAO), Cali 760030, Colombia; rcastrillon@uao.edu.co

<sup>2</sup> Department of Energy and Fluid Mechanics, School of Engineering (EII), University of Valladolid (UVA), 47002 Valladolid, Spain; eloy@eii.uva.es (E.V.G.); julsan@eii.uva.es (J.F.S.J.A.); rey@eii.uva.es (F.J.R.M.)

<sup>3</sup> Higher Polytechnic College, European University Miguel de Cervantes (UEMC), 47012 Valladolid, Spain

\* Correspondence: javier.rey@uva.es; Tel.: +34-983-423-366

Received: 20 November 2018; Accepted: 21 December 2018; Published: 28 December 2018

**Abstract:** In order to achieve the objectives of the European 20/20/20 strategy, and to obtain a greater energy efficiency, integration of renewable energies and the reduction of carbon emissions, a District Heating (DH) system has been designed by the University of Valladolid (UVA), Spain, one of the most important DH fed by biomass fuel in Spain, supplying heating and domestic hot water (DHW) to 31 buildings in Valladolid, the majority of them, educational buildings on the University Campus. The aims of this paper were to study the change from an energy system fueled by natural gas to District Heating by biomass in a building on the campus of the University of Valladolid – the School of Engineering (EII) – studying its consumption from its connection to the District Heating system. An energy management methodology such as ISO 50001 is carried out, applied to efficiency systems in buildings, thus establishing new criteria of sustainability and economic value. In this paper, energy management will also be analyzed in accordance with the proposed tools of an Energy Management System (EMS) applied to the EII building, through the measurement of energy parameters, calculation of thermal consumption, thermal energy savings as a result of the change from system to District Heating by biomass, economic savings, reduction of environmental impact and indicators of thermal efficiency  $I_{100}$  and CUSUM indicator. Finally, the primary renewable and non-renewable energy efficiency indicators for the new District Heating system will be determined. The concept of the near Zero Energy Buildings is defined in the European Union (EU) in order to analyze an approach to an nZEB which results from replacing the natural gas heating system by a biomass District Heating system.

**Keywords:** district heating; biomass; energy management in renovated building; nZEB

---

## 1. Introduction

The spread of university campuses in recent years has led to a significant increase in energy consumption. The total amount of energy consumption includes lighting, DHW, heating or air conditioning systems in all campus buildings.

Due to the large amount of energy consumption in these buildings, a policy of promoting energy savings, energy management, supply of energy useful to the final energy consumption, perfectly planned at a local scale, can maintain a standard of energy consumed on campuses in a controlled

# PV Energy Performance in a Sustainable Campus

Rosaura Castrillón-Mendoza<sup>1,\*</sup> , Paul Andrés Manrique-Castillo<sup>2</sup> ,  
Javier M. Rey-Hernández<sup>3,\*</sup> , Francisco J. Rey-Martínez<sup>4</sup>  and Gabriel González-Palomino<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Energy and Mechanics, University Autónoma de Occidente, Cali 115-25, Colombia; ggonzalezp@uao.edu.co

<sup>2</sup> Ingeniería Sistemas Fotovoltaicos, Celsia Colombia SA ESP, Yumbo 760502, Colombia; pmanrique@celsia.com

<sup>3</sup> Higher Polytechnic College, European University Miguel de Cervantes (UEMC), 47012 Valladolid, Spain

<sup>4</sup> Department of Energy and Fluid Mechanics, School of Engineering (EII), University of Valladolid (UVa), 47002 Valladolid, Spain; rey@eii.uva.es

\* Correspondence: rcastrillon@uao.edu.co (R.C.-M.); jrey@uemc.es (J.M.R.-H.)

Received: 23 September 2020; Accepted: 4 November 2020; Published: 7 November 2020

**Abstract:** The challenge of photovoltaic integration as the basis of an energy generation system has been achieved and carried out by the University Autónoma de Cali, Colombia, using an avant-garde energy technology model. This innovative sustainable campus not only fulfills its purpose as an advanced model of a renewable energy integration system, it also aims at environmental research, e-mobility, and energy *efficiency*. This paper describes how the university implements the technological innovation of integrating the photovoltaic system installation in a university campus, showing its relevant contribution to the electricity generation in the campus buildings by analyzing the *different* electrical parameters together with the system performance indicators. The implementation of technological solutions has allowed the generation of a quantity of renewable energy within the campus, supplying a sustainable energy response based on energy *efficiency* and carbon emissions savings. This innovation has been applied following the international standards for the evaluation of the energy performance of photovoltaic systems (IEC 61724), reaching very optimal values for this type of renewable solution. In this paper, the dynamic monitoring of several parameters has been carried out in order to analyze the energy performance, and an energy simulation has been used to achieve optimal solutions and to obtain the perfect modeling of the system. This study shows how to evaluate the performance of an integration of a photovoltaic system in a smart university campus, according to international standards. It achieves complete viability due to its economic savings, energy *efficiency* and reduction of carbon emission.

**Keywords:** energy *efficiency*; smart campus; grid-connected photovoltaic systems; energy simulation; performance evaluation

---

## 1. Introduction

Environmental issues, energy independence, and the high costs of fossil fuels have motivated the use and development of renewable and sustainable energy technologies [1,2]. The EU aims to achieve a 20% share of renewable energy sources in final energy consumption by the end of 2020 [1]. Grid-connected photovoltaic systems have become the best alternative for renewable energy on both a small and large scale [3]. One of the most challenging implementations of photovoltaic systems is their integration into buildings. In 2018, according to REN21 [4], the worldwide photovoltaic (PV) system market achieved 505 GW of total power around the world. Similarly, the deployment of PV roofs aimed at generation has increased significantly in recent years, and it is expected that backup systems will also do the same. According to the International Energy Agency, in 2018 the added capacity of

# Industrial Decarbonization by A New Energy-Baseline Methodology—Case Study

Rosaura Castrillón-Mendoza <sup>1,\*</sup>, Javier M. Rey-Hernández <sup>2</sup> and Francisco J. Rey-Martínez <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Energy and Mechanics, University Autónoma de Occidente Cali (UAO), Cali 115-85, Colombia

<sup>2</sup> Higher Polytechnic College, European University Miguel de Cervantes (UEMC), Valladolid 47012, Spain; jrey@uemc.es

<sup>3</sup> Department of Energy and Fluid Mechanics, School of Engineering (EII), University of Valladolid (UVa), Valladolid 47002, Spain; rey@eii.uva.es

\* Correspondence: rcastrillon@uao.edu.co

Received: 21 January 2020; Accepted: 02 March 2020; Published: 4 March 2020

**Abstract:** The main target of climate change policies in the majority of industrialized countries is to reduce energy consumption in their facilities, which would reduce the carbon emissions that are generated. Through this idea, energy management plans are developed, energy reduction targets are established, and energy-efficient technologies are applied to achieve high energy savings, which are environmentally compatible. In order to evaluate the impact of their operations and investments, companies promote measures of performance in their energy management plans. An integral part of measuring energy performance is the establishment of energy baselines applicable to the complete facility that provide a basis for evaluating energy efficiency improvements and incorporating energy performance indicators. The implementation of energy management systems in accordance with the requirements of ISO Standard 50001 is a contribution to the aim and strategies for improving cleaner production in industries. This involves an option for the industry to establish energy benchmarks to evaluate performance, predict energy consumption, and align production with the lowest possible consumption of primary and secondary forms of energy. Ultimately, this goal should lead to the manufacturing of cleaner products that are environmentally friendly, energy efficient, and are in accordance with the global environmental targets of cleaner manufacturing. This paper discusses an alternative for establishing energy baselines for the industrial sector in which several products are produced from a single raw material, and we determined the energy consumption of each product and its impact on the overall efficiency of the industry at the same time. The method is applied to the plastic injection process and the result is an energy baseline (EBL) in accordance with the requirements of ISO 50001, which serves as a reference for determining energy savings. The EBL facilitates a reduction in energy consumption and greenhouse gas emissions in sectors such as plastics, a sector which accounts for 15% of Colombia's manufacturing GDP.

**Keywords:** energy efficiency; sustainable consumption; ISO standards 50001; standardization;

---

## 1. Introduction

The growth of industrial activity since 2000 in the countries which are members of the International Energy Agency (IEA) and other major economies, has led to increases in energy use. For 2017, the annual increase in global energy use was estimated to be roughly 2%. However, energy efficiency has prevented further increases in consumption due to efficiency improvements in the industry and service sectors [1–3]. The growth in energy consumption has been largely driven by a