



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ESTUDIO EXERGÉTICO DE LA  
PLANTA FÍSICA DE LA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
(CASO EDIFICIO 4)**

**Autores:**

Luis Rodolfo Lavino Lugo C.I.: 27.942.352

Jesús Javier Beltrán Moreno C.I.: 27.644.731



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ESTUDIO EXERGÉTICO DE LA PLANTA FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD  
JOSÉ ANTONIO PÁEZ (CASO EDIFICIO 4)**

Proyecto del trabajo de grado para optar al título de  
**INGENIERO MECÁNICO**

**Autores:** Luis Rodolfo Lavino Lugo C.I.: 27.942.352

Jesús Javier Beltrán Moreno C.I.: 27.644.731

**Tutor:** Prof.(a) Alicia de Pizzella

San Diego, Febrero 2023



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
COORDINACIÓN DE PASANTÍA Y TRABAJO DE GRADO

ACTA DE APROBACIÓN

INFORME FINAL DE PASANTÍA

TRABAJO DE GRADO

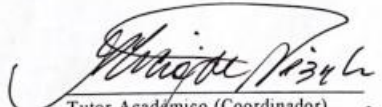
El jurado designado por la Facultad de Ingeniería para la evaluación del Informe Final de Pasantía o Trabajo de Grado titulado: Estudio energético de la planta fabrica de los Cuernavaca José Antonio Páez (caso edificio 4)


Realizado por el (la) Br. Jesus Beltran  
C.I. N° 77644731 cursante de la carrera de Ingeniería Petrolera  
hace constar después de analizar su contenido y oída la exposición oral, considera que el Informe Final o Trabajo de Grado ha obtenido la calificación de:

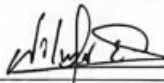
APROBADO

NO APROBADO

El Jurado

  
Tutor Académico (Coordinador)  
Nombre: Alvaro Alvarado  
C.I.: 4778800

  
Jurado  
Nombre: Wilson Espinoza  
C.I.: 9885895

  
Jurado  
Nombre: Wilmar Sando  
C.I.: 7130496

Fecha 27/02/2023





UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
COORDINACIÓN DE PASANTÍA Y TRABAJO DE GRADO

ACTA DE APROBACIÓN

INFORME FINAL DE PASANTÍA

TRABAJO DE GRADO

El jurado designado por la Facultad de \_\_\_\_\_ para la  
evaluación del Informe Final de Pasantía o Trabajo de Grado titulado:

Estudio Exigético de la Planta física  
de la Universidad José Antonio Páez  
(Caso edificios 4)

Realizado por el (la) Br. Juan Lavino

C.I. N° 27942352 cursante de la carrera de Ingeniería Mecánica

hace constar después de analizar su contenido y oída la exposición oral,  
considera que el Informe Final o Trabajo de Grado ha obtenido la calificación de:

APROBADO  NO APROBADO

El Jurado

[Signature]  
Tutor Académico (Coordinador)  
Nombre: Alfredo de la Cruz  
C.I.: 4598880

[Signature]  
Jurado  
Nombre: Wiston Espinoza  
C.I.: 9895895

[Signature]  
Jurado  
Nombre: Wilmar Sans  
C.I.: 7130491

Fecha 27/02/2023



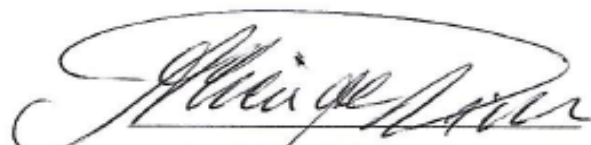


**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**CONSTANCIA DE APROBACIÓN PARA LA PRESENTACIÓN PÚBLICA DEL  
TRABAJO DE GRADO**

Quien suscribe, **ALICIA DE PIZZELLA**, portador de la cédula de identidad N° 4.598.880, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos **Luis Rodolfo Lavino Lugo C.I.: 27.942.352** y **Jesús Javier Beltrán Moreno C.I.: 27.644.731**, titulado **ESTUDIO EXERGÉTICO DE LA PLANTA FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ (CASO EDIFICIO 4)**, presentado como requisito parcial para optar al título de **INGENIERO MECÁNICO**, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 15 días del mes de febrero del año dos mil veintitrés.



Prof.(a). Alicia de Pizzella  
C.I.: 4.598.880



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA

FI N 002 2022-2CR TG

Valencia, 18 de enero de 2023

Ciudadanos:

BELTRAN MORENO, JESUS JAVIER

27.664.731

LAVINO LUGO, LUIS RODOLFO

27.942.352

Presente -

Cumplo con informarles que la comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 11-2022 de fecha 16/09/2022 aprobó el proyecto de grado titulado:

**Estudio exergético de la planta física de la Universidad José Antonio Páez. (Caso edificio 4)**

Presentado por ustedes como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Tutor Académico que lo asesorará en el desarrollo de este proyecto a:  
Ing. Alicia Teresa Yánez de Pizzella, titular de la cédula de identidad V-4.598.880

Atentamente

**Dra. Laura Aurora Sáenz Palencia**  
Decana de la Facultad de Ingeniería



c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado de la Facultad de Ingeniería

## RECONOCIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por permitirme llegar hasta aquí, por darme la paciencia, sabiduría, salud y fortaleza que fueron necesarias para cumplir con todos mis objetivos. A mi madre, Miloa Lugo por todos sus sacrificios hechos para darme lo mejor desde que tengo uso de razón, por brindarme tanto cariño y amor, gracias por tu amor incondicional del que tanto me has llenado, también gracias por todos tus consejos, por haberme guiado siempre por el camino del bien y alejarme de las malas cosas, y aparte de ser mi madre te has convertido en una amiga, nunca me alcanzara la vida para agradecerte todo.

A mi padre, José Lavino que mas que un padre he encontrado un gran amigo a lo largo del tiempo, me has enseñado poco a poco a como ser un hombre de fe y de palabra, que me has enseñado a nunca rendirme y ser firme en mis decisiones, gracias por todo, también gracias por depositar tu confianza en mí, no te defraudare.

A mi hermano, Antonio Lavino te dedico mi esfuerzo con mucho cariño, que tengas presente que jamás te debes rendir para alcanzar un sueño, eres capaz de todo lo que te propongas, siempre podrás contar conmigo.

A mi novia, Marbella Maldonado, que con mucha paciencia y mucho amor me has dado consejos de nunca rendirme, gracias por estar a mi lado y serme de apoyo en esos días que lo he necesitado, gracias por todo tu amor verdadero que me has demostrado y por todo este tiempo, como me dijiste, ¡lo logramos juntos!

A mis abuelos, Rafael Lugo y Carmen Blanco, que siempre me han dado ese apoyo, buenos deseos y palabras de aliento para no rendirme, gracias por estar orgullosos de mí.

A mis Abuelos, Antonio Lavino y Olga Mavares y a mi primo Alfredo Lugo, que sé que donde quiera que estén, están orgullosos de mí que me ayudan y me cuidan.

A toda mi familia, que me apoyaron desde el comienzo de mis estudios, que de una u otra manera me ayudaron a poder cumplir con esta meta.

Agradezco a todas las personas que me encontré en este camino, que me dejaron grandes amistades y recuerdos.

A mi escuela de mecánica, donde conocí a varios ejemplos a seguir, que aparte de darme clases, compartieron conmigo sus historias y experiencias, que me brindaron apoyo y consejos muy útiles. Hoy, culmino esta etapa y me abro camino a un sueño ¡lo logre!

Luis Lavino

## DEDICATORIA

En primer lugar le dedicó este logro a Dios que gracias a él es que he podido lograr todos mis sueños y mis metas.

A mis padres, por su amor incondicional y por creer en mí desde el primer día. Por sus sacrificios y su apoyo constante que han sido la clave de mi éxito. A mis abuelos que siempre han sido un incentivo y un impulso para sacar mi carrera adelante.

A mis profesores por su dedicación y pasión por la enseñanza y por guiarme en mi camino.

Jesús Beltrán



|     |  |    |
|-----|--|----|
|     | 2.2.5 Energías alternativas .....  | 20 |
|     | 2.2.5.1 Ventajas de las energías alternativas .....                      | 21 |
|     | 2.2.5.2 Desventajas de las fuentes alternativas de<br>energía.....       | 22 |
|     | 2.2.6 Generación de potencia eolica .....                                | 23 |
|     | 2.2.6.1 Aerogenerador.....   | 23 |
|     | 2.2.6.2 Perfil normal del viento.....                                    | 24 |
|     | 2.2.6.3 Función de distribución de Weibull.....                          | 25 |
|     | 2.2.7 Generación de potencia fotovoltaica.....                           | 26 |
|     | 2.2.7.1 Radiación solar.....   | 27 |
|     | 2.2.7.2 Energía solar.....   | 29 |
|     | 2.2.7.3 Clasificación de las instalaciones solares<br>fotovoltaicas..... | 30 |
|     | 2.2.7.4 Elementos de una instalación solar fotovoltaica.....             | 33 |
|     | 2.2.7.5 Parámetros fundamentales de una celda fotovoltaica...            | 34 |
|     | 2.2.7.6 Conectividad de celdas solares.....                              | 35 |
|     | 2.2.7.7 Panel solar.....   | 36 |
|     | 2.2.7.8 Características eléctricas de los paneles solares.....           | 36 |
|     | 2.2.8 Fundamentos de termoeconomía.....                                  | 37 |
| III | MARCO METODOLÓGICO .....   | 40 |
|     | 3.1 Tipo de investigación.....   | 40 |
|     | 3.2 Diseño de investigación.....   | 40 |
|     | 3.3 Nivel de la investigación.....                                       | 41 |
|     | 3.4 Poblacion y muestra.....   | 41 |
|     | 3.5 Tecnicas e instrumentos de recolecion de datos.....                  | 41 |
|     | 3.6 Fases metodológicas.....   | 42 |
|     | 3.7 Tecnicas de análisis de datos.....                                   | 43 |
| IV  | RESULTADOS .....   | 44 |

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Evaluación de las condiciones de operatividad energética de la planta física (caso edificio 4) de la Universidad José Antonio Páez (UJAP)..... | 44 |
| 4.2.1 Análisis del diseño.....   | 44 |
| 4.2.2 Mediciones del consumo eléctrico.....  | 45 |
| 4.2.3 Diagnóstico del consumo eléctrico.....   | 54 |
| 4.2.4 Modelado del consumo.....  | 56 |
| 4.3 Proposición de alternativas de generación de energía para satisfacer la demanda de la planta física (caso edificio 4) de la UJAP.....          | 60 |
| 4.3.1 Propuesta de generación de potencia eólica.....  | 60 |
| 4.3.2 Propuesta de generación de potencia fotovoltaica.....  | 65 |
| 4.3.2.1 Cálculos preliminares.....   | 65 |
| 4.3.2.2 Energía a generar.....   | 66 |
| 4.3.2.3 Generación fotovoltaica por subsistemas.....   | 68 |
| 4.4 Elaboración de un estudio termo-económico de las alternativas de generación.....   | 69 |
| 4.4.1 Análisis termoeconómico del sistema de generación eólico.....  | 69 |
| 4.4.1.1 Costos asociados a la instalación del sistema de generación eólico.....  | 70 |
| 4.4.1.2 Costos de operación, mantenimiento y administración fijos del sistema de generación eólico.....  | 71 |
| 4.4.1.3 Costos relativos al consumo de energía eléctrica en la planta física.....  | 72 |
| 4.4.1.4 Flujo termo-económico del sistema de generación de energía eólico.....   | 73 |
| 4.4.2 Análisis termoeconómico de sistema de generación fotovoltaico.....   | 73 |
| 4.4.2.1 Costos asociados a la instalación del sistema de generación fotovoltaico.....  | 74 |

|  |    |
|--|----|
| 4.4.2.2 Costos de operación, mantenimiento y administración<br>fijos del sistema de generación fotovolta.....  | 75 |
| 4.4.2.3 Flujo termo-económica del sistema de generación de<br>energía fotovoltaico .....   | 77 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....  | 77 |
| BIBLIOGRAFÍA.....  | 79 |
| ANEXOS.....  | 81 |
| Anexo A: Modelo AW500-47 del fabricante estadounidense Aeronautic<br>Wind Power.....   | 82 |
| Anexo B: Instrumento: dirigida a los usuarios, personal de ambiente y<br>mantenimiento de la planta física de la universidad José Antonio Páez<br>(edificio 4).....              | 84 |
| Anexo C: Resultados de la encuesta dirigida a los usuarios, personal de<br>ambiente y mantenimiento de la planta física de la universidad José<br>Antonio Páez (edificio 4)..... | 85 |
| Anexo D: Matriz FODA aplicada al sistema de generación de energía<br>del edificio 4 de la Universidad José Antonio Páez.....   | 86 |
| Anexo E: especificaciones técnicas de banco de baterías de ión – litio<br>the Intensium® Max 20 high energy de la empresa Norwatt.....   | 87 |
| Anexo F: Diagrama de instalación de un aerogenerador eólico.....   | 89 |
| Anexo G: Esquema típico para la instalación de una planta de generación<br>fotovoltaica.....   | 90 |

## LISTA DE GRÁFICOS Y FIGURAS

| GRÁFICO<br>FIGURA | CONTENIDO   | pp. |
|-------------------|---|-----|
| 1                 | La exergía de una masa específica.....  | 15  |
| 2                 | Aerogenerador de paletas horizontales.....  | 23  |
| 3                 | Aerogenerador de paletas horizontales.....  | 25  |
| 4                 | Balance de radiación solar.....   | 27  |
| 5                 | Posiciones del sol a lo largo del año.....  | 27  |
| 6                 | Complejo Copper Mountain Solar. Nevada. EEUU.....                                   | 31  |
| 7                 | Edificio fotovoltaico.....  | 32  |
| 8                 | Elementos de una instalación fotovoltaica básica.....                               | 33  |
| 9                 | Componentes de una celda fotovoltaica.....  | 33  |
| 10                | Características de un panel solar.....  | 35  |
| 11                | Características de un panel solar.....  | 36  |
| 12                | Sistema Interconectado Nacional (SIN).....  | 45  |
| 13                | Medición en el transformador de 750 kVA (fachada sur del edificio).....             | 45  |
| 14                | Medición en el transformador de 1000 kVA (fachada sur del edificio 4).....          | 46  |
| 15                | Temperatura y condiciones ambientales del día jueves 08 de Diciembre<br>de2022..... | 46  |
| 16                | Tablero principal del edificio 4.....   | 47  |
| 17                | Sistema de agua helada (chillers).....  | 48  |
| 18                | Compresor schulz SRP 3020 y medición de consumo.....                                | 50  |
| 19                | Unidades generadoras de aire comprimido.....  | 50  |
| 20                | Datos de placa de las unidades chillers.....  | 51  |
| 21                | Consumo de los chillers y bomba de condensado de 40 hp.....                         | 51  |
| 22                | Sala de máquina de ascensores y tablero eléctrico.....                              | 52  |
| 23                | Bombas IHM-Siemens de 10 hp y su tablero de control.....                            | 53  |
| 24                | Ubicación del edificio 4 en el Valle de San Diego y dirección del viento....        | 60  |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 25 | Potencia en MW contra la velocidad del viento en m/s a la altura del cubo (hub) para el modelo AW500-47.....                                      | 62 |
| 26 | Datos técnicos básicos del aerogenerador para el modelo AW500-47.....   | 62 |
| 27 | Rango de potencias según la distribución de Weibull para el modelo AW500-47.....  | 63 |
| 28 | Irradiancia solar horizontal y HSP del municipio San Diego, Carabobo. Venezuela.....  | 66 |
| 29 | Panel solar modelo Trina solar modelo Vertex N (670W).....  | 66 |
| 30 | Áreas opcionales para la ubicación de los paneles fotovoltaicos.....  | 68 |
| 31 | LCOE promedio ponderado global de tecnologías de energía solar y eólica a escala de servicios públicos recién puestas en servicio, 2019-2020..... | 73 |

## LISTA DE CUADROS O TABLAS

| CUADRO<br>TABLAS | CONTENIDO  | pp. |
|------------------|--|-----|
| 1                | Intensidad de corriente y voltaje en los transformadores de 750 kVA y 1000kVA..... | 47  |
| 2                | Medición en tablero principal del edificio 4 – UJAP.....                           | 48  |
| 3                | Medición en sala de compresores del edificio 4 – UJAP.....                         | 49  |
| 4                | Medición en chillers del edificio 4 – UJAP.....                                    | 49  |
| 5                | Especificaciones técnicas del compresor SRP 3020 del edificio 4 – UJAP.....        | 49  |
| 6                | Especificaciones técnicas de los ascensores del edificio 4 – UJAP....              | 52  |
| 7                | Medición en ascensores del edificio 4 – UJAP.....                                  | 52  |
| 8                | Medición en bombas centrífugas del edificio 4 – UJAP.....                          | 53  |
| 9                | Inventario de luminarias y tomacorrientes instalados en el edificio 4.             | 57  |
| 10               | Factores de potencia.....  | 58  |
| 11               | Consumo de energía en kVA del edificio 4 – UJAP durante el proceso e medición..... | 58  |
| 12               | Consumo de energía en kVA del edificio 4 con todas las lámparas encendidas.....    | 58  |
| 13               | Consumo de energía en kWh/año del edificio 4 – UJAP.....                           | 59  |
| 14               | Parametro $\alpha$ sobre la rugosidad del terreno.....                             | 61  |
| 15               | Demanda de energía total del edificio 4 – UJAP.....                                | 63  |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 16 | Pérdidas de energía en términos de la eficiencia en instalaciones fotovoltaicas.....                    | 65 |
| 17 | Número de paneles solares Vertex N (670W) por subsistema del edificio 4.....                            | 67 |
| 18 | Área de ocupación por los paneles fotovoltaicos por subsistema del edificio 4.....                      | 68 |
| 19 | Inversión inicial para el proyecto de generación de energía eólica.....                                 | 70 |
| 20 | Costo del personal mínimo para la operación del sistema de generación de energía eólica.....            | 71 |
| 21 | Costo de mantenimiento del sistema de generación de energía eólica.....                                 | 71 |
| 22 | Precio de la corriente eléctrica en Venezuela (Junio 2022).....   | 72 |
| 23 | Inversión inicial para el proyecto de generación de energía fotovoltaica.....                           | 75 |
| 24 | Porcentaje por ítem de la inversión inicial para el proyecto de generación de energía fotovoltaica..... | 75 |
| 25 | Costos operacionales del personal para el proyecto de generación de energía fotovoltaica.....           | 76 |
| 26 | Costos de mantenimiento anual para el proyecto de generación de energía fotovoltaica.....               | 76 |
| 27 | Parámetros termoeconómicos de los subsistemas de generación fotovoltaica.....                           | 76 |



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

## ESTUDIO EXERGÉTICO DE LA PLANTA FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ (CASO EDIFICIO 4)

**Autores:** Luis Rodolfo Lavino Lugo C.I.: 27.942.352

Jesús Javier Beltrán Moreno C.I.: 27.644.731

**Tutor:** Prof(a) Alicia de Pizzella

**Fecha:** Febrero 2023

### RESUMEN INFORMATIVO

El presente trabajo consiste en el estudio de alternativas de generación de energía para la planta física de la Universidad José Antonio Páez específicamente del edificio 4, donde valiéndose de las herramientas de adquisición y procesamiento de datos, se captaron los valores de las tensiones e intensidades de corriente eléctricas de los equipos y sistemas de abastecimiento de energía, luminarias, aires acondicionados, suministro de agua, aire comprimido y red eléctrica de la planta, para la evaluación del sistema actual, realizándose un balance del consumo del sistema y se propusieron alternativas para proveer al edificio de energía eléctrica. La investigación fué del tipo proyecto factible, su diseño se concibió del tipo de campo ya que en esta se obtuvieron y analizaron los datos provenientes de mediciones directas e indirectas de las variables requeridas para calcular el consumo energético de la planta física y con un nivel de conocimiento descriptivo, valiéndose de la localización y consolidación de datos mesurables, por esa razón pertenece a la línea de investigación de Ciencias Cognitivas y Aplicadas y se determinó que el edificio 4 consume más energía para mantener equipos y luminarias, que para la operación de la sala de generación de aire comprimido, el sistema de agua helada, los ascensores y las bombas centrífugas, sin embargo se demostró la factibilidad del uso de generación de potencia eólica para suplir los consumos energéticos del edificio 4, más no es termoeconómicamente rentable la generación de energía fotovoltaica para el mismo fin.

**Descriptor:** eficiencia, balance de energía, consumo energético, potencia, termo-economía.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad las necesidades energéticas globales van en aumento producto de una mayor demanda y la utilización de fuentes de energía no renovables siguen llevando a la emisión de gases de efecto invernadero cada vez mayores. No se trata de un discurso rayado, sino de la inadecuada adaptación de equipos, máquinas y sistemas térmicos que trabajan con un alto costo de energía debido a las pérdidas, falta de mantenimiento y actualización o adecuación a las políticas mundiales del control de emisiones. Ante este problema energético surgen múltiples soluciones que, principalmente, van por dos vías: bien, la mejora de las tecnologías convencionales y no renovables para mejorar su eficiencia, o bien, el uso de nuevas tecnologías, alternativas y renovables.

La República Bolivariana de Venezuela no escapa a tales problemas y más si se cuenta con pocas fuentes de generación de energía limpia, por ello existe la necesidad de realizar modificaciones en las tecnologías existentes y/o planteamientos de nuevos sistemas, abordada desde un punto de vista termodinámico y su consecuencia en el componente económico y ambiental. El comportamiento termodinámico de un sistema puede evaluarse de manera eficaz a través de la definición de exergía y de su consecuente aplicación a través del análisis exergético, pudiéndose aplicar a procesos, plantas industriales, edificaciones y equipos.

La Universidad José Antonio Páez con sede en San Diego estado Carabobo posee una planta física que consiste en cinco edificaciones que cuentan con ascensores, sistemas de aires acondicionados, sistemas de bombeo de agua, generación de aire comprimido, riego e iluminación interna y externa que conlleva a un consumo de energía principalmente suministrada por el sistema eléctrico nacional, también posee dos plantas eléctricas diésel y diésel/gas que satisfacen parcialmente la demanda energética en caso de falla en la alimentación del flujo eléctrico.

Un análisis exergético permite identificar los componentes o equipos del sistema con las mayores ineficiencias termodinámicas, localizarlas, cuantificarlas y conocer las fuentes y factores que las causan, con esta información, que no puede obtenerse con otro tipo de análisis energético, se puede mejorar la eficiencia global de un sistema. El trabajo consta de los siguientes capítulos:

**Capítulo I:** Explica todo lo relacionado al planteamiento y formulación del problema, además de los objetivos a alcanzar en este proyecto, así como también las limitaciones que se presentan al momento de solucionar el problema.

**Capítulo II:** Se refiere a toda la terminología y conceptos necesarios que servirán de base para el desarrollo del estudio, además de un breve resumen sobre los antecedentes relacionados con la investigación.

**Capítulo III:** Consta de las distintas fases metodológicas a emplear en el desarrollo de las estrategias, que son establecidas para cumplir con los objetivos propuestos.

**Capítulo IV:** Detalla los resultados obtenidos y su respectiva interpretación y análisis.

El trabajo aquí presentado, está estructurado de tal manera que el lector pueda ir adquiriendo los conocimientos básicos que le permitirán entender a cabalidad la tecnología referida y las herramientas a usar. Sin embargo, cabe destacar que si el lector es lo suficientemente conocedor del tema, perfectamente puede obviar los capítulos que contengan información que considere ya conocida, y continuar con los aspectos que crea interesantes sin que se pierda la linealidad o coherencia de la información que se desea mostrar.

# **CAPÍTULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1 Planteamiento del problema**

La Universidad José José Antonio Páez está ubicada en el municipio San Diego del estado Carabobo, y como toda edificación propia, necesita de una fuente de energía eléctrica para llevar a cabo las operaciones rutinarias referentes a la propia actividad educativa, y justamente en el edificio 4 de esta casa de estudios se encuentra la Facultad de Odontología con una población estudiantil de aproximadamente 1500 personas que necesitan de el correcto funcionamiento del edificio. Desde su apertura en el campus de San Diego la universidad ha dependido de un proveedor externo de energía eléctrica, inicialmente Elevel y ahora la corporación eléctrica nacional Corpoelec, quien a través del sistema interconectado nacional proporciona la energía eléctrica. En el edificio 4 también funcionan un centro asistencial de salud primaria, aulas/clínicas usadas por los estudiantes de odontología, laboratorios odontológicos, centros de impresión y fotocopiado, laboratorios de computación, robótica, automatización y controles, así como también, aulas estándar, oficinas y algunos decanatos de pregrado y postgrado. La situación que atraviesa el sector eléctrico nacional no es indiferente en la operatividad de la planta física de la universidad y continuas irregularidades en el suministro de energía eléctrica, produce en algunos casos catastróficos resultados en las operaciones del edificio 4, continuas caídas de tensión, fluctuaciones en el voltaje y variaciones en el consumo eléctrico, generando pérdidas de prácticas de laboratorio, tratamientos odontológicos de pacientes, demoras en la operación de los servicios médicos y hasta la suspensión de actividades académicas por la falta de electricidad. En los últimos años la eficiencia educativa se ha visto mermada debido a la carencia de un servicio de energía confiable y este fenómeno se ve reflejado en la eliminación del turno nocturno en la Universidad José Antonio Páez, ya que no se cuentan con los recursos externos de energía fiable. Por otra parte, estas fluctuaciones energéticas deterioran los sistemas independientes de generación de aire comprimido para las aulas/clínicas y el servicio de aire acondicionado del edificio, inclusive la interrupción del servicio eléctrico ha llevado a la ocurrencia de accidentes en los ascensores donde personas quedan encerradas en los mismos. Ni hablar del sufrimiento de pacientes adultos y niño que deben pasar todo el día esperando que regrese el servicio de electricidad y así poder realizar las evaluaciones médicas para su tratamiento. Ante lo expuesto, existe la necesidad de tener una alternativa viable y segura para el suministro de energía para la planta física de la universidad,

pero es necesario realizar un estudio para adecuarla a las necesidades de operación y realidades del país.

Desde la existencia de los ciclos de generación de potencia hasta la actualidad, se plantea una interrogante acerca del valor máximo que podría tener la eficiencia energética y termodinámica de estos ciclos, así como también la mejora y el máximo beneficio que puede traer, optimizando los parámetros de operación de cada componente, determinando la estructura más conveniente y evaluando los costos totales de funcionamiento para obtener la mejor relación costo – efectividad, a esto se le llama exergía.

Son corrientes que han llevado a la aplicación de conceptos asociados a la segunda ley de la termodinámica, o el aprovechamiento máximo de la energía disponible en una fuente o proceso. Lo interesante es que dicho concepto ha llevado al desarrollo y puesta en práctica de nuevas ramas de la termodinámica como es el caso de la termo-economía y en cuya base se ha elaborado investigaciones y aplicaciones en países donde la principal fuente de energía es el uso de combustibles derivados del petróleo con costos de producción y/o adquisición elevados.

En Venezuela, a pesar de ser un país productor de petróleo y que existen fuentes de generación de energías termoeléctricas e hidroeléctricas, igualmente se requiere de estudios que permitan un aprovechamiento eficiente de estos recursos en los niveles industrial, doméstico e institucional.

En este sentido realizar un estudio sobre el consumo de energía y la manera de como maximizar su aprovechamiento en la planta física de la universidad José Antonio Páez, representaría un aporte significativo para el futuro de la institución y asentaría las bases para una investigación más amplia bajo los lineamientos de la termo-economía.

## **1.2 Formulación del problema**

¿Cómo se podría mejorar la eficiencia energética de la planta física de la Universidad José Antonio Páez (caso edificio 4) luego de realizado un análisis exergético del mismo?

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 Objetivo general**

Realizar un estudio exergético de la planta física de la Universidad José Antonio Páez (caso edificio 4)

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Evaluar las condiciones de operatividad energética de la planta física (caso edificio 4) de la Universidad José Antonio Páez (UJAP)

- Proponer alternativas de generación de energía para satisfacer la demanda de la planta física (caso edificio 4) de la UJAP.
- Realizar un análisis termo-económico de las alternativas de generación de energía propuestas.

#### **1.4 Justificación**

Toda institución o empresa que procure ser competitiva, debe actuar en función de mejorar la eficiencia y calidad de todos los procesos que justifiquen su existencia y las mejoras en la planta física representan un paso obligatorio para tal fin. Por ello son muchas las acciones que se pueden tomar; inversión en nuevos equipos, estudios de ahorro de energía, mejoras continuas de los recursos humanos, por nombrar algunos.

En la actualidad, un gran número de empresas presentan dificultades a la hora de adquirir equipos de mejor tecnología, por lo que las políticas y estudios de mejoramiento de la eficiencia de los sistemas están cobrando un gran valor, ya que si se habla de sustentabilidad, la energía es de vital importancia para su buen desempeño.

Un estudio exergético en la planta física de la Universidad José Antonio Páez permitiría conocer los posibles cambios a realizar en la estructura energética actual para así poder aumentar la eficiencia de la misma y a su vez, disminuir los costos asociados al consumo energético.

#### **1.5 Limitaciones**

- Falta de información por parte de la Universidad, en lo que respecta a algunas condiciones de trabajo y operación de la planta física.
- La no disponibilidad de especialistas encargados de aportar la data necesaria para llevar a cabo el proyecto.
- El acceso denegado a las instalaciones de la empresa, debido a posibles problemas internos presentados en la misma.

#### **1.6 Alcance**

Con el siguiente trabajo especial de grado se pretende desarrollar los siguientes tópicos:

- Desarrollar una metodología de investigación para el estudio exergético de la planta física de una institución universitaria.
- Obtener la data necesaria para la caracterización del consumo energético del edificio 4 de la planta física de la Universidad José Antonio Páez.
- Aplicar las teorías exergéticas de la termodinámica de procesos de generación de potencia.



## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

Según Arias (2006), el marco teórico en términos generales, representa la “explicación” teórica para comprender la naturaleza del hecho investigado, o lo que es lo mismo, sustentar teóricamente el estudio. Constituye un aspecto de mucha importancia dentro de la investigación, donde el investigador crea un espacio en el que se apoya para comprender las situaciones del problema, como solucionarla y describir con bases teóricas el problema presente.

Es un espacio donde se contemplan también conclusiones de otras investigaciones realizadas, por otros autores, que se han interesado en aportar conocimientos de sus investigaciones, vinculadas directa o indirectamente con el problema de esta investigación.

#### **2.1 Antecedentes de la investigación**

Los estudios de exergía están cada vez cobrando mayor importancia, de allí la razón de muchas investigaciones realizadas por autores en este ámbito:

Abreu Jesús (2021), en su trabajo de grado titulado “**Propuesta de mejora al sistema de gestión de mantenimiento de los activos de la planta física de la UCAB Extensión Guayana**” presentado como requisito para obtener el título de ingeniero industrial en la Universidad Católica Andrés Bello, donde se elabora una propuesta que permite capacitar al personal de mantenimiento de las instalaciones electromecánicas, así como también, en la estandarización de los procesos de operación y control de servicios, para contribuir al funcionamiento de las instalaciones y mantenerlas operativas. De esta manera se logró un mejor cuidado de los equipos, un mayor rendimiento y un menor consumo de energía eléctrica, evitándose así las recurrentes pérdidas por mantenimiento correctivos otorgándole un mejor retorno a la institución.

Éste antecedente incorpora una metodología para el mejoramiento de los sistemas electromecánicos basada en la norma ISO 55000 viable para ser aplicada en edificaciones educativas como la Universidad José Antonio Páez (caso edificio 4).

Además, Chirinos Patricia, Flores Jorge y Martínez Adrián (2018), realizaron su trabajo especial de grado titulado “**Sistema de generación de energía a través de una turbina hidrogeneradora como alternativa para el ahorro energético en el municipio Machiques de Perijá del Estado Zulia**” en la facultad de ingeniería de la Universidad privada Dr. Rafael Beloso Chacín y donde se desarrolló el diseño de una turbina hidrogeneradora para satisfacer la demanda energética del municipio basado en el consumo de energía eléctrica. Se utilizaron datos de la

empresa CORPOELEC e HIDROLAGO para el desarrollo conceptual del sistema de generación, así como también para la realización de la factibilidad económica del proyecto.

Éste trabajo contempla una metodología para la captación de los datos del consumo energético cuyos proveedores son empresas del estado que suministran el servicio de electricidad y agua, por lo que sería de gran utilidad para la presente investigación.

Así mismo, Sosa María Eugenia (2017), realizó su trabajo de ascenso para optar a la categoría de profesor titular en la facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Central de Venezuela, titulado **“Habitabilidad y eficiencia energética en clima tropical: aplicación en instituciones educativas y oficinas”** y que consta de tres partes esenciales inter-relacionadas entre sí. La primera corresponde a la Memoria, la misma de acuerdo al citado Reglamento tiene como objeto presentar el marco conceptual y metodológico, así mismo constituye el hilo conductual que inter-relaciona las distintas investigaciones desarrolladas durante la carrera académica de la autora dentro de una misma línea de investigación Habitabilidad y Eficiencia Energética desarrollada en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC. La segunda parte constituye el cuerpo del trabajo se presenta los siete (7) textos (in extenso) tal como se publicaron en distintas revistas especializadas, así como en anales de simposia o congresos arbitrados. Es importante señalar que las publicaciones se presentan independientemente de su fecha de publicación organizadas de acuerdo a su aplicación: uso Educativo o de Oficina y la tercera parte la constituye las conclusiones generales y recomendaciones en el área de habitabilidad y eficiencia en energética de las edificaciones para clima tropical con base a las condiciones climáticas, socioculturales, económicas, tecnológicas y de regulaciones en Venezuela pero que de acuerdo a la universalidad de conocimiento permite su aplicación en cualquier país con igual clima, determinándose que los índices energético varían en función a respuesta arquitectónica y son un indicativo claro de un “diseño bioclimático” o “un buen diseño” desde el punto de vista climático, así como también, el consumo promedio de energía eléctrica en edificios, con acondicionamiento activo, va disminuyendo cuando se aplican mejores prácticas de uso.

El mencionado trabajo será de gran utilidad en la presente investigación porque se determinaron los rangos de índices energéticos ponderados y la jerarquización de las estrategias arquitectónicas en edificios institucionales y de oficina por orientación, adaptado al clima venezolano.

Habría que decir también, Siem Geovanni y Sosa María Eugenia (2021), en su artículo **“Auditoría energética de una edificación universitaria patrimonial. Caso de estudio: Facultad de arquitectura y urbanismo de la Universidad Central de Venezuela”** publicado por el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción de la FAU-UCV, donde se realizaron mediciones en diferentes áreas que fueron determinadas previamente sobre la base de la experiencia de los investigadores y de los profesionales responsables del mantenimiento de equipos en la FAU. Debido a que los equipos de medición de intensidad de corriente sólo pueden ser utilizados en el tablero central ubicado en el sótano, pues en los sub-tableros colocados en los pasillos, no es posible a causa de las dimensiones de las pinzas amperimétricas y del escaso espacio que se puede disponer en los tableros. Esto obligó a realizar las mediciones en el tablero central, con el inconveniente de que las mediciones se hicieron en conjunto para varias áreas. Esto limitó la lectura individual de cada sector y por lo tanto de cada sistema o equipo. En consecuencia, los valores que se obtuvieron corresponden a áreas que abarcan varios salones o servicios que funcionan independientemente y se propuso un plan de racionalidad energético para la FAU, que deberá ser evaluado y adaptados a las políticas y planes de mantenimientos de la FAU.

Con esta investigación se espera utilizar la metodología para realizar un estudio de carga de los equipos conectados a cada fase en los sub-tableros de cada área, para poder establecer un mejor equilibrio de uso de cada fase eléctrica en la red de la Universidad José Antonio Páez.

Por otra parte, Monagas Eva y Hornebo Verner (2016), en el trabajo titulado **“Evaluación de la eficiencia energética institucional en las dependencias de la Universidad de Carabobo sedes Aragua y Carabobo”** en el marco de la IX jornadas nacionales y I jornadas internacionales de investigación del IUT Valencia, se demostró que las líneas base energética y los indicadores energéticos aún no se comparan formalmente con estándares nacionales e internacionales. Sin embargo, algunos valores típicos de eficiencia de normas españolas indican que los indicadores energéticos alcanzados están muy por debajo de sus valores típicos. El estudio determinó la necesidad de realizar cambios en el patrón de uso de la energía, atender las recomendaciones de Corpoelec y plantear propuestas de formación en el uso de energía a trabajadores, usuarios y grupos de gestión de energía, con ello se espera utilizar la información sobre los indicadores energéticos utilizados y aplicarlos al presente proyecto de grado.

Por último, Delgado Searly y Seekatz Adriana (2018), en su trabajo especial de grado titulado **“Estudio de la Aplicación de Paneles Fotovoltaicos como fuente de energía alterna,**

**en desarrollos de viviendas de interés social”** presentado en la facultad de ingeniería de la Universidad Católica Andrés Bello para optar al título de ingeniero mecánico y basados en que Venezuela es el segundo país latinoamericano con el registro más alto de consumo eléctrico por habitante, se ha dirigido el estudio y el dimensionado de un sistema de paneles fotovoltaicos para alimentar un edificio de interés social, en función de continuar con una propuesta que se ha venido planteando, hacia el ahorro necesario en el consumo de energía eléctrica, demostrándose que resulta factible en cuanto a tecnología, la instalación de un sistema de paneles fotovoltaicos a pesar del costo de la inversión inicial, pero es equilibrado por el bajo costo de mantenimiento anual.

Por esas razones este antecedente representa una fuente de información acerca de las energías denominadas limpias (paneles fotovoltaicos) y que sin duda representarías una de las alternativas para el mejoramiento de la eficiencia energética en el UJAP.

## **2.2 Bases teóricas**

De acuerdo con Arias (2006), “Las bases teóricas implican un desarrollo amplio de los conceptos y proposiciones que conforman el punto de vista o enfoque adoptado, para sustentar o explicar el problema planteado” (p.107). Por lo tanto, la correcta realización de las bases teóricas permitirá no solo obtener un sustento sobre el cual se podrá realizar el apropiado y acorde análisis de resultados, sino que también ayudará a explicar la problemática a partir de un conjunto de teorías y supuestos ya establecidos y publicados.

### **2.2.1 Exergía**

Cuando se descubre una nueva fuente de energía, como un pozo geotérmico, lo primero que hacen los exploradores es estimar la cantidad de energía contenida en la fuente. Sin embargo, esta sola información sirve de poco para decidir si se construye una central eléctrica en ese sitio. Lo que realmente se necesita saber es el *potencial de trabajo* de la fuente, es decir, la cantidad de energía que se puede extraer como trabajo útil. El resto de la energía es finalmente descartada como energía de desecho y no debe ser considerada. Por lo tanto, es deseable tener una propiedad que permita determinar el potencial de trabajo útil de una cantidad dada de energía en algún estado especificado. Esta propiedad es la *exergía*, que también se denomina *disponibilidad* o *energía disponible*.

El potencial de trabajo de la energía contenida en un sistema en un estado especificado es implemente el trabajo útil máximo que puede obtenerse del sistema. También se sabe que el trabajo

realizado durante un proceso depende de los estados inicial y final y de la trayectoria del proceso, es decir:

$$\text{Trabajo} = (\text{estado inicial, trayectoria del proceso, estado final}) \quad \text{Ec. 1}$$

En un análisis de exergía se especifica el *estado inicial*, por lo tanto, no es una variable. La salida de trabajo se maximiza cuando el proceso entre dos estados especificados se ejecuta de una *manera reversible*, por consiguiente, determinando el trabajo potencial todas las irreversibilidades se desprecian. Por último, el sistema debe estar en el *estado de estancamiento* al final del proceso para maximizar la salida de trabajo. Se afirma que un sistema está en el **estado de estancamiento** cuando se encuentra en equilibrio termodinámico con el ambiente. En este estado, un sistema está a la temperatura y a la presión de su ambiente (en equilibrio térmico y mecánico), no tiene energía cinética o potencial relativa a su ambiente (velocidad cero y elevación cero por arriba del nivel de referencia) y no reacciona con el ambiente (químicamente inerte). Tampoco hay efectos de desequilibrio magnético, eléctrico y tensión superficial entre el sistema y sus alrededores, si éstos son relevantes para la situación específica.

Las propiedades de un sistema en el estado de estancamiento se denotan mediante el subíndice cero, por ejemplo,  $P_0$ ,  $T_0$ ,  $h_0$ ,  $u_0$  y  $s_0$ . A menos que se especifique de otra manera, la temperatura y la presión del estado de estancamiento se suponen como  $T_0=25\text{ °C}$  ( $77\text{ °F}$ ) y  $P_0=1\text{ atm}$  ( $101.325\text{ kPa}$  o  $14.7\text{ psia}$ ). Un sistema tiene exergía cero en el estado de estancamiento.

Se debe diferenciar entre *alrededores*, *alrededores inmediatos* y *ambiente*. Por definición, los **alrededores** son todo lo que está fuera de las fronteras del sistema; los **alrededores inmediatos** corresponden a la porción de los alrededores que son afectados por el proceso, y el **ambiente** es la región que se halla más allá de los alrededores inmediatos cuyas propiedades en cualquier punto no son afectadas por el proceso. Por consiguiente, cualquier irreversibilidad durante un proceso ocurre dentro del sistema y sus alrededores inmediatos, mientras que el ambiente está libre de cualquier irreversibilidad. Cuando se analiza el enfriamiento de una papa horneada caliente en una habitación a  $25\text{ °C}$ , por ejemplo, el aire tibio que rodea la papa corresponde a los alrededores inmediatos, y la parte restante del aire de la habitación a  $25\text{ °C}$  es el ambiente. Note que la temperatura de los alrededores inmediatos cambia de la que tiene la papa en la frontera a la del ambiente que se encuentra a  $25\text{ °C}$ .

La noción de que un sistema debe ir al estado de estancamiento hacia el final del proceso para maximizar la salida de trabajo puede explicarse como sigue: si la temperatura del sistema en

el estado final es mayor que (o menor que) la temperatura del ambiente en que se encuentra, siempre será posible producir trabajo adicional al operar una máquina térmica entre estos dos niveles de temperatura. Si la presión final es mayor que (o menor que) la presión del ambiente, aún es posible obtener trabajo si se permite que el sistema se expanda a la presión del ambiente. Si la velocidad final del sistema no es cero, podemos tomar esa energía cinética extra mediante una turbina y convertirla en el trabajo de un eje giratorio, y así sucesivamente. Ningún trabajo puede producirse a partir de un sistema que está inicialmente en el estado de estancamiento.

La atmósfera que nos rodea contiene una enorme cantidad de energía, sin embargo, se encuentra en el estado de estancamiento y la energía que contiene no posee potencial de trabajo. Por consiguiente, se concluye que *un sistema entrega el máximo trabajo posible cuando experimenta un proceso reversible del estado inicial especificado al estado de su ambiente, es decir, el estado de estancamiento*. Esto representa el *potencial de trabajo útil* del sistema en el estado especificado y se llama **exergía**. Es importante comprender que la exergía no representa la cantidad de trabajo que un dispositivo productor realmente entregará después de la instalación; sino que representa *el límite superior en la cantidad de trabajo que un dispositivo puede entregar sin violar cualquier ley termodinámica*. Habrá siempre una diferencia, grande o pequeña, entre la exergía y el trabajo real entregado por un dispositivo, diferencia que representa para los ingenieros la posibilidad para la mejora. Observe que la exergía de un sistema en un estado especificado depende de las condiciones del medio (el estado de estancamiento) así como de las propiedades del sistema, por lo tanto, la exergía es una propiedad de la *combinación entre sistema y ambiente* y no del sistema exclusivamente. La alteración del ambiente es otra manera de aumentar la exergía, pero definitivamente no es una alternativa fácil.

El término *disponibilidad* (o *availability* en inglés) fue popularizado en Estados Unidos por la Escuela de Ingeniería del Massachusetts Institute of Technology (MIT) en los años de 1940. Hoy, un término equivalente introducido en Europa en los años de 1950, **exergía**, ha encontrado aceptación mundial en parte porque es más corto, rima con energía y entropía y puede adaptarse sin requerir traducción. En este libro, el término que se prefiere es *exergía*.

### **2.2.2 Exergía asociada a la energía cinética y potencial**

La energía cinética es una forma de *energía mecánica*, por lo tanto, puede convertirse completamente en trabajo. El *potencial de trabajo* o la *exergía* de la energía cinética de un

sistema es igual a la propia energía cinética sin tener en cuenta la temperatura y la presión del ambiente. Es decir:

$$x_{ec} = \frac{V^2}{2} \quad \text{Ec. 2}$$

La

energía potencial también es una forma de *energía mecánica*, por lo tanto, puede convertirse completamente en trabajo. Así, la *exergía* de la energía potencial de un sistema es igual a la propia energía potencial sin tener en cuenta la temperatura y la presión del ambiente. Se puede calcular como:

$$x_{ep} = gz \quad \text{Ec. 3}$$

Por consiguiente, las exergías de las energías cinética y potencial son iguales a ellas mismas y están completamente disponibles para trabajo. Sin embargo, la energía interna  $u$  y la entalpía  $h$  de un sistema no están completamente disponibles para trabajo.

### 2.2.3 Trabajo reversible e irreversibilidad

La propiedad exergía sirve como una valiosa herramienta en la determinación de la calidad de la energía y en la comparación de los potenciales de trabajo de diferentes fuentes de energía o sistemas. Sin embargo, la evaluación de solamente la exergía no es suficiente para estudiar dispositivos técnicos que operan entre dos estados fijos, ya que cuando se evalúa la exergía siempre se supone que el estado final es el *estado de estancamiento*, lo cual casi nunca es el caso para los sistemas técnicos reales. Existen dos cantidades que se relacionan con los estados inicial y final reales de los procesos y que sirven como valiosas herramientas en el análisis termodinámico de componentes o sistemas. Tales cantidades son el *trabajo reversible* y la *irreversibilidad* (o *destrucción de exergía*).

El trabajo realizado por dispositivos que producen trabajo no siempre se halla completamente en una forma utilizable. Por ejemplo, cuando un gas en un dispositivo de cilindro-émbolo se expande, parte del trabajo realizado por el gas se usa para empujar el aire atmosférico fuera del camino del émbolo, luego este trabajo que no puede recuperarse para ser utilizado en cualquier propósito útil es igual a la presión atmosférica  $P_0$  por el cambio de volumen del sistema, y se denomina trabajo sobre los alrededores:

$$W_{alrededores} = P_0(V_2 - V_1) \quad \text{Ec. 4}$$

La diferencia entre el trabajo real  $W$  y el trabajo de los alrededores  $W_{alrededores}$  se denomina **trabajo útil**  $W_u$ :

$$W_u = W - W_{alrededores} = W - P_0(V_2 - V_1) \quad \text{Ec. 5}$$

Cuando un sistema se expande y realiza trabajo, la parte del trabajo realizado se emplea para superar la presión atmosférica, por lo tanto,  $W_{alrededores}$  representa una pérdida. Sin embargo, cuando un sistema se comprime, la presión atmosférica ayuda al proceso de compresión y entonces  $W_{alrededores}$  representa una ganancia.

El **trabajo reversible**  $W_{rev}$  se define como *la cantidad máxima de trabajo útil que puede producirse (o el trabajo mínimo que necesita ser proporcionado) cuando un sistema experimenta un proceso entre los estados inicial y final especificados*. Éste es el trabajo de salida útil (o entrada) obtenido (o gastado) cuando el proceso entre los estados inicial y final se ejecuta de una manera totalmente reversible. Cuando el estado final es el estado de estancamiento, el trabajo reversible es igual a la exergía. Para procesos que requieren trabajo, el trabajo reversible representa la cantidad de trabajo mínima necesaria para llevar a cabo ese proceso. Cualquier diferencia entre el trabajo reversible  $W_{rev}$  y el útil  $W_u$ , se debe a irreversibilidades presentes durante el proceso, y esta diferencia se llama **irreversibilidad**  $I$ , la cual se expresa como:

$$I = W_{rev, sale} - W_{u, sale} \quad \text{ó} \quad I = W_{u, ent} - W_{rev, ent} \quad \text{Ec. 6} \quad \text{La}$$

irreversibilidad es equivalente a la *exergía destruida*. Para un proceso totalmente reversible, las condiciones de trabajo reales y reversibles son idénticas, por lo tanto, la irreversibilidad es cero. Esto era de esperarse dado que los procesos totalmente reversibles no generan entropía. La irreversibilidad es una *cantidad positiva* para todo proceso real (irreversible) porque  $W_{rev} < W_u$  para dispositivos productores de trabajo y  $W_{rev} > W_u$  para dispositivos consumidores de trabajo.

La irreversibilidad puede verse como el *potencial de trabajo desperdiciado* o la *oportunidad perdida* para realizar trabajo. Representa la energía que podría convertirse en trabajo pero que no lo fue. Cuanto más pequeña es la irreversibilidad asociada con un proceso, mayor es el trabajo que se produce (o menor es el trabajo que se consume). El desempeño de un sistema puede mejorarse minimizando la irreversibilidad asociada con él.

#### 2.2.4 Cambio de exergía de un sistema

La propiedad *exergía* es el potencial de trabajo de un sistema en un ambiente especificado y representa la cantidad máxima de trabajo útil que puede obtenerse cuando el sistema llega al equilibrio con el ambiente. Al contrario de la energía, el valor de la exergía depende tanto del estado del ambiente como del estado del sistema, por lo tanto, la exergía es una propiedad de combinación. La exergía de un sistema que está en equilibrio con su ambiente es cero. El estado

del ambiente se conoce como “estado de estancamiento” porque desde el punto de vista termodinámico el sistema está prácticamente “estancado” (no puede hacer trabajo) cuando alcanza tal estado. En esta sección el análisis se limita a la **exergía termomecánica**, por lo tanto, no se toma en cuenta cualquier tipo de reacciones químicas y de mezclado. Así, un sistema en este “estado de estancamiento restringido” está a la temperatura y la presión del ambiente y no tiene energías cinética o potencial relativas al ambiente, sin embargo, puede tener una composición química diferente a éste. A continuación, se desarrollan las relaciones para las exergías y los cambios de exergía para una masa fija y una corriente de flujo.

#### 2.2.4.1 Exergía de una masa fija

En general, la energía interna consiste en energías *sensible*, *latente*, *química* y *nuclear*. Sin embargo, en ausencia de cualquier reacción química o nuclear, las energías química y nuclear son insignificantes, de manera que es posible considerar que la energía interna consiste únicamente en energías sensible y latente que pueden ser transferidas hacia o desde un sistema como *calor*, siempre y cuando haya una diferencia de temperatura a través de la frontera del sistema. La segunda ley de la termodinámica establece que el calor no puede convertirse completamente en trabajo, por lo tanto, el potencial de trabajo de la energía interna debe ser menor que la propia energía interna. Pero ¿cuánto menos? para contestar esa pregunta, se necesita considerar un sistema cerrado sin cambios en las energías cinética y potencial en un estado especificado que experimenta un proceso *reversible* hacia el estado del ambiente (es decir, la temperatura final y la presión del sistema deben ser  $T_0$  y  $P_0$ , respectivamente) y el trabajo útil entregado durante este proceso es la exergía del sistema en su estado inicial. Considere un dispositivo de cilindro-émbolo que contiene un fluido de masa  $m$  a temperatura  $T$  y presión  $P$  como el mostrado en la figura 1, el sistema (la masa dentro del cilindro) tiene un volumen de  $V$ , una energía interna  $U$  y una entropía  $S$ . El sistema experimenta entonces un cambio diferencial de estado durante el cual el volumen cambia por una cantidad diferencial  $dV$  y el calor se transfiere en una cantidad diferencial de  $dQ$ . Al tomar la dirección de las transferencias de calor y trabajo como provenientes *desde* el sistema (las salidas de calor y trabajo), el balance de energía para el sistema durante este proceso diferencial puede expresarse como:

$$\underbrace{\delta E_{ent} - \delta E_{sal}}_{\substack{\text{Transferencia neta de energía} \\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{dE_{sistema}}_{\substack{\text{Cambio de energía}}} \quad \text{Ec. 7}$$

$$-\delta Q - \delta W = dU \quad \text{Ec. 8}$$

ya que la única forma de energía que el sistema contiene es la *energía interna* y las únicas formas de transferencia de energía que una masa fija puede involucrar son calor y trabajo. Asimismo, la única forma de trabajo que un sistema simple compresible puede involucrar durante un proceso reversible es el trabajo de frontera, el cual se da como  $\delta W = PdV$  cuando la dirección de trabajo se toma como proveniente desde el sistema (de otra manera, sería  $-PdV$ ). La presión  $P$  en la expresión de  $PdV$  es la presión absoluta, la cual se mide desde el cero absoluto. Cualquier trabajo útil entregado por un dispositivo de cilindro-émbolo se debe a la presión por encima del nivel atmosférico, por lo tanto:

$$\delta W = PdV = (P - P_0)dV + P_0dV = \delta W_{b,\text{útil}} + P_0dV \quad \text{Ec. 9}$$

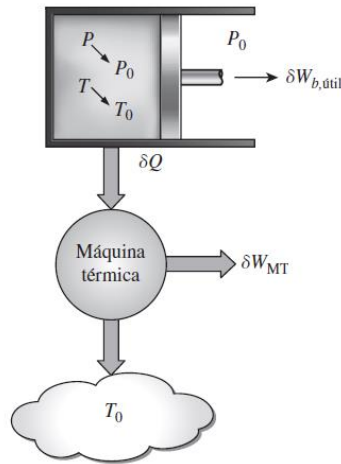


Figura 1: La exergía de una masa específica.  
Fuente: Y. Cengel (2006)

Un proceso reversible no puede involucrar alguna transferencia de calor debida a una diferencia finita de temperatura, por lo tanto, cualquier transferencia de calor entre el sistema a temperatura  $T$  y sus alrededores a  $T_0$  debe ocurrir a través de una máquina térmica reversible. Al observar que  $dS = \delta Q/T$  para un proceso reversible, y que la eficiencia térmica de una máquina térmica reversible que opera entre las temperaturas  $T$  y  $T_0$  es  $\eta_{\text{ter}} = 1 - T_0/T$ , el trabajo diferencial producido por la máquina como resultado de esta transferencia de calor es:

$$\delta W_{HE} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q = \delta Q - \frac{T_0}{T} \delta Q = \delta Q - (-T_0 dS)$$

$$\delta Q = \delta W_{HE} - T_0 dS \quad \text{Ec. 10}$$

Sustituyendo las expresiones  $\delta W$  y  $\delta Q$  de las ecuaciones Ec. 9 y Ec. 10 en la del balance de energía Ec. 8 y después de reestructurar, se obtiene:

$$\delta W_{total\ \acute{u}til} = \delta W_{HE} + \delta W_{b,\acute{u}til} = -dU - P_0 dV + T_0 dS \quad \text{Ec. 11}$$

Al integrar desde el estado especificado (sin subíndice) hasta el estado de estancamiento (subíndice 0) se obtiene:

$$W_{total\ \acute{u}til} = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad \text{Ec. 12}$$

donde  $W_{total,\acute{u}til}$  es el trabajo útil total entregado cuando el sistema experimenta un proceso reversible desde el estado especificado al de estancamiento, el cual por definición corresponde a la *exergía*.

En general, un sistema cerrado puede poseer energías cinética y potencial, por lo que la energía total de un sistema de este tipo es igual a la suma de sus energías interna, cinética y potencial. Al observar que las energías cinética y potencial son formas de exergía, la exergía de un sistema cerrado de masa  $m$  es:

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m \frac{V^2}{2} + mgz \quad \text{Ec. 13}$$

Por unidad de masa, la **exergía del sistema cerrado** (o **sin flujo**)  $\phi$ , se expresa como:

$$\phi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

$$\phi = (e - e_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad \text{Ec. 14}$$

donde  $u_0$ ,  $v_0$ , y  $s_0$  son las propiedades del *sistema* evaluadas en el estado de estancamiento. Observe que la exergía de un sistema es cero en el estado de estancamiento puesto que  $e=e_0$ ,  $v=v_0$  y  $s=s_0$  en ese estado. El cambio de exergía de un sistema cerrado durante un proceso es simplemente la diferencia entre las exergías final e inicial del sistema:

$$\Delta X = X_2 - X_1 = m(\phi_2 - \phi_1) = (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$$

$$\Delta X = (U_2 - U_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) + m \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + mg(z_2 - z_1) \quad \text{Ec. 15}$$

Para sistemas cerrados *estacionarios*, los términos de energías cinética y potencial desaparecen y cuando las propiedades de un sistema no son uniformes, la exergía del sistema puede ser determinada mediante la integración de:

$$X_{sistema} = \int \phi dm = \int_{VC} \phi \rho dV \quad \text{Ec. 16}$$

donde  $V$  es el volumen del sistema y  $\rho$  es la densidad.

Observe que la exergía es una propiedad y el valor de una propiedad no cambia a menos que cambie el *estado*. En consecuencia, el *cambio de exergía* de un sistema es cero si el estado del sistema o del ambiente no cambia durante el proceso. Por ejemplo, el cambio de exergía de dispositivos de flujo estacionario como toberas, compresores, turbinas, bombas e intercambiadores de calor en un ambiente especificado es cero durante la operación estacionaria, por otra parte, la exergía de un sistema cerrado es *positiva* o *cero*, nunca negativa. Incluso un medio a *baja temperatura* ( $T < T_0$ ) y/o *baja presión* ( $P < P_0$ ) contiene exergía dado que un medio frío puede servir como sumidero de calor para una máquina térmica que absorbe el calor del ambiente a  $T_0$ , y un espacio evacuado hace posible que la presión atmosférica mueva un émbolo y realice el trabajo.

#### 2.2.4 Eficiencia en la conversión de energía

*Eficiencia* es uno de los términos más usados en termodinámica, e indica qué tan bien se realiza un proceso de conversión o transferencia de energía. Asimismo, este término resulta uno de los que en general son mal usados en termodinámica, además de ser una fuente de malas interpretaciones. Esto se debe a que se usa sin una definición adecuada, lo cual se aclara a continuación y se definen algunas de las eficiencias más usadas en la práctica.

El desempeño o eficiencia se expresa en términos de la salida deseada y la entrada requerida, de la siguiente manera:

$$\text{Desempeño} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Salida Requerida}} \quad \text{Ec. 17}$$

##### 2.2.4.1 Eficiencia de dispositivos mecánicos y eléctricos

La transferencia de energía mecánica normalmente se lleva a cabo mediante una flecha rotatoria; de ahí que el trabajo mecánico se denomine *trabajo de flecha*. Una bomba o un ventilador reciben trabajo de flecha (comúnmente de un motor eléctrico) y lo transfieren al fluido como energía mecánica (menos las pérdidas por fricción). Por otro lado, una turbina convierte la energía mecánica de un fluido en trabajo de flecha. En ausencia de irreversibilidades como la fricción, la energía mecánica se puede convertir por completo de una forma de energía mecánica a otra, y la **eficiencia mecánica** de un dispositivo o proceso se puede definir como:

$$\eta = \frac{\text{Salida de energía mecánica}}{\text{Entrada de energía mecánica}} = \frac{E_{\text{mecánica salida}}}{E_{\text{mecánica entrada}}} = 1 - \frac{E_{\text{mecánica perdida}}}{E_{\text{mecánica entrada}}} \quad \text{Ec. 18}$$

Una eficiencia de conversión menor a 100% indica que la conversión es menos perfecta y han ocurrido algunas pérdidas durante ésta; una eficiencia mecánica de 97% indica que 3% del aporte de energía mecánica se convirtió en energía térmica como resultado del calentamiento por fricción, lo cual se manifiesta como un ligero aumento en la temperatura del fluido.

Regularmente, en los sistemas de fluidos el interés se halla en incrementar en un fluido la presión, la velocidad y/o la elevación. Esto se consigue mediante el *suministro de energía mecánica* al fluido con una bomba, un ventilador o un compresor (nos referiremos a todos como bombas). O bien, el interés está en el proceso inverso de *extraer energía mecánica* de un fluido mediante una turbina y producir potencia mecánica en la forma de una flecha que gira y propulsa un generador o cualquier otro dispositivo rotatorio. El grado de perfección del proceso de conversión entre el trabajo mecánico suministrado o extraído y la energía mecánica del fluido se expresa mediante la **eficiencia de bomba** y la **eficiencia de turbina**, definidas como:

$$\eta_{\text{bomba}} = \frac{\text{Incremento de energía mecánica del fluido}}{\text{Entrada de energía mecánica}} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{mecánica del fluido}}}{\dot{W}_{\text{eje}}} = \frac{\dot{W}_{u, \text{ bomba}}}{\dot{W}_{\text{bomba}}} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde  $\Delta \dot{E}_{\text{mecánica del fluido}} = \dot{E}_{\text{mecánica del fluido}} - \dot{E}_{\text{mecánica de entrada}}$  es la tasa de incremento en la energía mecánica del fluido, el cual equivale a la **potencia de bombeo útil**  $\dot{W}_{u, \text{ bomba}}$  suministrada al fluido, y

$$\eta_{\text{turbina}} = \frac{\text{Salida de energía mecánica}}{\text{disminución de energía mecánica del fluido}} = \frac{\dot{W}_{\text{eje}}}{\Delta \dot{E}_{\text{mecánica del fluido}}} = \frac{\dot{W}_{\text{eje}}}{\dot{W}_{u, \text{ turbina}}} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde  $\Delta \dot{E}_{\text{mecánica del fluido}} = \dot{E}_{\text{mecánica de entrada}} - \dot{E}_{\text{mecánica del fluido}}$  es la tasa de disminución en la energía mecánica del fluido, equivalente a la potencia mecánica extraída del fluido por la turbina  $\dot{W}_{u, \text{ turbina}}$  y se usa el signo de valor absoluto para evitar valores negativos en la eficiencia. En bombas o turbinas, una eficiencia de 100% indica conversión perfecta entre el trabajo de flecha y la energía mecánica del fluido, valor al que es posible aproximarse (pero nunca alcanzar) cuando se reducen los efectos de fricción.

La energía eléctrica se convierte comúnmente en *energía mecánica rotatoria* mediante motores eléctricos para impulsar ventiladores, compresores, brazos robóticos, arrancadores de automóviles, entre otros. La efectividad de este proceso de conversión se caracteriza por la *eficiencia del motor*  $\eta_{\text{motor}}$ , que es la relación entre la *salida de energía mecánica* del motor y la

*entrada de energía eléctrica*. La eficiencia de motores a plena carga varía entre alrededor de 35% para motores pequeños y más de 97% para los grandes de alta eficiencia. La diferencia entre la energía eléctrica consumida y la energía mecánica entregada se disipa como calor de desecho.

Las eficiencias mecánicas no deben confundirse con la **eficiencia del motor** y la **eficiencia del generador**, definidas como:

Motor

$$\eta_{motor} = \frac{\text{Salida de potencia mecánica}}{\text{Entrada de potencia eléctrica}} = \frac{\dot{W}_{eje}}{\dot{W}_{el\acute{e}ctrica\ entrada}} \quad \text{Ec. 21}$$

Generador

$$\eta_{generador} = \frac{\text{Salida de potencia eléctrica}}{\text{Entrada de potencia mecánica}} = \frac{\dot{W}_{el\acute{e}ctrica\ salida}}{\dot{W}_{eje}} \quad \text{Ec. 22}$$

### 2.2.5 Energías alternativas

La conversión de una energía a otra(s) afecta frecuentemente y en diversas formas al ambiente y al aire que respiramos, de ahí que el estudio de la energía no esté completo si se omite su impacto ambiental. Desde 1700 los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural se han utilizado para impulsar el desarrollo industrial y las comodidades de la vida moderna, pero ha sido imposible evitar efectos colaterales indeseables. Desde la tierra para cultivo, hasta el agua para consumo humano y el aire que respiramos, el ambiente ha pagado un costo muy elevado. Efectos como el smog, la lluvia ácida, el calentamiento global y el cambio climático se deben a la combustión de los fósiles.

Se denominan **fuentes alternativas de energía** a todas aquellas energías limpias que provienen de fuentes naturales e inagotables, y que al producirlas no contaminan. Comúnmente, cuando hacemos referencia a las energías alternativas nos referimos a las energías renovables.

A continuación, se presentan las principales **fuentes alternativas de energía** presentes en los mercados actuales:

- Energía solar: Es la energía que obtenemos con el sol. La radiación solar se recoge a través de placas solares y se transforma en electricidad.

- Energía eólica: Es la energía que se obtiene con la fuerza del viento. Los molinos de viento de los parques eólicos están conectados a generadores eléctricos y transforman la potencia del viento en electricidad.
- Energía hidráulica: Es una de las energías alternativas más conocidas. La fuerza del curso del agua se transforma en electricidad. La energía hidráulica se produce habitualmente en presas.
- Energía mareomotriz: La energía mareomotriz transforma la fuerza de las mareas en energía eléctrica.
- Energía geotérmica: Esta energía alternativa aprovecha las altas temperaturas del núcleo terrestre para la generación de energía a través del calor.
- Biomasa: En el caso de la biomasa, la energía se obtiene durante la combustión de residuos orgánicos, de origen animal y vegetal. Sustituye a otros combustibles fósiles contaminantes, como el carbón o el gasóleo.
- Biogás: El biogás consiste en una energía alternativa que se produce a través de la biodegradación de materia orgánica, mediante microorganismos, en dispositivos específicos sin oxígeno.

#### **2.2.5.1 Ventajas de las energías alternativas**

- Las fuentes alternativas de energía son respetuosas con el medio ambiente. No producen casi emisiones de CO<sub>2</sub> ni expulsan gases contaminantes a la atmósfera en comparación con los combustibles fósiles. Además, no generan apenas residuos contaminantes o de difícil tratamiento como sucede, por ejemplo, con la energía nuclear.
- Son inagotables. Las energías alternativas proceden de recursos naturales, gratuitos e inagotables, al contrario de lo que sucede con la energía generada a partir de combustibles fósiles, procedente de recursos limitados y finitos.
- Evitan la dependencia exterior. En algunos países como España, no abundan los combustibles fósiles, como el petróleo o el carbón. Estos territorios se ven obligados a vincular su abastecimiento energético a otros países, estableciéndose así una relación de dependencia energética. Las energías alternativas, por su parte, se encuentran disponibles en toda la superficie terrestre, por lo que se convierten en grandes aliadas para impulsar la independencia energética de los territorios.

- Potencian el auto consumo. En un futuro no muy lejano, todos los edificios y construcciones deberán ser auto suficientes en su consumo eléctrico. En muchos casos las energías alternativas pueden ser auto producidas por el propio consumidor final.
- Pueden llegar a lugares aislados. Las energías alternativas están disponibles en toda la superficie terrestre por lo que pueden llegar a cualquier rincón del mundo, incluyendo zonas rurales o semi-urbanas.

### **2.2.5.2 Desventajas de las fuentes alternativas de energía**

- Se caracterizan por producir un impacto visual elevado. Para poder recoger y transformar la energía generada a través de los mencionados recursos naturales (calor, viento, agua) será necesario proceder a la instalación de determinados equipamientos, de gran tamaño, que podrían alterar la estética del paisaje.
- Se requieren grandes extensiones de espacio para poder generar cantidades significativas de energía. Para poder llevar a cabo la instalación de los equipos dedicados a la captación y transformación de la energía, será imprescindible disponer de una amplia extensión de terreno. Solo de esta manera será posible generar un abastecimiento energético compatible con los consumos de nuestra sociedad.
- No siempre se obtiene la misma energía con ellas. La cantidad de energía generada por las energías alternativas variará en función de los recursos naturales disponibles. Por lo que en ocasiones no se puede garantizar el suministro constante.

### **2.2.6 Generación de potencia eólica**

Debido a la radiación solar y la exposición desigual del planeta a la misma, la superficie terrestre se calienta de manera desigual y por ende el aire contenido en la atmósfera, si a esto le sumamos los gradientes de presión, existirá un movimiento convectivo de la masa de aire a lo que se conoce como viento.

#### **2.2.6.1 Aerogenerador**

Un aerogenerador es una máquina hidráulica formada principalmente por una turbina eólica, que cuenta con un generador eléctrico. El aerogenerador transforma la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional, la cual es transformada en energía eléctrica. Una de las tecnologías de aerogeneradores más utilizadas actualmente emplea un generador de inducción doblemente alimentado. Este tipo de aerogeneradores están instalados en las Centrales

eólicas por todo el mundo y constan de tres palas de eje horizontal con capacidad de operación a velocidad variable, una caja de engranes denominada multiplicadora de velocidad, un generador eléctrico, un convertidor electrónico de frecuencia de potencia parcial y un transformador elevador para la conexión a la red eléctrica. En general, la energía cinética del viento es capturada por las palas del aerogenerador y es transformada en energía mecánica rotacional de baja velocidad. La energía mecánica se transfiere mediante la caja multiplicadora a las revoluciones necesarias para que el generador eléctrico transforme en energía eléctrica, la cual estará disponible en los devanados del estator y del rotor del generador. La energía producida por este tiene la frecuencia de la red eléctrica (por ejemplo 60 Hz) y la producida por el rotor tiene frecuencia variable dependiendo de la velocidad del viento. La energía eléctrica de frecuencia variable es convertida a la frecuencia de la red eléctrica por el convertidor electrónico. En el lado izquierdo de la figura 2 se pueden apreciar las principales partes de un aerogenerador y a la derecha el proceso de instalación y adecuación mecánica del mismo.

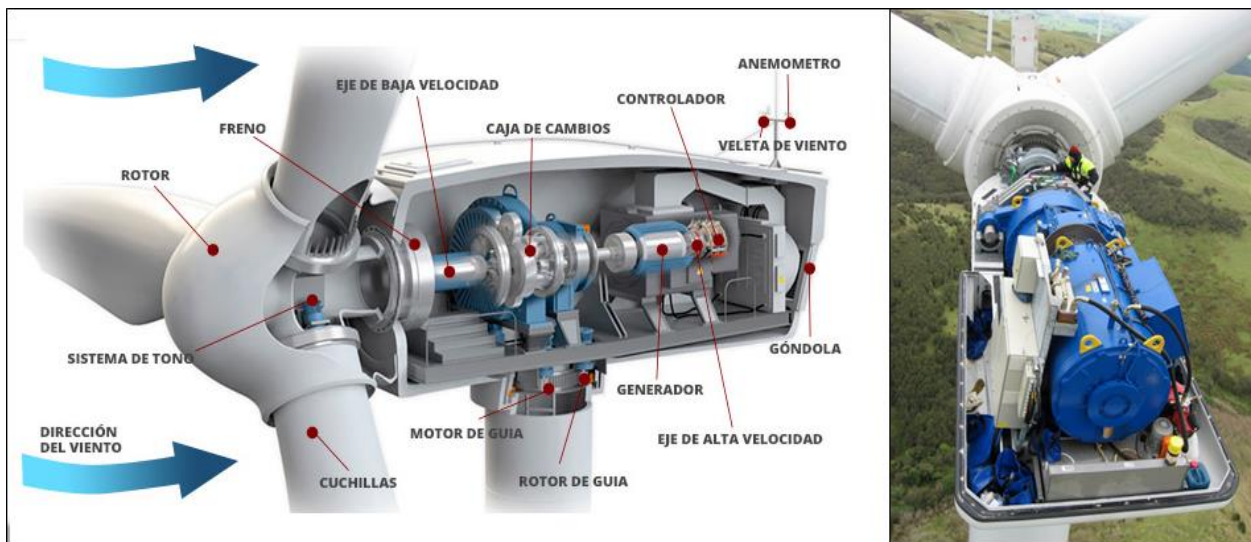


Figura 2: Aerogenerador de paletas horizontales.

Fuente: [www.worldenergytrade.com](http://www.worldenergytrade.com)

### 2.2.6.2 Perfil normal del viento

El modelo del perfil normal de viento (NWP, Normal Wind Profile) denota la velocidad media del viento como función de la altura  $h$  respecto al suelo. Para las clases estándar, la norma establece que el perfil de vientos obedece a la expresión:

$$V(h) = V_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad \text{Ec. 23}$$

Donde  $V(h)$  es la velocidad del viento en m/s a una altura  $h$  en m desde otra referencial  $h_0$  donde se conoce la velocidad  $V_0$  y  $\alpha$  es un factor que depende del lugar donde se requiere hacer el estudio, normalmente es función de la superficie, siendo ésta muy rugosa como un bosque o una aglomeración de casas que causará turbulencias y frenará el viento, mientras que otra muy lisa como el mar o las pistas de un aeropuerto que favorecerá el desplazamiento del aire, la ecuación 23 también sugiere que si el terreno es rugoso, se necesitarán aerogeneradores de mayor altura para alcanzar la misma velocidad de viento que en otros lugares más lisos. Para conocer el viento que hará en un punto determinado se deben analizar tanto los vientos globales como los locales. A veces serán los primeros los que predominen sobre los segundos, y otras, al revés.

### 2.2.6.3 Función de distribución de Weibull.

La velocidad del viento cambia continuamente, por lo que es necesario describirlo de forma estadística. Es conveniente establecer un modelo de las frecuencias de las velocidades del viento que venga descrito por una función matemática continua en vez de por una tabla de valores discretos. Hay varias funciones que se pueden utilizar para describir la frecuencia de la distribución de velocidades del viento. Las más utilizadas son las funciones de Weibull y Rayleigh.

La distribución de Weibull es una distribución continua de probabilidad que cumple con las siguientes propiedades: para  $f(x) \geq 0$  para todo  $x \in \mathbb{R}$  se tiene que:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad \text{Ec. 24}$$

Donde  $f(x)$  es la función de densidad de probabilidad y a partir de ella se define la función de probabilidad acumulada como:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad \text{para todo } -\infty < x < \infty \quad \text{Ec. 25}$$

Para el caso particular del modelo matemático de la distribución del viento la distribución de Weibull se define como:

$$F(v) = \int_0^v f(v) dv = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad \text{Ec. 26}$$

En función de los parámetros C de escala y k de forma, la distribución tiene una forma típica como se muestra en la figura 3.

Para la industria eólica es muy importante ser capaz de describir la variación de las velocidades del viento. Los proyectistas de turbinas necesitan la información para optimizar el diseño de sus aerogeneradores, así como para minimizar los costos de generación y los inversionistas necesitan la información para estimar sus ingresos por producción de electricidad.

En la figura 3 se muestra el comportamiento de la distribución de probabilidad de la velocidad media del viento a 3 m/s, y la forma de la curva está determinada por varios métodos según el valor de k. El área bajo la curva siempre vale exactamente uno, ya que la probabilidad de que el viento sopla a cualquiera de las velocidades, incluyendo el cero, debe ser del 100 por cien. La mitad del área está a la izquierda de la mediana de la distribución, ésto significa que la mitad del tiempo el viento soplará a menos de la velocidad mediana y la otra mitad soplará a más de la velocidad mediana.

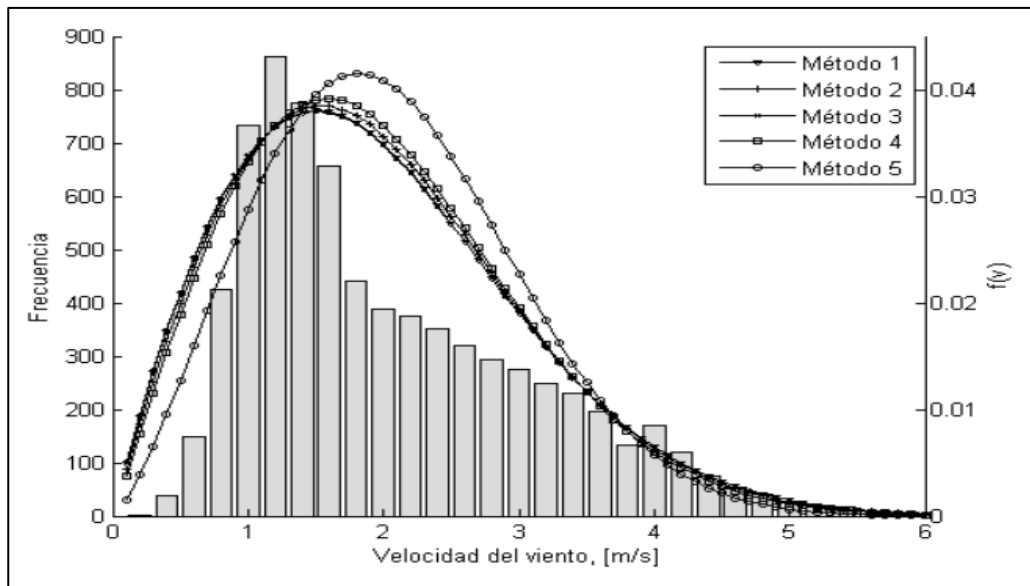


Figura 3: Aerogenerador de paletas horizontales

Fuente: [www.worldenergytrade.com](http://www.worldenergytrade.com)

La velocidad del viento media es realmente el promedio de las observaciones de la velocidad del viento que tendremos un lugar determinado. Como se puede observar, la distribución de las velocidades del viento es sesgada, es decir, no es simétrica. A veces tendrá velocidades de viento muy altas, pero son muy raras. Por otro lado, las velocidades del viento de 1,2 m/s son las

más comunes. Los 1,2 metros por segundo es el llamado valor modal de la distribución. Si multiplicamos cada diminuto intervalo de la velocidad del viento por la probabilidad de tener esa velocidad particular, y los sumamos todos, obtenemos la velocidad del viento media. La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie. Por lo tanto, la Distribución de Weibull puede variar tanto en la forma como en el valor medio. Cuando el parámetro  $k$  de forma es exactamente 2, la distribución es conocida como distribución de Rayleigh y los fabricantes de aerogeneradores proporcionan gráficas de rendimiento para sus máquinas usando la distribución de Rayleigh.

### **2.2.7 Generación de potencia fotovoltaica**

La energía fotovoltaica, se basa en la obtención de energía eléctrica a partir de la radiación solar proveniente del sol a través del efecto fotoeléctrico en unas celdas llamadas celdas fotovoltaicas las cuales pueden ser de distintos materiales semiconductores. Destacan las celdas de silicio monocristalino con una eficiencia entre 18% y 20%, las de silicio policristalino cuya eficiencia varía entre 15% y 17,5% y, por último, las de silicio amorfo con eficiencias más bajas pudiendo variar entre 8% y 9%. La eficiencia de las placas solares no va a depender de la superficie cubierta por las celdas ni de la cantidad de radiación solar que reciban, si no, del material del que están compuestas, aunque, como es de esperar, a mayor superficie e irradiancia solar mayores cantidades de energía se van a producir. El carácter modular de este tipo de proceso para obtención de energía permite desde una instalación simple en el techo de una casa hasta grandes extensiones de paneles conocidas como granjas solares. China, EEUU, Japón, Alemania y la India son los países que lideran la producción de energía fotovoltaica a nivel mundial y para el año 2021 sólo ellos producían más 480 GW de energía eléctrica.

#### **2.2.7.1 Radiación solar**

Desde el punto de vista energético, cuya representación gráfica se muestra en la figura 4, la masa solar que por segundo se irradia al espacio en forma de partículas de alta energía y de radiación electromagnética es aproximadamente de  $5,6 \times 10^{35}$  eV y de ella, la tierra recibe en el exterior de su atmósfera un total de  $1,73 \times 10^{14}$  kW, es decir  $1,353 \text{ W/m}^2$ , que se conoce como constante solar y cuyo valor fluctúa en un  $\pm 3\%$  debido a la variación periódica de la distancia entre

la Tierra y el Sol. Los  $1,73 \times 10^{14}$  kW de energía solar que inciden sobre la Tierra, se reparten en la siguiente forma:

Energía solar reflejada por la atmósfera hacia el espacio exterior: 30% ( $5,2 \times 10^{13}$  kW)

Energía solar que se utiliza en calentar la atmósfera: 47% ( $8,0 \times 10^{13}$  kW)

Energía solar que se utiliza en la evaporación de los océanos: 23% ( $4,0 \times 10^{13}$  kW)

Energía solar que se utiliza en generar perturbaciones atmosféricas, como el viento, (energía mecánica):  $3,7 \times 10^{11}$  kW

Energía solar utilizada en la fotosíntesis:  $4 \times 10^{10}$  kW.

Por otra parte, la Tierra tiene un movimiento de rotación alrededor de su eje en el que emplea 24 horas. Ahora bien, debido a la inclinación del eje de rotación y del movimiento orbital de la tierra, la duración del día y de la noche varían según la latitud del lugar.

Así, en el Ecuador terrestre el día y la noche son iguales, es decir, de doce horas, pero esa igualdad se va perdiendo a medida que se pasa del Ecuador hacia los Polos, ya que progresivamente van apareciendo los inviernos de noches más largas en contraposición con los veranos de noches más cortas, incluso hasta en las regiones polares en donde duran medio año. En la figura 5 se visualiza la posición del sol según los meses del año.

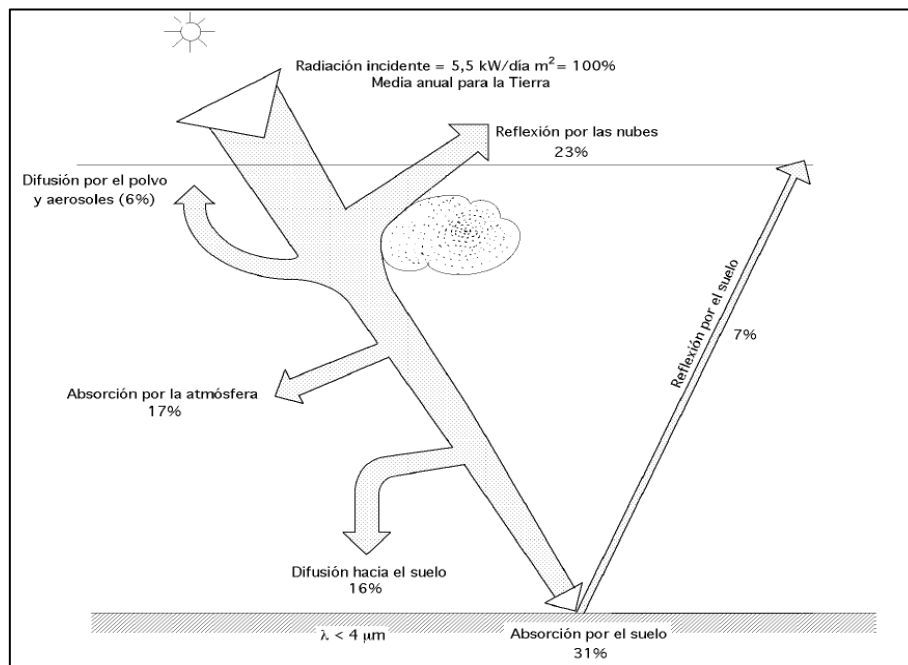


Figura 4: Balance de radiación solar  
Fuente: Termodinámica - Pedro Fernández (2003)

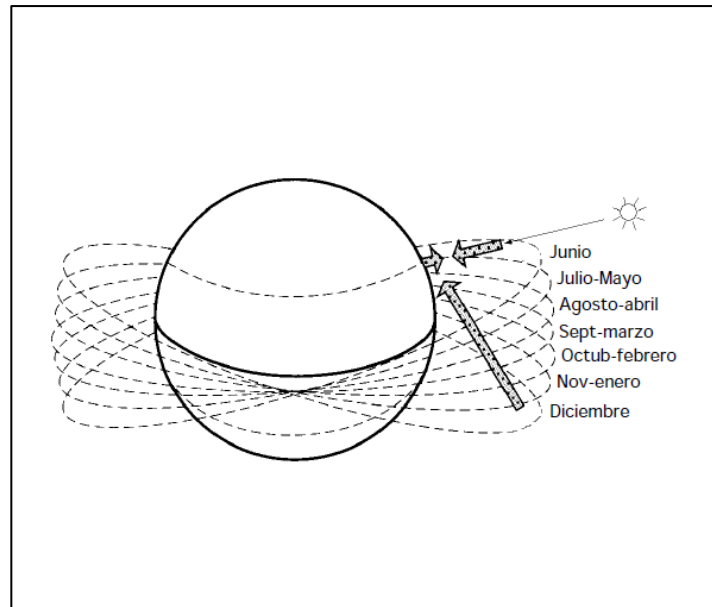


Figura 5: Posiciones del sol a lo largo del año  
Fuente: Termodinámica - Pedro Fernández 2003

### 2.2.7.2 Energía solar

La energía solar es una fuente de energía que depende del tiempo, aunque para una amplia gama de aplicaciones las necesidades de energía dependen también del tiempo, pero en forma distinta del suministro de energía solar, por lo que el desfase entre los períodos de disponibilidad de la energía solar y los períodos de consumo, requieren de alguna forma de almacenamiento. El almacenamiento de energía solar se tiene que realizar teniendo en cuenta:

- El tipo de colector solar
- Las unidades de almacenamiento
- Los aparatos de conversión (tales como acondicionadores de aire o motores), cargas, suministros de energía auxiliares o suplementarios, etc
- Los sistemas de control.

Las características y el COP (coeficiente de operación) de cada uno de estos elementos están relacionados con la temperatura; en un proceso termosolar de generación de potencia, el sistema de almacenamiento de energía térmica provoca una gran diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del fluido, lo que a su vez implica una baja temperatura de entrada en la máquina térmica y, por lo tanto, un

bajo COP de ésta y de toda la instalación. La capacidad de almacenamiento óptimo de la energía solar es función de su disponibilidad, que depende de:

- El tiempo
- La naturaleza de las cargas que se pueden esperar en el proceso
- La forma en que se suministra la energía auxiliar
- Un análisis económico que determina qué parte de las cargas totales de energía deben ser de tipo solar y qué otras partes procedentes de otras formas de energía.

Por su parte para la transformación de la energía solar en eléctrica, mediante un ciclo termodinámico, se requiere de un adecuado ordenamiento de espejos, llamados heliostatos, situados sobre un terreno, ordenados y orientados automáticamente, para que en todo momento reflejen la radiación solar directa que incide sobre ellos, en un receptor situado a gran altura sobre el terreno en el que van ubicados los espejos, de forma que toda la energía se transporte al mismo tiempo por radiación. En el diseño de una central de energía solar para la obtención de electricidad mediante un ciclo termodinámico recorrido por vapor de agua, se pueden considerar dos partes perfectamente diferenciadas:

*a) El concentrador de energía solar*

*b) El receptor de energía que se comporta como caldera del ciclo termodinámico*

Pero éste tipo de plantas de generación de potencia requieren de grandes espacios abiertos donde los efectos de sombras o contaminación lumínica no interfiera en el proceso de captación.

### **2.2.7.3 Clasificación de las instalaciones solares fotovoltaicas.**

La clasificación de las instalaciones solares fotovoltaicas (ISF) se puede realizar en función de la aplicación a la que están destinadas. Así, se distinguen entre aplicaciones autónomas y aplicaciones conectadas a la red.

Las **aplicaciones autónomas** producen electricidad sin ningún tipo de conexión con la red eléctrica, a fin de dotar de este tipo de energía al lugar donde se encuentran ubicadas. Pueden distinguirse dos bloques:

- **Aplicaciones espaciales:** sirven para proporcionar energía eléctrica a elementos colocados por el ser humano en el espacio, tales como satélites de comunicaciones, la Estación

Espacial Internacional (ISS por sus siglas en inglés). La investigación en esta área propició el desarrollo de los equipos fotovoltaicos tal y como los conocemos en la actualidad.

- **Aplicaciones terrestres**, entre las que cabe destacar las profesionales:
  - Telecomunicaciones: telefonía rural, vía radio; repetidores (de telefonía, televisión, etcétera).
  - Electrificación de zonas rurales y aisladas: estas instalaciones, que se pueden realizar en cualquier lugar, están pensadas para países y regiones en desarrollo y todas aquellas zonas en que no existe acceso a la red eléctrica comercial (en Europa hay cerca de un millón de personas sin acceso a esta red): viviendas aisladas, de ocupación permanente o periódica, refugios de montaña, etc. En ciertos países, como Cuba o Brasil, se emplean en locales comunitarios (consultorios médicos, escuelas) o para abastecer de electricidad a un determinado grupo de personas.
  - Señalización: se aplica, por ejemplo, a señales de tráfico luminosas, formadas por diodos LED, alimentados por un panel solar y una batería.
  - Alumbrado público: se utiliza en zonas en las que resulta complicado llevar una línea eléctrica convencional.
  - Bombeo de agua: estas instalaciones están pensadas para lugares tales como granjas, ranchos, etc. Se pueden realizar en cualquier lugar. Su uso puede ser tanto para agua potable como para riego.
  - Redes VSAT: redes privadas de comunicación (para una empresa, un organismo oficial, que actúan a través de satélite. La energía solar se utiliza para alimentar las estaciones de la red.
  - Telemetría: permite realizar medidas sobre variables físicas y transmitir la información una central (por ejemplo el control de la pluviometría de la cuenca de un río).

Y las **aplicaciones conectadas a la red**, donde el productor no utiliza la energía directamente, sino que es vendida al organismo encargado de la gestión de la energía en el país. Tienen la ventaja de que la producción de electricidad se realiza precisamente en el periodo de tiempo en el que la curva de demanda de electricidad aumenta, es decir, durante el día, siendo muy importantes los kilovatios generados de esta forma. Cabe distinguir:

- **Centrales fotovoltaicas y granjas solares**: recintos en los que se concentra un número determinado de instalaciones fotovoltaicas de diferentes propietarios con el fin de vender la

electricidad producida a la compañía eléctrica con la cual se haya establecido el contrato. La energía vendida puede estar a nombre de una persona, una sociedad, etc. (la potencia instalada depende de las dimensiones del generador fotovoltaico). Cada instalación tiene su propietario y todas ellas se ubican en el mismo lugar. En la figura 6 se muestra el complejo Copper Mountain Solar que concentra 802 MW de capacidad fotovoltaica en el valle de El Dorado, en Nevada, EEUU.

• **Edificios fotovoltaicos:** es una de las últimas aplicaciones desarrolladas para el uso de la energía fotovoltaica. La rápida evolución en los productos de este tipo ha permitido el uso de los módulos como material constructivo en cerramientos, cubiertas y fachadas de gran valor visual. Además, la energía fotovoltaica es el sistema de energías renovables más adecuado para la generación de electricidad en zonas urbanas sin provocar efectos ambientales adversos.



Figura 6: Complejo Copper Mountain Solar. Nevada. EEUU

Fuente: getty images

La integración arquitectónica consiste en combinar la doble función, como elemento constructivo y como productor de electricidad, de los módulos fotovoltaicos. La mayoría de estos sistemas han sido integrados en tejados, porque es allí donde alcanzan la máxima captación de energía solar, pero últimamente se está comenzando a integrarlos en muros y fachadas, en las que, por ejemplo el vidrio es reemplazado por módulos de láminas delgadas semitransparentes. A la hora de realizar este tipo de instalaciones se tienen en cuenta consideraciones estéticas (en la elección del tipo de panel), además de las relacionadas con el rendimiento energético. En 2019, U-

Solar Clean Energy Solutions instaló el mayor sistema solar fotovoltaico vertical integrado en un edificio de la India en un centro de datos en Mumbai. El sistema mostrado en la figura 7, con una capacidad de aproximadamente 1 MW, se instaló integrando paneles solares en los cuatro lados de la fachada del edificio, cubriendo más de 465 metros cuadrados de área de fachada.

El módulo fotovoltaico formará parte del cerramiento del edificio, pudiendo contribuir a disminuir el consumo energético del edificio. En ocasiones, las celdas pueden ser coloreadas para reducir la entrada de luz a través de los huecos los paneles. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en ocasiones la modificación de algunas características de los módulos fotovoltaicos pueden afectar a su rendimiento eléctrico.

Por ejemplo, las celdas de silicio cristalino suelen tener un color azulado, que puede modificarse variando el espesor de su capa antireflexiva. La modificación de este espesor puede provocar cambios significativos en el rendimiento del panel, por ello hay que poner especial atención antes de tomar una decisión sobre la variación de su color y espesor.



Ilustración 7: Edificio fotovoltaico

Fuente: getty images

#### **2.2.7.4 Elementos de una instalación solar fotovoltaica.**

El elemento principal de cualquier instalación de energía solar es el generador, que recibe el nombre de celda solar. Se caracteriza por convertir directamente en electricidad los fotones

provenientes de la luz del sol. Su funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico. En la figura 8 se muestra la infografía de una instalación solar fotovoltaica básica.

El elemento principal de cualquier instalación de energía solar es el generador, que recibe el nombre de celda solar. Se caracteriza por convertir directamente en electricidad los fotones provenientes de la luz del sol. Su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico. Una celda solar se comporta como un diodo: la parte expuesta a la radiación solar es la N, y la parte situada en la zona de oscuridad, la P, los detalles se pueden ver en la figura 9. Los terminales de conexión de la celda se hallan sobre cada una de estas partes del diodo: la cara correspondiente a la zona P se encuentra metalizada por completo (no tiene que recibir luz), mientras que en la zona N el metalizado tiene forma de peine, a fin de que la radiación solar llegue al semiconductor.

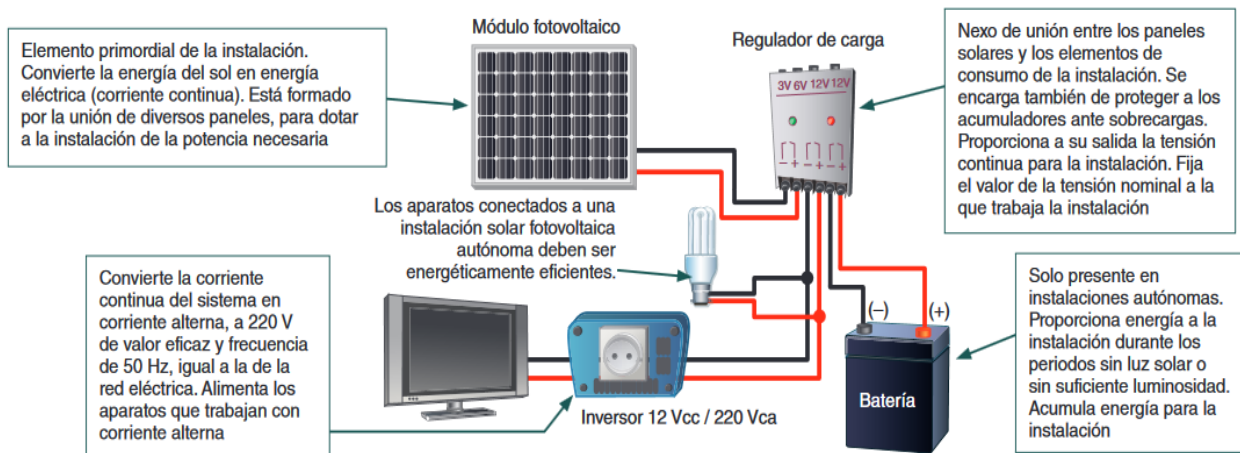


Figura 8: Elementos de una instalación fotovoltaica básica  
Fuente: getty images

### 2.2.7.5 Parámetros fundamentales de una celda fotovoltaica.

En una celda fotovoltaica la producción de corriente depende de la irradiancia (nivel de iluminación), de tal forma que a medida que aumenta la irradiancia, aumenta la intensidad a través de la celda, dicha intensidad recibe el nombre de Corriente de iluminación ( $I_L$ ), la cual es la corriente generada cuando incide la radiación solar sobre la celda, pero también existe la denominada Corriente de oscuridad ( $I_D$ ) que es debida a la recombinación de los pares electrón-hueco que se produce en el interior del semiconductor. Otros parámetros son:

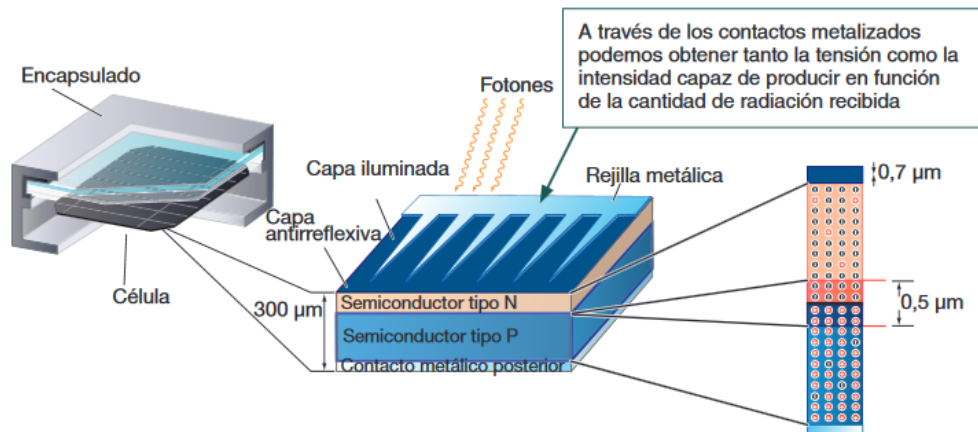


Figura 9: Componentes de una celda fotovoltaica.  
Fuente: getty image

Voltaje de circuito abierto ( $V_{OC}$ ): es el máximo voltaje que se obtiene en los extremos de la celda solar, que se da cuando no está conectada a ninguna carga. Es una característica del material con el que está construida la celda y la Corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ ) que es el máximo valor de la corriente que puede circular por la celda solar. Se da cuando sus terminales están cortocircuitados. Cuando la celda solar es conectada a una carga, los valores de tensión e intensidad varían. Existirán dos de ellos para los cuales la potencia entregada sea máxima:  $V_m$  (voltaje máximo) e  $I_m$  (intensidad máxima), que siempre serán menores que  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$ . En función de estos valores, la potencia máxima que puede entregar la celda solar será:

$$P_m = V_m I_m \quad \text{Ec. 27}$$

Esto nos permite definir un parámetro de la celda solar que recibe el nombre de factor de forma (FF) y que se calcula mediante la ecuación:

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{OC} I_{SC}} \quad \text{Ec. 28}$$

Así pues, el factor de forma es el cociente entre la máxima potencia que puede entregar la celda a la carga y el producto de la tensión de circuito abierto y la corriente de corto circuito. En las celdas solares más habituales, los valores típicos de FF son 0,7 y 0,8.

### 2.2.7.6 Conectividad de celdas solares

La potencia que proporciona una celda de tamaño estándar (digamos de 10x10 cm) es muy pequeña (en torno a 1 o 2 W), por lo que generalmente será necesario tener que asociar varias de ellas con el fin de proporcionar la potencia necesaria al sistema fotovoltaico de la instalación. Es de este hecho de donde surge el concepto de panel solar o módulo fotovoltaico, cuyos elementos y características se revisaron en los tópicos anteriores. Según la conexión eléctrica de las celdas, se puede encontrar dos posibilidades:

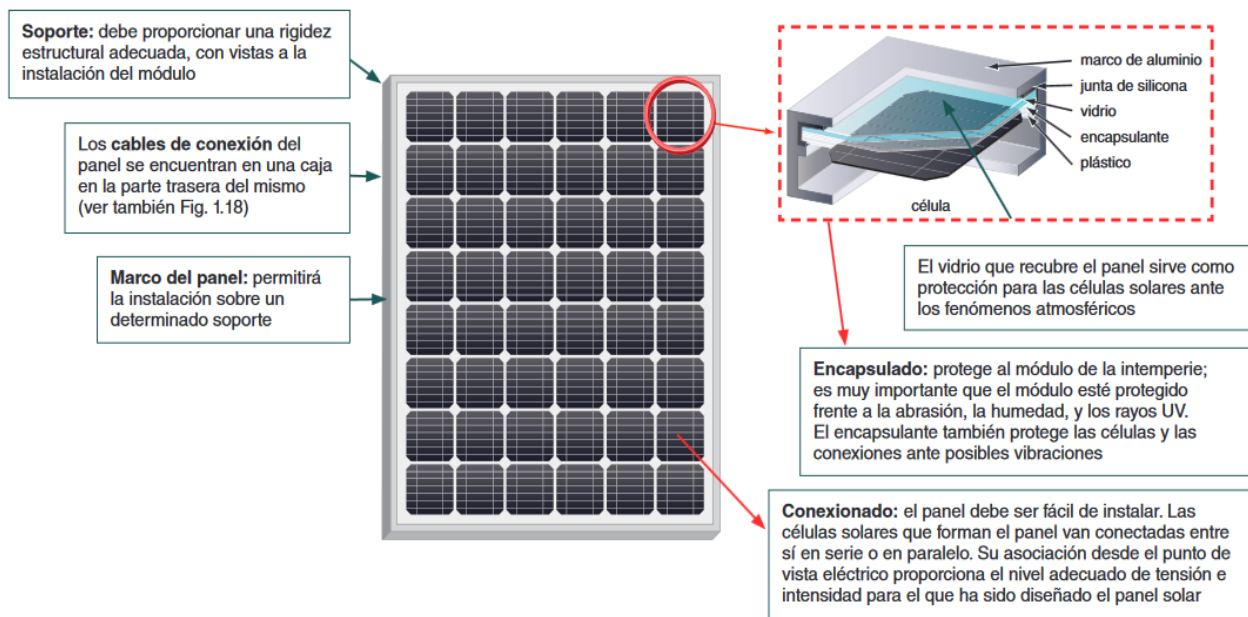


Figura 10: Características de un panel solar

Fuente: getty images

### 2.2.7.8 Características eléctricas de los paneles solares

A la hora de trabajar con los paneles solares nos interesa saber qué datos nos proporciona el fabricante, con el fin de utilizarlos correctamente. En los catálogos aparecen todos aquellos parámetros que son de utilidad a la hora de realizar el diseño de la instalación. No obstante, hay que tener cuidado, ya que los valores proporcionados son obtenidos bajo unas determinadas condiciones de temperatura ambiente e irradiación solar. En la práctica siempre existirá una pequeña desviación sobre los valores teóricos cuando el panel esté colocado en la instalación. En la figura 11 se muestra una tabla de datos típica para paneles solares donde se

destacan los distintos modelos, la potencia máxima con una variación de  $\pm 3\%$ , el voltaje máximo, la corriente máxima, el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito.

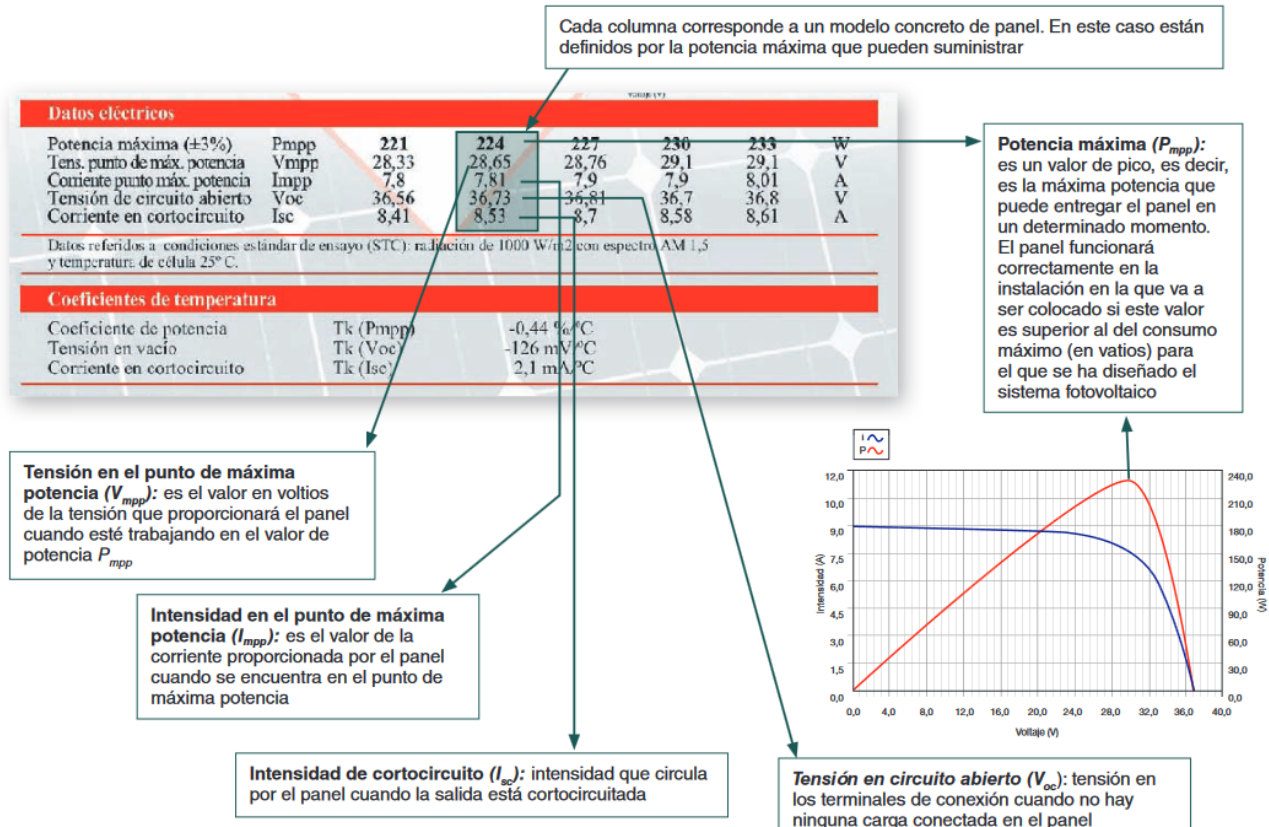


Figura 11: Características de un panel solar.

Fuente: [www.trinasolar.com](http://www.trinasolar.com)

## 2.2.8 Fundamentos de termoeconomía

La energía no se genera, ni se destruye: se transforma. En esta transformación, la calidad de la energía (exergía) se degrada, y es precisamente lo que mide la termoeconomía.

La termoeconomía es una rama de la ingeniería que combina el análisis exergético y los principios económicos para proporcionar una información de un sistema térmico no disponible mediante los análisis energéticos y económicos clásicos. Esta información es crucial para el diseño económicamente eficiente de los sistemas térmicos. Se puede considerar la termoeconomía como una minimización de costos con ayuda de la exergía. Dado que las consideraciones termodinámicas de la termoeconomía están basadas en el concepto de exergía, el término exergoeconomía también

puede usarse para describir la combinación del análisis exergético y económico. Habitualmente es necesario saber cuánto cuestan las ineficiencias de un sistema. Dos causas importantes de estas ineficiencias son las destrucciones y pérdidas exergéticas. Se desea conocer cuánto cuestan dichas penalizaciones en vista de la mejora del costo de los productos finales del proceso y mejorar la rentabilidad del sistema.

Si un proceso tiene como resultado más de un producto, es importante conocer los costos de producción de cada uno de ellos y el de los servicios utilizados para la obtención de éstos, de manera que estos costos puedan ser cargados apropiadamente al producto correspondiente. Este procedimiento es útil para identificar posibles técnicas de mejora del costo total del sistema. De acuerdo con lo expuesto, el objetivo del análisis termoeconómico debe ser:

- Calcular separadamente los costos de cada producto generado por el sistema.
- Comprender la formación de costos y flujo de los mismos en el sistema.
- Optimizar variables específicas asociadas a cada uno de los componentes.
- Optimizar el sistema completo en su globalidad.

En un análisis económico convencional, el balance de costos que generalmente se aplica a un sistema expresa que el costo de los productos de un sistema es igual a la suma ( $C^P$ ) de los costos debidos a los consumibles ( $C^C$ ) más los costos asociados a la inversión de capital ( $C^{CA}$ ) y los costos de operación ( $Z^O$ ) y mantenimiento ( $Z^M$ ), ésto es:

$$C^P + C^C = C^{CA} + Z^O + Z^M \quad \text{Ec. 29}$$

Los costos de capital junto con los de operación y mantenimiento, no son costos exergéticos, y se calculan dividiendo la contribución anual de estos costos entre el número de horas al año que la planta está en funcionamiento. La suma de esos dos costos dan lugar a una variable fundamental para el análisis termoeconómico:

$$Z = \sum_{\forall k}^r Z_k^O + \sum_{\forall l}^s Z_l^M \quad \text{Ec. 30}$$

Supuestos conocidos los costos unitarios de todas los flujos de entrada al sistema, así como las potencias exergéticas de todos los flujos de materia y energía junto con los costos temporales mantenidos más los de operación y mantenimiento, se puede establecer el

balance económico necesario para cada equipo de la instalación mediante la ecuación fundamental de la termoeconomía.

$$\sum_{\forall i}^n C_i^P + \sum_{\forall i}^n C_i^C = \sum_{\forall j}^m C_j^{CA} + Z \quad \text{Ec. 31}$$

Una vez que se ha calculado el costo unitario y el costo temporal de todas los flujos de energía se definen una serie de parámetros termoeconómicos que permiten realizar la evaluación del sistema.

$$f^C = \frac{C^C}{C^{CA}} \quad f^Z = \frac{Z}{C^{CA}} \quad \text{Ec. 32}$$

Se define también la diferencia relativa de costos exergéticos unitarios promedio, como el aumento relativo del costo exergético unitario promedio entre consumible y producto, según la siguiente ecuación:

$$r = \frac{C^P - C^C}{C^C} \quad \text{Ec. 33}$$

Estos parámetros permiten obtener una serie de conclusiones que constituyen el resultado final del análisis y evaluación termoeconómica

## CAPITULO III

### MARCO METODOLÓGICO

En esta sección se expone de forma precisa el tipo de datos que se requieren indagar para el logro de los objetivos de la investigación, así como la descripción de los distintos métodos y las técnicas que posibilitan obtener la información necesaria para su ejecución, donde se hace un recuento de los recursos disponibles y se describe el procedimiento empleado para el análisis exergético del edificio 4 de la Universidad José Antonio Páez.

#### **3.1 Tipo de investigación**

En muchas oportunidades, el término proyecto se confunde con otros que aparentan ser sinónimos, pero que en la práctica tienen ámbitos muy diferentes. Tal es el caso de las expresiones plan y programa. Para Dubs R. y Siso E. (2002) el plan hace referencia a un amplio conjunto de fines, objetivos, estrategias, recursos, etc. para lograr el desarrollo de un sector amplio (plan de desarrollo económico de un país o comunidad, plan de estudios). El programa es un conjunto de proyectos, con metas y objetivos de un plan que deben cumplirse en un tiempo determinado bajo la responsabilidad de una unidad u organización específica. El proyecto es la unidad operativa, específica e independiente de los programas. De esta manera existen diversas clases de proyectos: proyecto de desarrollo, proyecto de gobierno, proyecto de inversión social, proyecto de investigación, proyecto de aprendizaje, proyecto de plantel, proyecto de aula, proyecto de investigación, proyecto factible y la metodología de la investigación, considera un proyecto como una propuesta viable de estudio o investigación con métodos y técnicas definidas.

En el marco de estas ideas, la investigación planteada es del tipo *proyecto factible*, ya que como su nombre lo indica, tiene un propósito de utilización inmediata, ya que la ejecución de la propuesta se centra en buscar las variables o características que presenta el consumo de energía y el uso de las fuentes disponibles, así como también el cómo se dan sus interrelaciones.

#### **3.2 Diseño de investigación**

De acuerdo con Hernández (2003), el diseño de investigación constituye el plan general del investigador para conseguir una respuesta clara a sus interrogantes o comprobar una hipótesis de investigación. El diseño de la investigación se encarga de detallar las estrategias básicas que el investigador adopta para conseguir información exacta y que se pueda interpretar. El tipo de

investigación es la manera que se va a adoptar para cumplir con los objetivos, existen varios tipos de investigación los cuales pueden ser; Experimental, de Campo o Documental.

En base al objetivo general, se concibe que el nivel de la actual investigación será de tipo *de campo* ya que en ésta se busca obtener y analizar datos provenientes de mediciones directas e indirectas de las variables requeridas para calcular el consumo energético de la planta física de la Universidad José Antonio Páez (caso edificio 4).

### **3.3 Nivel de la investigación**

El nivel de conocimiento es descriptivo, y éste consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Hernández (2003), señala que la investigación descriptiva busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice. Teniendo como objetivo indagar la incidencia y los valores en que se manifiestan una o más variables al ubicar, categorizar y proporcionar la visión de una comunidad, un evento, un contexto, un fenómeno o situación.

En este orden de ideas, la investigación se basa en describir el comportamiento energético basado en los criterios de exergía.

### **3.4 Población y muestra**

La población Hurtado y Toro (2005), la definen como: “es la composición de todos los elementos a ser estudiados y a quienes podrán ser generalizados los resultados de la investigación, una vez concluida ésta, para lo que es necesario que la muestra con la cual se trabaje sea representativa de la población”. Por ende, la población será las diferentes curvas características y gráficas experimentales que muestran los fabricantes. La muestra a emplear en este proyecto es una muestra del tipo no probabilística, donde Véliz y Arredondo (2009) determinan que este tipo de muestra es: “aquel tipo de muestra para el cual no puede calcularse la probabilidad de extracción de una determinada muestra”.

Por lo tanto, la muestra seleccionada es el edificio 4 y sus respectivas fuentes de distribución de energía en la planta física de la Universidad José Antonio Páez.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014), las técnicas de recolección de datos son definidas como los métodos utilizados para recoger y analizar información, es decir, son las observaciones que conllevan al registro sistemático y confiable de variables, comportamientos o conductas. En la investigación se utilizan varios instrumentos para recopilar dicha información,

entre ellos: observación, medición no estadística, entrevistas y grupos focus, revisiones bibliográficas, transactional tracking, monitoreo de redes sociales, seguimiento en línea, encuestas, experimentos y formularios. Este proceso busca reunir y medir información de diferentes fuentes para obtener una visualización completa y precisa acerca de un tema, zona o situación de interés.

En el presente trabajo fueron utilizados los siguientes instrumentos de recolección de datos:

- Medición de variables: el cual se basó en la adquisición de datos tales como tensión o voltaje y corriente eléctrica mediante el uso de instrumentos.
- Entrevista: elaborada y aplicada a los usuarios del edificio 4 de la Universidad José Antonio Páez.
- Revisión bibliográfica: este instrumento se realizó con el fin de profundizar la información recopilada con los instrumentos anteriores, y se fundamentó en la búsqueda de información documental para afianzar el conocimiento y comprender el comportamiento de eventos.

Y por último, en el presente trabajo se contó con la utilidad de computadoras para conseguir los resultados obtenidos por el análisis gráfico de los datos.

### **3.6 Fases metodológicas**

Se describieron de manera individual, las respectivas acciones, procedimientos, técnicas y actividades a realizar, para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos planteados.

#### **Fase I: “Evaluación de las condiciones de operatividad energética de la planta física (caso edificio 4) de la Universidad José Antonio Páez (UJAP)”**

A través de los diferentes antecedentes seleccionados y apoyados por material bibliográfico sobre el procedimiento de captación de la data energética, se elaboró un esquema operativo de la planta física de la Universidad José Antonio Páez con la finalidad de evaluar el consumo energético actual.

#### **Fase II: “Proposición de alternativas de generación de energía para satisfacer la demanda de la planta física (caso edificio 4) de la UJAP”**

Luego de una exhaustiva captación de datos y documentación, se elaboraron algunas opciones de generación de energías alternativas para cubrir la demanda del edificio 4 de la planta física de la universidad basados en el máximo aprovechamiento energético y menor impacto ambiental.

### **Fase III: “Elaboración de un estudio termo-económico de las alternativas de generación elaboradas”**

Una vez realizadas la evaluación y elaboración de las opciones energéticas, se realizó un estudio termoeconómico con la finalidad hacer la cuantificación de intangibles contables y físicos representados en la destrucción de exergía causada por múltiples factores como: errónea elección de fuentes y distribución de energía, mecanismos, lugar de operación, fallas de operación o erróneos parámetros de operación que incrementas los costos.

#### **3.7 Técnicas de análisis de datos**

En el presente proyecto se realizó una entrevista a los usuarios de la planta física de la Universidad José Antonio Páez, específicamente a los que hacen vida en el edificio 4, donde se pregunta sobre la satisfacción que tienen con relación a los servicios energéticos del edificio, tales como, electricidad, ascensores, aire acondicionado, agua y como tópico especial el suministro de aire comprimido para las aulas/clínicas de la Facultad de Odontología. Dicho instrumento se muestra en el anexo B y los correspondientes resultados en el anexo C..

También se realizó una matriz FODA (fortaleza, oportunidades, debilidades y amenazas) que presenta el sistema de servicio, suministro y generación de energía, equipos y procesos relacionados con la operatividad del edificio 4. Dicha matriz se dispone en el anexo D.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS**

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto, desde la recolección de datos hasta las propuestas de generación de energías alternativas y su viabilidad económica.

#### **4.1 Evaluación de las condiciones de operatividad energética de la planta física (caso edificio 4) de la Universidad José Antonio Páez (UJAP)**

Para realizar la evaluación de las condiciones de operatividad energética del edificio 4 de la Universidad José Antonio Páez se realizó la captación de los datos correspondientes al consumo eléctrico, hídrico y neumático de la planta.

##### **4.1.1 Analisis del diseño**

El edificio 4 de la Universidad José Antonio Páez se construyó en el año 2010, sobre un área de terreno de 4900 m<sup>2</sup>, con un área de construcción de aproximadamente 35000 m<sup>2</sup>, repartidos en siete niveles, desde un semi-sotano, planta baja y cinco pisos enumerados desde el 1 hasta el 5. En el semi-sótano se encuentran una biblioteca central de aproximadamente 2000 m<sup>2</sup> entre almacenes y salas de estudio, cubículos, aulas, baños y oficinas, también se tiene acceso al tablero eléctrico principal del edificio y sala de distribución eléctrica. La planta baja tiene la novedad de albergar las aulas/clínicas de la facultad de odontología, además de aulas, baños, oficinas y centros de documentación, impresión y fotocopiado, en el primer piso se disponen de más aulas, simples y del tipo laboratorios, oficinas y baños, por su parte los pisos desde el 2 hasta el 5, también disponen de aulas, oficinas, baños y laboratorios, pero en el segundo piso funciona un laboratorio clínico con servicios de medicina primaria. En la terraza del edificio 4, funcionan las salas de máquinas de los cuatro ascensores, el sistema de generación de aire comprimido para las clínicas de la facultad de odontología y cuatro plantas de generación de aire acondicionado por sistema de aguas helada (chillers).

El edificio 4 de la universidad José Antonio Páez, fué construido cumpliendo con todas las prácticas de oficios y normas tecnológicas de la época. El edificio 4 se caracteriza por el uso de concreto armado, estructura aporricada de concreto, bloques y tablillas en fachadas. Fué diseñado aplicando magistralmente criterios básicos de arquitectura tropical, incorporando espacios

interiores abiertos, para suministrar ventilación e iluminación natural. Esto ha permitido el funcionamiento de todos los ambientes con acondicionamiento pasivo exceptuando las aulas y el semi-sótano. La edificación posee una excelente orientación respecto al sol y al viento en su fachada principal este, lo cual ha asegurado en todos estos años, excelentes condiciones de temperatura, ventilación natural e iluminación natural en las aulas de clase ubicadas a lo largo de todas las plantas tipos con orientación oeste-este.

#### 4.1.2 Mediciones del consumo eléctrico

El edificio 4 como el resto de la Universidad José Antonio Páez recibe la energía eléctrica del sistema interconectado nacional (SIN) de la corporación eléctrica nacional (CORPOELEC), el cual es el conjunto de instalaciones de un sistema eléctrico que operan interconectadas entre sí, con el objeto de generar, transportar y distribuir energía eléctrica a todo el país. Desde el embalse de Guri, donde se encuentra la central hidroeléctrica Simón Bolívar, se transportan desde la subestación de alta tensión 765 kV hasta la subestación la arenosa del sistema central donde se distribuye entre 400kV para los estados Carabobo, Aragua y parte de Cojedes, como se muestra en la figura 12

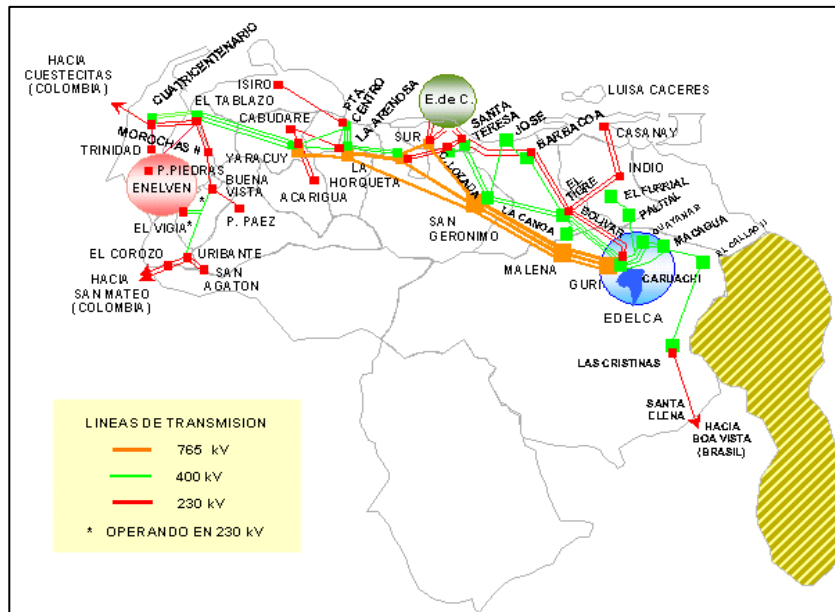


Figura 12: Sistema Interconectado Nacional (SIN)

Fuente: <https://www.sectorelectricidad.com>

El edificio 4 recibe la alimentación eléctrica por medio de dos transformadores de 750 kVA y 1000 kVA, tal como se muestran en las figuras 13 y 14 respectivamente, el primero destinado al consumo de los 7 niveles y ascensores, y el segundo al sistema de generación de aire comprimido

y planta de agua helada (chillers). A nivel general se realizó un estudio base del sistema eléctrico del edificio. Se seleccionaron las áreas en función de los tableros y del consumo.



Figura 13: Medición en el transformador de 750 kVA (fachada sur del edificio 4)  
Fuente: Beltrán – Lavino.



Figura 14: Medición en el transformador de 1000 kVA (fachada sur del edificio 4)  
Fuente: Beltrán – Lavino.

Se determinó la fecha y hora de las mediciones en función de la actividad académica, administrativa y operación de los equipos, dicha medición fué el día 8 de diciembre de 2022 a las 02:30pm, bajo las condiciones ambientales mostradas en la figura 15, obteniéndose los datos de intensidad de corriente y voltaje indicados en la tabla 1.

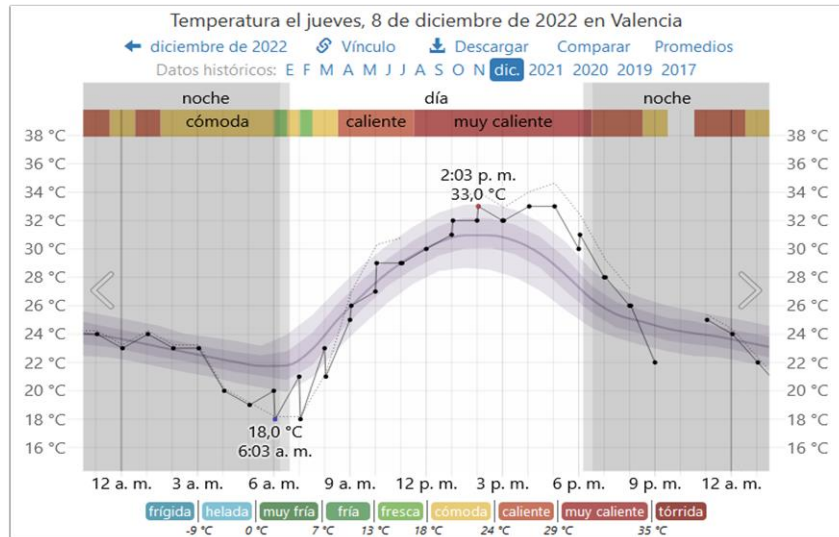


Figura 15: Temperatura y condiciones ambientales del día jueves 08 de Diciembre de 2022

Fuente: <https://weather.com>

Tabla 1: Intensidad de corriente y voltaje en los transformadores de 750 kVA y 1000kVA

| 1000 kVA | Consumo en A (amperios) |        |        |        |        |          |
|----------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|----------|
|          | Cond1                   | Cond 2 | Cond 3 | Cond 4 | Cond 5 | Promedio |
| X1       | 130,2                   | 101,5  | 85,7   | 85,7   | 116,8  | 103,98   |
| X2       | 116,3                   | 116,3  | 148,7  | 132,2  | 120,1  | 126,72   |
| X3       | 126,9                   | 118,5  | 111,6  | 124,3  | 115,5  | 119,36   |
| 750 kVA  | Consumo en A (amperios) |        |        |        |        |          |
|          | Cond1                   | Cond 2 | Cond 3 | Cond 4 | Cond 5 | Promedio |
| X1       | 106,3                   | 102,5  | 125,5  | 98,1   | 103,3  | 107,14   |
| X2       | 121,1                   | 89,2   | -      | -      | -      | 105,15   |
| X3       | 126,3                   | -      | -      | -      | -      | 126,3    |

Fuente: Beltrán – Lavino

Los conductores (cond.) calibre 2/0 van desde el transformador de 750 kVA hacia el tablero principal del edificio ubicado en un sub nivel del semi-sótano como se puede apreciar en la figura 16 y de allí se distribuye la corriente hacia cada nivel, bombas de agua y ascensores, también se realizaron las mediciones en sitio, obteniéndose los resultados contenidos en la tabla 2. Con los equipos de medición de corriente disponibles, por sus dimensiones, no son aptos para

hacer lecturas individuales por conductores debido a que los mismos están empotrados, esto impidió tener unas lecturas detalladas (casos primer piso fase r y tercer piso fase t), sin embargo los resultados obtenidos permiten conocer las características del patrón de consumo de energía del edificio 4.



Figura 16: Tablero principal del edificio 4

Fuente: Beltrán – Lavino

Tabla 2: Medición en tablero principal del edificio 4 - UJAP

| Medición en tablero principal (edificio 4) en A, amperios |      |      |      |          |
|---|------|------|------|----------|
| Nivel   | s    | r    | t    | Promedio |
| semi-sótano   | 83   | 66,5 | 60,5 | 70,0     |
| Planta baja   | 68,6 | 95,6 | 72,8 | 79,0     |
| Primer piso (nivel 1)                                     | 53,6 | -    | 65,5 | 59,6     |
| Segundo piso (nivel 2)                                    | 65,2 | 69,2 | 83   | 72,5     |
| Tercer piso (nivel 3)                                     | 70,8 | 72,5 | -    | 71,7     |
| Cuarto piso (nivel 4)                                     | 72,2 | 68,7 | 61,2 | 67,4     |
| Quinto piso (nivel 5)                                     | 48,6 | 50,4 | 49,3 | 49,4     |

Fuente: Beltrán – Lavino

En base a las mediciones en el transformador de 1000 kVA los conductores calibre 2/0 alimentan el cuarto de generación de aire comprimido (sala de compresores) y las plantas de agua helada (chillers) instalados en la azotea del edificio como se muestra en la figura 17, donde también se realizaron mediciones de consumo eléctrico y voltaje, mostrados en las tablas 3 y 4.



Figura 17: Sistema de agua helada (chillers)

Fuente: Beltrán – Lavino

Tabla 3: Medición en sala de compresores del edificio 4 - UJAP

| Sala de compresores, consumo en A amperios |      |      |      |          |                  |
|--|------|------|------|----------|------------------|
| Compresor                                  | r    | s    | t    | Promedio | voltaje promedio |
| 1  | 27,1 | 24,5 | 21,3 | 24,3     | 380,1 V          |
| 2  | 26,1 | 23,5 | 20,9 | 23,5     | 375,2 V          |
| 3  | 27,3 | 25,6 | 22,4 | 25,1     | 383,6 V          |
| 4  | 26,8 | 26,5 | 22,8 | 25,4     | 386,2 V          |

Fuente: Beltrán – Lavino










Tabla 4: Medición en chillers del edificio 4 - UJAP

| Chillers, consumo en A amperios |       |       |       |          |                  |
|---------------------------------|-------|-------|-------|----------|------------------|
| Chiller                         | r     | s     | t     | Promedio | voltaje promedio |
| 1                               | 265,1 | 235,3 | 266,5 | 255,6    | 421,3 V          |
| 2                               | 262,1 | 229,5 | 258,6 | 250,1    | 417,7 V          |
| 3                               | 258,6 | 228,7 | 256,9 | 248,1    | 415,2 V          |
| 4                               | 263,5 | 230,8 | 261,8 | 252,0    | 419,5 V          |

Fuente: Beltrán – Lavino

Los compresores mostrados en la figura 18 y 19 son utilizados para la generación de aire comprimido usado en las sillas odontológicas de las aulas/clínicas y laboratorios (Facultad de Odontología) son marca schulz modelo SRP 3020 cuyas especificaciones técnicas se muestran en la tabla 5.

Tabla 5: Especificaciones técnicas del compresor SRP 3020 del edificio 4 - UJAP

| MODELO  |                                     | SRP 3020 Compact |       |        |
|---|-------------------------------------|------------------|-------|--------|
|  Pressão de Trabalho     | barg/psig                           | 7,5/109          | 9/131 | 11/160 |
|  Vazão Volumétrica       | pcm                                 | 84               | 74    | 65     |
|   | l/min                               | 2377             | 2094  | 1839   |
|  Método de transmissão   |                                     | Correia          |       |        |
|  Alimentação Compressor  | hp/kW                               | 20/15            |       |        |
|   | Tensão (V)                          | 220/380          |       |        |
|   |                                     | 380/660          |       |        |
|   |                                     | 440/760          |       |        |
| Modo de partida   | Estrela / triângulo                 |                  |       |        |
|  Parâmetros Elétricos    | Fusível NH (A)                      | 80               | 50    | 50     |
|   | Tensão do comando (V)               | 220              | 380   | 440    |
|  Temperatura             | Temperatura ambiente permitida (°C) | 0-40             |       |        |
|  Óleo lubrificante       | Volume (l)                          | 9,6              |       |        |
|   | Denominação                         | Lub Schulz       |       |        |
|  Conexão descarga do ar | BSP (ou Rp)                         | 3/4"             |       |        |
|  Peso compressor (Kg)  | Com reservatório                    | 258              |       |        |
|   | Sem reservatório                    | -                |       |        |

Fuente: <https://www.schulz.com.br>



Figura 18: Compresor schulz SRP 3020 y medición de consumo

Fuente: Beltrán – Lavino



Figura 19: Unidades generadoras de aire comprimido.

Fuente: Beltrán – Lavino

Por su parte las cuatro plantas de agua helada (chillers) marca Trane modelo R tienen una capacidad de 300 TRF (toneladas de refrigeración), poseen compresores de tornillo giratorio helicoidal, utilizando r134a como fluido refrigerante y bombas de condensado de 40 hp, los datos de placa se muestran en la figura 20 y el consumo en el momento de hacer las mediciones en la figura 21.

|   |                             |  |                                   |                            |
|---|-----------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------|
| <b>TRANE</b><br>SERIES R  |                             | SERIAL NUMBER<br>1105N05327                | CRC<br>1076                       | TYPE OF USE<br>OUTDOOR     |
| MODEL NUMBER<br>RTAC 1554 UK0N UAFN N1NY 1TDN NN0F N10N R0EX N  |                             |  |                                   |                            |
| RATED VOLTAGE/HZ/PH<br>460/60/3   | MIN CKT AMPACITY<br>319     | MAX FUSE/ BRKR (1)<br>450                  | MAX O.C. PROT'N<br>400            | REC DUAL ELMNT FUSE<br>400 |
| VOLT UTILIZATION RANGE<br>414-506   | CKT1                        | CKT2                                       | EVAP. HEATER/ CONVEN. OUTLET      | VOLT-AC<br>120             |
|   |                             |  | FACTORY                           | HZ PH VA<br>60 1 1640      |
| CPRSR MTR 1A<br>460   | HZ PH<br>60 3               | RLA<br>139                                 | Y LRA<br>252                      | X-L LRA<br>774             |
| CPRSR MTR 1B  | 3                           |  |                                   |                            |
| CPRSR MTR 2A<br>460   | 60 3                        | 119  | 212                               | 652                        |
| CPRSR MTR 2B  | 3                           |  |                                   |                            |
| FAN MTRS<br>460   | 60 3                        | QTY<br>9                                   | HP EA<br>1.5                      | FLA EA<br>3.0              |
| INSTALLATION, OPERATION, & MAINTENANCE MANUAL<br>RTAC-SUX01E-1EN  | WIRING BOOK<br>570990040200 | REFRIGERANT CHG TYPE/NUMBER<br>R134A       | OIL CHG<br>01L48                  | CKT 1<br>175 LBS           |
|   |                             | CKT 2<br>165 LBS                           | DESIGN PRESSURES<br>HIGH SIDE 350 | LOW SIDE 200               |
| MANUFACTURED UNDER ONE OR MORE OF THE FOLLOWING U.S. PATENTS/<br>CORRESPONDING FOREIGN PATENTS OWNED BY AMERICAN STANDARD INC.  |                             | MIN MARKED DESIGN PSIG FOR ANY REMOTE COND |                                   |                            |
| 4 889 961 4 710 190 4 761 842 5 000 009 5 099 022 6 036 504 5 056 001 6 121 238 6 201 665 6 210 024<br>5 231 846 5 341 678 5 409 146 5 454 738 5 560 480 5 458 631 5 623 794 5 809 750 5 950 443 5 981 713<br>6 224 112 6 341 402 6 207 209 6 382 310 6 331 432 6 237 219 6 868 690 |                             | (1) HACR TYPE CB REQUIRED BY NEC           |                                   |                            |

Figura 20: Datos de placa de las unidades chillers

Fuente: Beltrán – Lavino



Figura 21: Consumo de los chillers y bomba de condensado de 40 hp

Fuente: Beltrán – Lavino


Los ascensores cuya sala de máquinas y tablero eléctrico se muestran en la figura 22, también representan máquinas con un importante consumo de energía eléctrica y el edificio 4 dispone de cuatro unidades marca Sigma con una carga nominal de 8 personas por ascensor (~630 Kg) y con motores de 15 hp en 380V (delta) a 90 m/min (~ 1,5 m/s) y con las características o especificaciones técnicas mostradas en la tabla 6 y durante la medición en planta física se registraron los valores acotados en la tabla 7.



Figura 22: Sala de máquina de ascensores y tablero eléctrico

Fuente: Beltrán – Lavino

Tabla 6: Especificaciones técnicas de los ascensores del edificio 4 - UJAP

|  |          |                |                     |                               |                             |                                      |        |                                    |        |                      |                          |
|---|----------|----------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------|------------------------------------|--------|----------------------|--------------------------|
| <b>Technical Data</b>   |          |                |                     |                               |                             |                                      |        |                                    |        |                      |                          |
| [Standard / EN code]   Speed : 1.0m/s ~ 1.75m/s                                     |          |                |                     |                               |                             |                                      |        |                                    |        |                      |                          |
| Speed (m/s)   | Capacity |                | Motor Capacity (kW) | MCCB Capacity of Building (A) | Power Supply Capacity (kVA) | Lead-in Wire Size (mm <sup>2</sup> ) |        | Earth Wire Size (mm <sup>2</sup> ) |        | Heat Output (kcal/H) | Starting Power (kVA/set) |
|   | Person   | Load(kg)       |                     |                               |                             | Simplex                              | Duplex | Simplex                            | Duplex |                      |                          |
| 1.0   | 6        | 450(480)       | 5                   | 30                            | 15                          | 6                                    | 6      | 6                                  | 6      | 675                  | 6                        |
|   | 7/8      | 550(545)       | 5                   | 30                            | 15                          | 6                                    | 6      | 6                                  | 6      | 825                  | 6                        |
|   | 8        | 630(615)       | 5                   | 30                            | 15                          | 6                                    | 6      | 6                                  | 6      | 945                  | 6                        |
|   | 10/11    | 800(750/685)   | 5                   | 40                            | 15                          | 6                                    | 6      | 6                                  | 6      | 1200                 | 6                        |
|   | 13/15    | 1000(1025/885) | 6.3                 | 40                            | 15                          | 6                                    | 10     | 6                                  | 10     | 1500                 | 7.6                      |
| 1.5   | 6        | 450(480)       | 8                   | 60                            | 15                          | 6                                    | 10     | 6                                  | 10     | 1013                 | 9.6                      |
|   | 7/8      | 550(545)       | 8                   | 60                            | 15                          | 6                                    | 10     | 6                                  | 10     | 1238                 | 9.6                      |
|   | 8        | 630(615)       | 8                   | 60                            | 15                          | 6                                    | 10     | 6                                  | 10     | 1418                 | 9.6                      |
|   | 10/11    | 800(750/685)   | 8                   | 60                            | 15                          | 10                                   | 10     | 10                                 | 10     | 1800                 | 9.6                      |
|   | 13/15    | 1000(1025/885) | 10                  | 60                            | 20                          | 10                                   | 16     | 10                                 | 16     | 2250                 | 12                       |
| 1.75  | 6        | 450(480)       | 9                   | 60                            | 20                          | 6                                    | 10     | 6                                  | 10     | 1181                 | 10.8                     |
|   | 7/8      | 550(545)       | 9                   | 60                            | 20                          | 6                                    | 10     | 6                                  | 10     | 1444                 | 10.8                     |
|   | 8        | 630(615)       | 9                   | 60                            | 20                          | 6                                    | 10     | 6                                  | 10     | 1654                 | 10.8                     |
|   | 10/11    | 800(750/685)   | 9                   | 60                            | 20                          | 10                                   | 10     | 10                                 | 10     | 2100                 | 10.8                     |
|   | 13/15    | 1000(1025/885) | 11.7                | 60                            | 27                          | 10                                   | 16     | 10                                 | 16     | 2625                 | 14                       |

( ) Load is for Malaysia market

Fuente: <https://logicelevadores.com>

Tabla 7: Medición en ascensores del edificio 4 - UJAP

| Ascensores, consumo en A amperios |      |      |      |          |                  |
|-----------------------------------|------|------|------|----------|------------------|
| Ascensores                        | r    | s    | t    | Promedio | voltaje promedio |
| A1                                | 15,3 | 15,8 | 16,3 | 15,8     | 368,8            |
| B1                                | 17,1 | 17,7 | 18,2 | 17,7     | 372,3            |
| A2                                | 18,1 | 17,8 | 18,6 | 18,2     | 378,2            |
| B2                                | 15,1 | 14,8 | 15,5 | 15,1     | 365,4            |

Fuente: Beltrán – Lavino

Por último, pero no menos importante está otro de los servicios que requiere el edificio 4 para su funcionamiento y es el suministro de agua potable. La Universidad José Antonio Páez posee un pozo que surte unos 3,5 l/s del vital líquido a un sistema hidroneumático que posee dos bombas centrífugas IHM-Siemens motor 220V de 10 hp, 72 gpm (4,54 l/s) y 80 m.c.a. En la figura 23 se muestran el tablero eléctrico de control y potencia, así como también las bombas centrífugas a las cuales se les midió el consumo de corriente eléctrica en tablero arrojando los resultado anotados en la tabla 8.

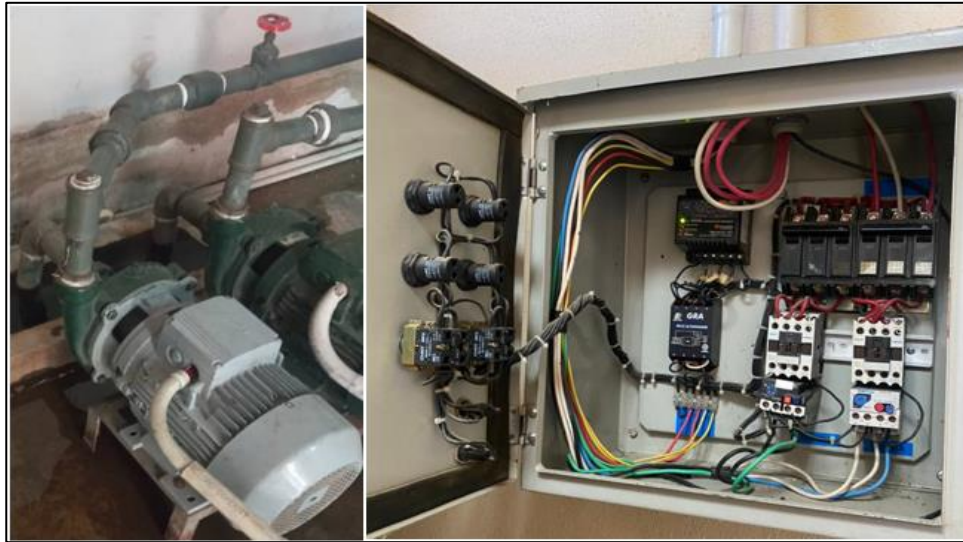


Figura 23: Bombas IHM-Siemens de 10 hp y su tablero de control  
Fuente: Beltrán – Lavino

Tabla 8: Medición en bombas centrífugas del edificio 4 - UJAP

| Bombas, consumo en A amperios |      |      |      |          |                  |
|-------------------------------|------|------|------|----------|------------------|
| Bombas                        | r    | s    | t    | Promedio | voltaje promedio |
| 1                             | 22,5 | 23,4 | 24,6 | 23,5     | 216,3            |
| 2                             | 23,1 | 23,8 | 25,8 | 24,2     | 219,4            |

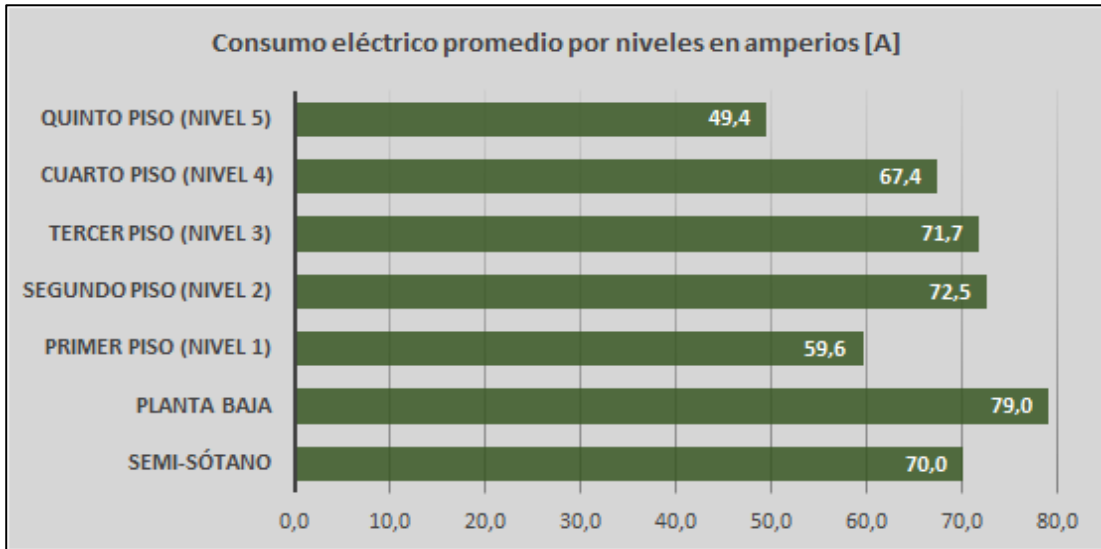
Fuente: Beltrán – Lavino

#### 4.1.3 Diagnóstico del consumo eléctrico

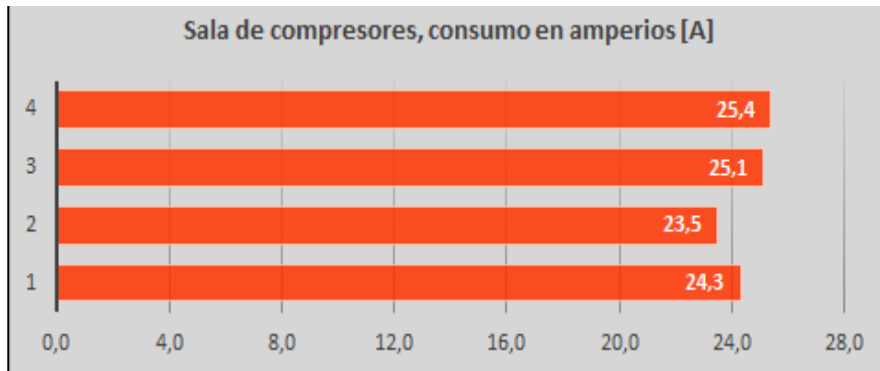
Con base a los resultados de las mediciones, a continuación se realiza un análisis comparativo de la carga integrada de todos los niveles que conforman el edificio 4 mediante un diagrama de barras de la gráfica 1, en el mismo se puede observar que el mayor consumo lo tiene la planta baja con 79,0 A y el menor se da en el quinto nivel con 49,4 A. En promedio los niveles del edificio 4, durante el proceso de medición consumían 67,1 A para realizar diversas actividades en docencia, investigación y administración.

Bajo el mismo criterio también se compararon los consumos de los compresores en la sala de generación de aire comprimido como se muestra en la gráfica 2, encontrándose un consumo promedio de 24,6 A. Posteriormente en las gráficas 3 y 4 se muestran los diagramas comparativos para los consumos de los ascensores y chillers, resultando consumos de 16,7 A y 251,5 A

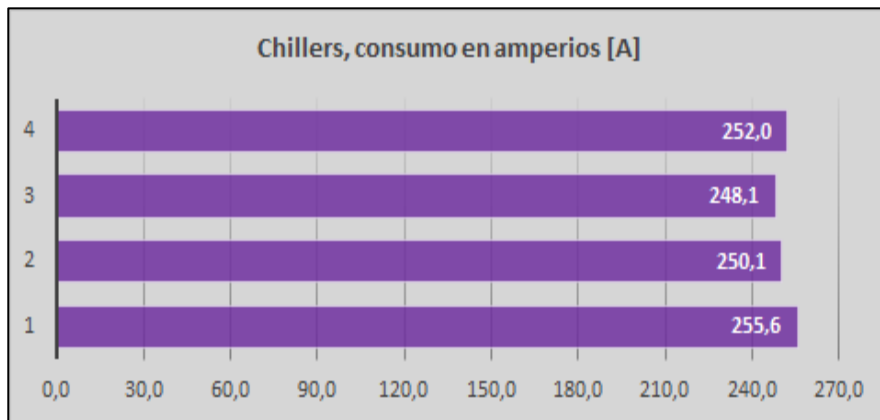
respectivamente. Finalmente en la gráfica 5 se muestran los resultados comparativos del consumo de las bombas centrífugas con un promedio de 23,9 A.



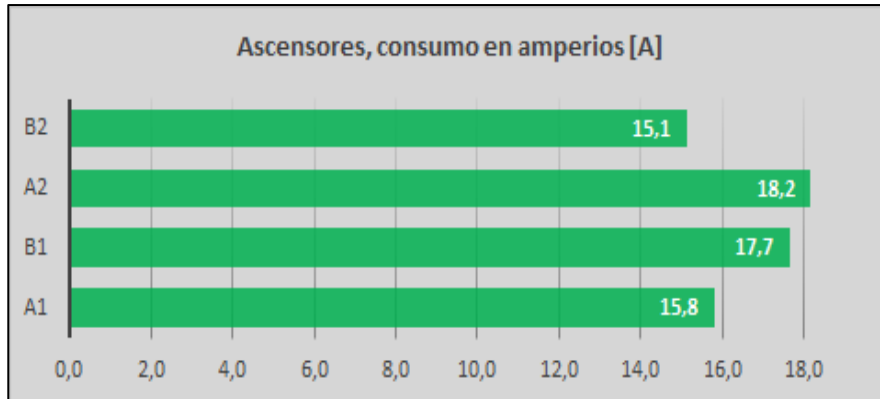
Gráfica 1: Diagrama de barras del consumo en los niveles del edificio 4  
Fuente: Beltrán – Lavino



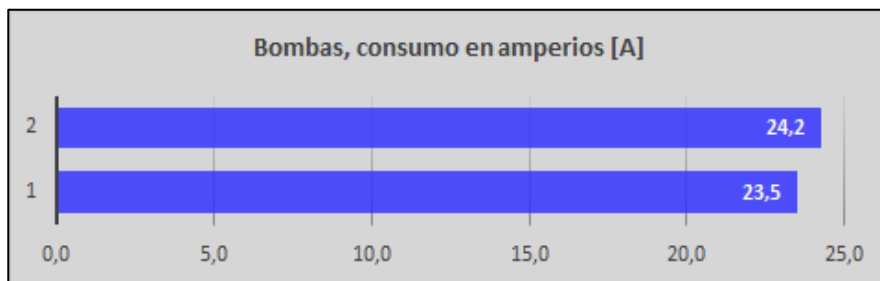
Gráfica 2: Diagrama de barras del consumo en compresores del edificio 4  
Fuente: Beltrán y Lavino



Gráfica 3: Diagrama de barras del consumo en chillers del edificio 4  
Fuente: Beltrán – Lavino



Gráfica 4: Diagrama de barras del consumo en ascensores del edificio 4  
Fuente: Beltrán – Lavino



Gráfica 5: Diagrama de barras del consumo en bombas centrífugas del edificio 4  
Fuente: Beltrán – Lavino

#### 4.1.4 Modelado del consumo

El análisis gráfico de los datos constituye una herramienta de suma importancia, y resulta necesario antes de realizar cualquier estudio cuantitativo sobre la información recopilada. Por un lado, permite describir y resumir la información, lo cual resulta extremadamente útil cuando se cuenta con una serie de datos extensa como es el caso de esta investigación. Por otro lado, posibilita tener una idea de los resultados que se obtendrán en el análisis cuantitativo de los datos, lo que permite detectar inconsistencias o resultados contra intuitivos, así como formarse una primera conceptualización de la relación entre las distintas áreas y sus consumos de energía. En base al diagnóstico del consumo eléctrico durante las mediciones y basado en el inventario de luminarias y tomacorrientes instalados en el edificio 4 de la planta física de la Universidad José Antonio Páez (ver tabla 9) se puede realizar un modelo del consumo por subsistemas, en los cuales se calcula la potencia eléctrica consumida en base al voltaje, según las ecuaciones 34 y 35.

Para sistemas monofásicos:

$$P(kVA) = \frac{P(kW)}{\cos\phi} = \frac{I(A)V(V)}{1000 \cos\phi} \quad \text{Ec. 34}$$

En sistemas trifásicos:

$$P(kVA) = \frac{P(kW)}{\cos\phi} = \sqrt{3} \frac{I(A)V(V)}{1000 \cos\phi} \quad \text{Ec. 35}$$

El edificio 4 de la Universidad José Antonio Páez, cuenta con un inventario de luminarias y tomacorrientes mostrado en la tabla 9 y clasificados según el nivel o piso y el tipo de lámpara dispuesta en las diferentes áreas. Utilizando los factores de potencia según la norma Philips UNE 12464.1, para lámparas fluorescentes y motores eléctricos, presentados en la tabla 10, y usando las ecuaciones 34 y 35, se generan los resultados mostrados en la tabla 11. De esta manera se puede apreciar que para el momento de la medición el edificio estaba consumiendo 465,74 kVA de potencia eléctrica. A esa hora las aulas clínicas y los laboratorios de la facultad de odontología se encontraban totalmente operativos, ésto evidencia el consumo en la sala de compresores, al igual que la mayoría de las oficinas administrativas, pero no las aulas comunes, sólo algunas luminarias estaban encendidas, se estima un 30%, mientras que si contaban con los sistemas de aire acondicionado. Estos resultados se muestran en la tabla 9. A manera de simplificar se asignarán siglas y categorías de subsistemas a cada elemento de consumo, es decir, niveles (NV), compresores ©, chillers (CH), ascensores (AS) y bombas centrífugas (BC).

Tabla 9: Inventario de luminarias y tomacorrientes instalados en el edificio 4

| <b>Semisotano</b>  |                           |                        |          |       |       |
|--------------------|---------------------------|------------------------|----------|-------|-------|
|                    | Salones                   | Oficinas/<br>cubículos | Pasillos | Baños | Total |
| Tomacorrientes     | 62                        | 118                    | 12       | 0     | 192   |
| Luminarias 4x32w   | 136                       | 38                     | 20       | 14    | 208   |
| Luminarias 3x32w   | 0                         | 20                     | 0        | 0     | 20    |
| <b>Planta baja</b> |                           |                        |          |       |       |
|                    | Salones/<br>laboratorios  | Oficinas/<br>cubículos | Pasillos | Baños | Total |
| Tomacorrientes     | 114                       | 82                     | 28       | 0     | 224   |
| Luminarias 4x32w   | 118                       | 36                     | 18       | 28    | 200   |
| Luminarias 3x32w   | 0                         | 14                     | 0        | 0     | 14    |
| <b>Nivel 1</b>     |                           |                        |          |       |       |
|                    | Salones                   | Oficinas/<br>cubículos | Pasillos | Baños | Total |
| Tomacorrientes     | 54                        | 33                     | 6        | 0     | 93    |
| Luminarias 4x32w   | 120                       | 12                     | 18       | 28    | 178   |
| Luminarias 3x32w   | 0                         | 0                      | 0        | 0     | 0     |
| <b>Nivel 2</b>     |                           |                        |          |       |       |
|                    | Salones                   | Oficinas/<br>cubículos | Pasillos | Baños | Total |
| Tomacorrientes     | 60                        | 48                     | 6        | 0     | 114   |
| Luminarias 4x32w   | 116                       | 18                     | 18       | 28    | 180   |
| Luminarias 3x32w   | 0                         | 12                     | 0        | 0     | 12    |
| <b>Nivel 3</b>     |                           |                        |          |       |       |
|                    | Salones /<br>Laboratorios | Oficinas/<br>cubículos | Pasillos | Baños | Total |
| Tomacorrientes     | 180                       | 60                     | 6        | 0     | 246   |
| Luminarias 4x32w   | 96                        | 18                     | 18       | 28    | 160   |
| Luminarias 3x32w   | 0                         | 12                     | 0        | 0     | 12    |
| <b>Nivel 4</b>     |                           |                        |          |       |       |
|                    | Salones /<br>Laboratorios | Oficinas/<br>cubículos | Pasillos | Baños | Total |
| Tomacorrientes     | 72                        | 58                     | 6        | 0     | 136   |
| Luminarias 4x32w   | 78                        | 38                     | 12       | 28    | 156   |
| Luminarias 3x32w   | 0                         | 12                     | 0        | 0     | 12    |
| <b>Nivel 5</b>     |                           |                        |          |       |       |
|                    | Salones /<br>Laboratorios | Oficinas/<br>cubículos | Pasillos | Baños | Total |
| Tomacorrientes     | 108                       | 12                     | 12       | 0     | 132   |
| Luminarias 4x32w   | 92                        | 12                     | 12       | 28    | 144   |
| Luminarias 3x32w   | 0                         | 12                     | 0        | 0     | 12    |

Fuente: Beltrán y Lavino

Tabla 10: Factores de potencia

| Equipment and appliances |                                       |           |       | cos $\phi$ |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------|-------|------------|
| Motor                    | Common induction motor                | loaded at | 0 %   | 0.17       |
|                          |                                       |           | 25%   | 0.55       |
|                          |                                       |           | 50 %  | 0.73       |
|                          |                                       |           | 75 %  | 0.80       |
|                          |                                       |           | 100 % | 0.85       |
| Lamps                    | Incandescent lamps                    |           |       | 1.0        |
|                          | Fluorescent lamps (uncompensated)     |           |       | 0.5        |
|                          | Fluorescent lamps (compensated)       |           |       | 0.93       |
|                          | Discharge lamps                       |           |       | 0.4 to 0.6 |
| Ovens                    | Ovens using resistance elements       |           |       | 1.0        |
|                          | Induction heating ovens (compensated) |           |       | 0.85       |
|                          | Dielectric type heating ovens         |           |       | 0.85       |
| Welding                  | Resistance-type soldering machines    |           |       | 0.8 to 0.9 |
|                          | Fixed 1-phase arc-welding set         |           |       | 0.5        |
|                          | Arc-welding motor-generating set      |           |       | 0.7 to 0.9 |
|                          | Arc-welding transformer-rectifier set |           |       | 0.7 to 0.8 |
| Arc furnace              |                                       |           |       | 0.8        |

Fuente: Norma Philips UNE 12464.1

Ahora bien, si se encontraran todas las lamparas encendidas, el subsistema NV tendría un importante consumo de 329,60 kVA y el total del consumo en el edificio ascendería de 465,74 kVA a 692,01 kVA, esto es la suma de los consumos del total de las luminarias (NV), compresores (C), chillers (CH), ascensores (AS) y bombas (BC). (ver tabla 12)

Tabla 11: Consumo de energía en kVA del edificio 4 – UJAP durante el proceso de medición.

| Subsistemas | Nombre                            | Abreviatura | I(A)   | V(V)   | P(W)      | P(kW)  | cos $\phi$ | P(kVA) |
|-------------|-----------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|--------|------------|--------|
| 1           | Niveles (7)                       | NV          | 67,10  | 110,00 | 51667,00  | 51,67  | 0,5        | 103,33 |
| 2           | Compresores (4)                   | C           | 24,60  | 381,27 | 64904,35  | 64,90  | 0,85       | 76,36  |
| 3           | Plantas de agua helada (chillers) | CH          | 251,50 | 418,42 | 182052,45 | 182,05 | 0,85       | 214,18 |
| 4           | Ascensores (4)                    | AS          | 16,70  | 371,17 | 42893,89  | 42,89  | 0,85       | 50,46  |
| 5           | Bombas centrifugas (2)            | BC          | 23,90  | 220,00 | 18192,68  | 18,19  | 0,85       | 21,40  |
|             |                                   |             |        |        |           |        |            | 465,74 |

Fuente: Beltrán – Lavino

Tabla 12: Consumo de energía en kVA del edificio 4 con todas las lámparas encendidas

| Luminarias       | total | P(W)   | P(kW)   | cos $\phi$ | P(kVA) |
|------------------|-------|--------|---------|------------|--------|
| Luminarias 4x32w | 1226  | 156928 | 156,928 | 0,5        | 313,86 |
| Luminarias 3x32w | 82    | 7872   | 7,872   | 0,5        | 15,74  |
|                  |       |        |         |            | 329,60 |

Fuente: Beltrán - Lavino

Si se considera que el edificio opera desde las 07:00am hasta las 06:00pm (11 horas) los 465,74 kVA se pueden transformar en kWh de la siguiente forma:

$$P(kWh) = P(kVA) t(h) \cos\phi = (465,74 \text{ kVA})(11h)0,8 = 4.098,51 \text{ kWh}$$

Con este cálculo y manteniendo jornadas de 5 días por semana, se podía hacer una estimación del consumo de los kWh de potencia eléctrica anual.

$$P_{anual}(kWh) = \left(4098,51 \frac{kWh}{día}\right) \left(5 \frac{días}{semana}\right) \left(48 \frac{semanas}{año}\right) = 983642,40 \frac{kWh}{año}$$

Esto es un poco menos de 1 GWh de consumo de energía anual, del edificio 4 de la Universidad José Antonio Páez. El edificio cuenta con siete niveles, cada uno con un área de 2100m<sup>2</sup>, lo que significan unos 14700m<sup>2</sup> totales de construcción, con ello se puede estimar el consumo anual del edificio 4 en kWh/m<sup>2</sup>, esto es:

$$P_{anual} \left(\frac{kWh}{m^2}\right) = \frac{983642,40 \text{ kWh}}{14700 \text{ m}^2} = 66,91 \frac{kWh}{m^2}$$

Una fuente de información sobre consumo de energía en edificios de Estados Unidos y Europa, es el estudio desarrollado por Butler (2008), donde concluye que un edificio se debe considerar común si su consumo anual de energía está entre 160 y 300 kWh/m<sup>2</sup>, de bajo consumo si es menor a 160 kWh/m<sup>2</sup> y de ultra bajo consumo si es menor a 50 kWh/m<sup>2</sup>, lo que sugiere que para efectos de la investigación el edificio 4 se considera de bajo consumo energético. Estos cálculos están reflejados en la tabla 13.

Tabla 13: Consumo de energía en kWh/año del edificio 4 – UJAP.

| P (kVA)             | cosϕ    | P(kW)      | t (h)                  | P(kWh/día)   | días/semana                                       | P(kWh/semana) | semanas/año | P(kWh/año) |
|---------------------|---------|------------|------------------------|--------------|---|---------------|-------------|------------|
| 465,74              | 0,80    | 372,59     | 11,00                  | 4098,49      | 5,00  | 20492,47      | 48,00       | 983638,59  |
| Área m <sup>2</sup> | Niveles | Área total | p(kWh/m <sup>2</sup> ) | t (h):       | 7:00 am a 06:00 pm                                |               |             |            |
| 2100                | 7       | 14700      | 66,91                  | semanas/año: | 52 sem/año - 2 sem de agosto - 2 sem de diciembre |               |             |            |

Fuente: Beltrán - Lavino

#### 4.2 Proposición de alternativas de generación de energía para satisfacer la demanda de la planta física (caso edificio 4) de la UJAP.

Se conocen como energías alternativas a las que también se hacen llamar energías renovables. ¿Pero energías alternativas, a qué? En lo que se refiere a este proyecto de investigación, sería a la energía eléctrica y el eventual uso de plantas de generación por combustibles fósiles que emiten gases de efecto invernadero.

#### 4.2.1 Propuesta de generación de potencia eólica.

El campus de la Universidad José Antonio Páez se encuentra ubicado en el valle de San Diego, municipio del estado Carabobo, como se muestra en la figura 24, donde se puede evidenciar la posición del edificio 4 respecto al terreno y la dirección norte geográfico, así como también la dirección del viento que según la información en de [www.whitelightskyes.com](http://www.whitelightskyes.com) mantiene un promedio de 6 m/s en dirección 78° al NO.



Figura 24: Ubicación del edificio 4 en el Valle de San Diego y dirección del viento

Fuente: Beltrán – Lavino

Para efectos del aprovechamiento de la energía del viento, 6 m/s es muy bajo, sin embargo, se podría usar la azotea del edificio 4 como base para la instalación de los aerogeneradores, por ello se debe estimar la velocidad del viento a dicha altura. De acuerdo con los datos extraídos del plano arquitectónico del edificio, el último nivel se encuentra a +25,15m sobre el nivel del suelo y usando la ecuación 23:

$$V(h) = V_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha = \left( 6 \frac{m}{s} \right) \left( \frac{25,15 m}{2,14 m} \right)^{0,27} = 11,66 \frac{m}{s} \approx 12 \frac{m}{s}$$

Donde  $V(h)$  es la velocidad del viento a una altura determinada en m/s,  $h_0$  es una altura de referencia en m, en este caso es la altura a la cual se encuentra el nivel 1, según datos

arquitectónicos,  $h$  es la altura donde se desea colocar el aerogenerador, también en  $m$  y  $\alpha$  es un factor de corrección que depende del terreno. (ver tabla 14)

Tabla 14: Parametro  $\alpha$  sobre la rugosidad del terreno

| Tipo de terreno                       | $\alpha$    |
|---------------------------------------|-------------|
| Liso (mar, arena, nieve)              | 0,10 - 0,13 |
| Rugosidad moderada (hierba, cultivos) | 0,13 - 0,20 |
| Rugoso (bosques, edificaciones)       | 0,20 - 0,27 |
| Muy rugoso (ciudades)                 | 0,27 - 0,40 |

Fuente: Guzmán H. (2014)

Con esta velocidad de 12 m/s y la potencia consumida durante el proceso de medición 465,74 kVA (372,59 kW) se puede seleccionar un aerogenerador eólico de tres palas usando la base de datos de [www.thewindpower.net](http://www.thewindpower.net) y en consecuencia el modelo AW500-47 del fabricante estadounidense Aeronautic Wind Power cuya curva característica se muestra en la figura 25 y los datos técnicos básicos en la figura 26. En el anexo A, se encuentran mayores detalles de este aerogenerador. Según el concepto de la distribución de Weibull y la función de probabilidad de la potencia del aerogenerador seleccionado, existe la misma probabilidad de que la velocidad del viento disminuya 3 m/s por debajo de 12 m/s, llegando a 9 m/s, a que aumente 3 m/s por encima de 12 m/s hasta los 15 m/s, esto significa que la potencia entregada por el aerogenerador variará desde los 325 kW hasta los 495 kW entre 9 m/s y 15 m/s respectivamente, como se indica en la figura 27. Con este rango de potencias se satisface la demanda del edificio 4, basados en los datos de consumo en el momento de la medición. Cabe destacar que de realizarse la selección del aerogenerador para cubrir la demanda total de energía del edificio 4, donde en un hipotético caso estarían encendidas todas las luminarias y el resto de los subsistemas trabajando en su punto nominal, se deben agregar 226,27 kVA en el subsistema NV para alcanzar los 329,6 kVA de consumo, 23,64 kVA en el subsistema C, para llegar a 100 kVA, 10,82 kVA para obtener los 225 kVA de consumo nominal en los chillers,(CH), 24,54 kVA en AS para 75 kVA de consumo nominal y 16,10 kVA para llegar a 37,5 kVA en el subsistema de bombas centrífugas BC. Éste resultado se muestra en la tabla 15.

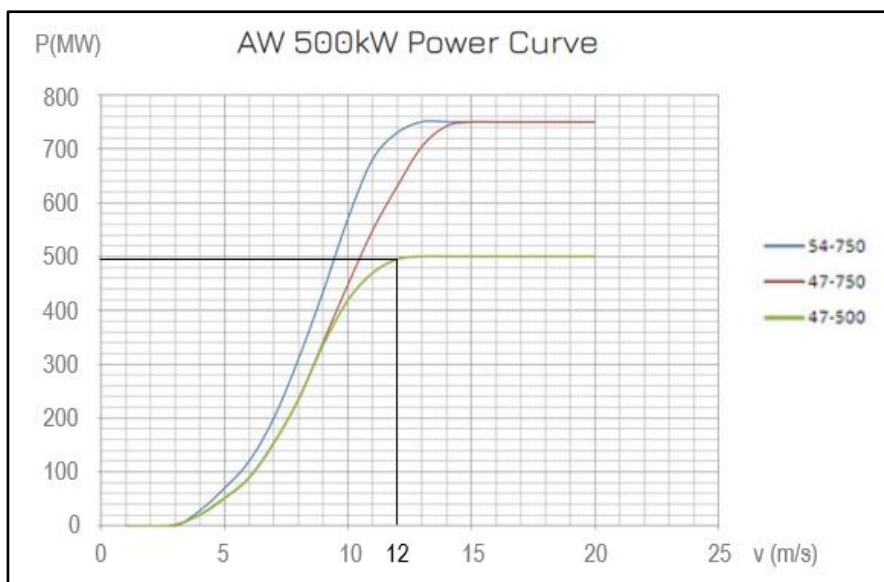


Figura 25: Potencia en MW contra la velocidad del viento en m/s a la altura del cubo (hub) para el modelo AW500-47

Fuente: [www.thewindpower.net](http://www.thewindpower.net)

AW 500kW Wind Turbine - 47m rotor

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Datos generales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricante : <a href="#">Aeronautica Windpower (Etats-Unis)</a></li> <li>• Turbina eólica : 47-500</li> <li>• Fuente</li> <li>• Potencia : 500 kW</li> <li>• Diámetro : 47 m</li> <li>• En venta</li> <li>• Clase de viento : IEC Ib-IEC IIa</li> <li>• Compatible offshore : no</li> <li>• Área de barrido : 1 735 m<sup>2</sup></li> <li>• Densidad de potencia : 3.47 m<sup>2</sup>/kW</li> <li>• Número de palas : 3</li> <li>• Limitación de potencia : Stall</li> </ul> | <p><b>Rotor</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad máxima del rotor : 25,3 vuelta/min</li> <li>• Vitesse minimale de vent : 3,5 m/s</li> <li>• Vitesse nomimale de vent : 13,5 m/s</li> <li>• Vitesse maximale de vent : 20 m/s</li> </ul>   |
| <p><b>Masas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Masa de la góndola : 22 toneladas</li> <li>• Masa del rotor : 15,2 toneladas</li> </ul>   | <p><b>Generador</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo : ASYNC</li> <li>• Número : 1</li> <li>• Velocidad de salida máxima del generador : 1500 vuelta/min</li> <li>• Tensión de salida : 690 V</li> </ul> <p><b>Torre</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Altura mínima de la góndola : 50 m</li> <li>• Altura máxima de la góndola : 65 m</li> </ul> |

Figura 26: Datos técnicos básicos del aerogenerador para el modelo AW500-47

Fuente: [www.thewindpower.net](http://www.thewindpower.net)



Figura 27: Rango de potencias según la distribución de Weibull para el modelo AW500-47

Fuente: www.thewindpower.net

Tabla 15: Demanda de energía total del edificio 4 – UJAP

| Subsistemas | Nombre                            | Abreviatura | P(kVA) |
|-------------|-----------------------------------|-------------|--------|
| 1           | Niveles (7)                       | NV          | 329,60 |
| 2           | Compresores (4)                   | C           | 100,00 |
| 3           | Plantas de agua helada (chillers) | CH          | 225,00 |
| 4           | Ascensores (4)                    | AS          | 75,00  |
| 5           | Bombas centrífugas (2)            | BC          | 37,50  |
|             |                                   |             | 767,10 |

Fuente: Beltrán – Lavino

Para un consumo de 767,10 kVA (613,68 kW) el modelo AW500-47 pareciera estar limitado, sin embargo los aerogeneradores no trabajan solos, los mismos pueden conectarse con un banco de batería que almacenarían la carga mientras el consumo es de bajo a muy bajo y esta energía se puede usar en el momento en que los datos de regulación de la máquina así lo necesiten. Existen varios tipos de baterías para energía eólica, basadas en distintos químicos que realizan la conversión necesaria para almacenar la energía. Desde las de plomo ácido que son económicas pero muy tóxicas, también existen las de níquel-hidruro metálico, que cuentan con una alta capacidad de almacenamiento, las de níquel-cadmio, más caras que las anteriores, pero tienen un alto nivel de rendimiento y las de ión – litio que son altamente eficientes y no pierden niveles de capacidad significativos, son fácilmente reciclables y de bajo mantenimiento. La compañía

Norwatt (www.norwatt.es) es líder mundial en el proceso de aprovechamiento de la energía eólica y fotovoltaica utilizando sistemas de rectificadores, baterías e inversores y presenta el modelo The Intensium® Max 20 High Energy, un contenedor de baterías de ión – litio de 2,5 MWh, lo que significa que para almacenar la cantidad de 12,3 MWh por tres días sin generación eólica, se necesitarían 5 contenedores de éstos. Esto es:

$$P(kVA) t(h) \cos\phi = (465,74 kVA) \left(11 \frac{h}{día}\right) 0,8 = 4.098,51 \frac{kWh}{día} = 4,098 MWh$$

$$N_{contenedores} = \frac{4,098 \frac{MWh}{día} (3 día)}{2,5 MWh} \sim 5 contenedores$$

En el anexo E, se encuentran las especificaciones técnicas de banco de baterías de ión – litio the Intensium® Max 20 high energy de la empresa Norwatt y en el anexo F, el digrama típico de una instalación eólica.

#### 4.2.2 Propuesta de generación de potencia fotovoltaica.

Como ya se mencionó en el apartado 2.2.7, la energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado celda fotovoltaica, y aplicar un sistema de éste tipo conlleva algunos cálculos que van desde la estimación del consumo hasta la selección del número de paneles fotovoltaicos.

##### 4.2.2.1 Cálculos preliminares.

###### Consumo:

Para tomar en cuenta el diseño basado en el requerimiento de energía más exigente del edificio 4 de la Universidad José Antonio Páez, se considerará la demanda de energía total mostrada en la tabla 15, es decir:

$$E_{Carga total} \left(\frac{kWh}{día}\right) = P(kVA) t(h) \cos\phi = (767.10 kVA)(11h)0,8 = 6750,48 kWh$$

###### Eficiencia:

La energía que se genera por los paneles debe tomar en consideración las pérdidas de energía anticipadas en el sistema (cableado, control de carga, inversor y baterías). Las eficiencias que se utilizan en estas instalaciones se muestran en la tabla 16.

Tabla 16: Pérdidas de energía en términos de la eficiencia en instalaciones fotovoltaicas

|   |  |
|---|--|
| $\eta_B$ : eficiencia debido al rendimiento de la batería que típicamente puede oscilar entre 75% y un 90%.   | $\eta_I$ : eficiencia debido al rendimiento del inversor utilizado (si lo hay), es decir, principalmente en instalaciones de 220 V. Los valores por defecto suelen oscilar entre el 85% y el 98%.                    |
| $\eta_R$ : eficiencia debido al rendimiento del regulador empleado. Suele depender de la tecnología utilizada, pero, si no se conoce, se escoge un valor por defecto del 90%. | $\eta_X$ : eficiencia que considera las pérdidas no contempladas: temperatura, pérdidas por dispersión de parámetros y suciedad, las pérdidas por errores en el seguimiento del punto de máxima potencia y cableado. |

Fuente: Avila1, S.S (2017)

Para el caso en estudio la eficiencia total será:

$$\eta_{total} = \eta_B \eta_R \eta_I \eta_X = (0,8)(0,85)(0,95)(0,95) = 0,614$$

#### 4.2.2.2 Energía a generar.

Este dimensionamiento implica calcular la energía total necesaria a generar (considerando la estimación de pérdidas) y la cantidad de paneles y la forma de conexión (serie y paralelo). El coeficiente FS es un factor de seguridad para afrontar la degradación de potencia y prestaciones de los diferentes componentes del sistema fotovoltaico.

$$E_{gen} = FS \left( \frac{E_{Carga\ total}}{\eta_{total}} \right) = 1,1 \left( \frac{6750,48 \frac{kWh}{día}}{0,614} \right) = 12093,7 \frac{kWh}{día}$$

Para continuar con el cálculo se necesita conocer algunos parámetros climáticos del valle de San Diego, por ejemplo las horas solares pico (HSP) mostrados en la figura 28, la potencia nominal del panel (Wp) y su voltaje nominal (Vp) mostrados en la figura 29 que corresponde al panel solar del fabricante Trina solar modelo Vertex N (670W)

Este cálculo se realiza dividiendo el valor de radiación solar de la peor época del año sobre 1 kW/m<sup>2</sup> y de esta forma se obtienen las horas solares pico para la producción de energía.

$$HSP = \frac{4,7 \frac{kWh}{m^2\ día}}{1 \frac{kW}{m^2}} = 4,7 \frac{h}{día}$$

$$E_{panel} = W_p HSP = 670 W \left( 4,7 \frac{h}{día} \right) = 3149 \frac{Wh}{día}$$

Como criterio de cálculo de desea generar un 10% de energía extra para prevenir el riesgo de generación en días nublados, esto es:

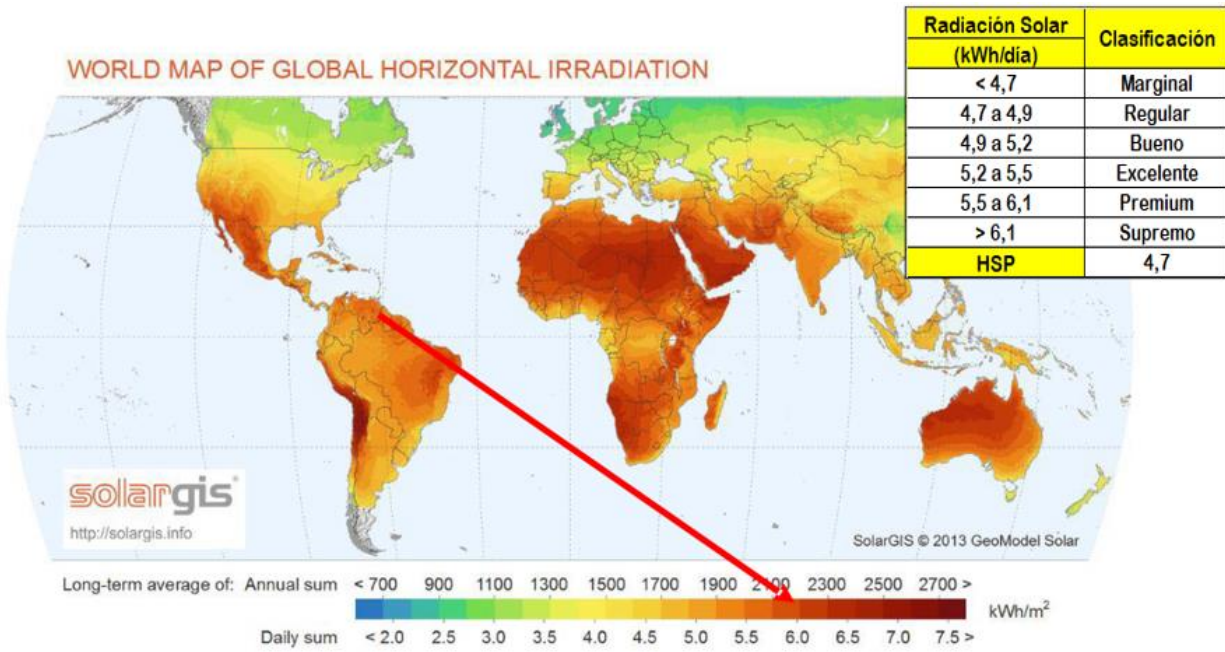


Figura 28: Irradiancia solar horizontal y HSP del municipio San Diego, Carabobo. Venezuela  
 Fuente: <https://solargis.com>

| Comprehensive Products and System Certificates    |        |   |       |       |       |
|---|--------|---|-------|-------|-------|
|   |        | IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716<br>ISO 9001: Quality Management System<br>ISO 14001: Environmental Management System<br>ISO14064: Greenhouse Gases Emissions Verification<br>ISO45001: Occupational Health and Safety Management System |       |       |       |
| <b>BACKSHEET MONOCRYSTALLINE MODULE</b>           |        |   |       |       |       |
| <b>ELECTRICAL DATA (STC)</b>                      |        |   |       |       |       |
| Peak Power Watts- <b>P<sub>MAX</sub></b> (Wp)*    | 650    | 655   | 660   | 665   | 670   |
| Power Tolerance- <b>P<sub>MAX</sub></b> (W)       | 0 ~ +5 |   |       |       |       |
| Maximum Power Voltage- <b>V<sub>MPP</sub></b> (V) | 37.4   | 37.6  | 37.8  | 38.0  | 38.2  |
| Maximum Power Current- <b>I<sub>MPP</sub></b> (A) | 17.39  | 17.43   | 17.47 | 17.51 | 17.55 |
| Open Circuit Voltage- <b>V<sub>oc</sub></b> (V)   | 45.3   | 45.5  | 45.7  | 45.9  | 46.1  |
| Short Circuit Current- <b>I<sub>sc</sub></b> (A)  | 18.44  | 18.48   | 18.53 | 18.57 | 18.62 |
| Module Efficiency $\eta_m$ (%)                    | 20.9   | 21.1  | 21.2  | 21.4  | 21.6  |

Figura 29: Panel solar modelo Trina solar modelo Vertex N (670W)

Fuente: <https://www.trinasolar.com>

$$E_{extra} = 10\% E_{gen} = 0.1 \left( 12093,7 \frac{kWh}{día} \right) = 1209,4 \frac{kWh}{día}$$

Ahora la cantidad de paneles solares se determina como:

$$N_{paneles} = \frac{E_{gen} + E_{extra}}{E_{panel}} = \frac{\left( 12094,7 \frac{kWh}{día} + 1209,4 \frac{kWh}{día} \right) \left( \frac{1000 W}{1 kW} \right)}{3149 \frac{Wh}{día}} = 4425 \text{ paneles}$$

Cada panel tiene un área de 3,106 m<sup>2</sup>, lo que significa que para instalar 4425 paneles de necesitan 13745,6 m<sup>2</sup> (13,75 hectáreas), el 20% del área del campus de la Universidad José Antonio Páez, esto es 15000 m<sup>2</sup> que no se disponen, lo que significa que no hay lugar para realizar dicha construcción.

#### 4.2.2.3 Generación fotovoltaica por subsistemas.

Como se demostró en el ítem anterior, colocar un sistema fotovoltaico para generar todo el consumo de energía del edificio 4, no es viable, sin embargo, como ya se había realizado una división por subsistemas en el apartado 4.1.4, se puede realizar los cálculos para el número de paneles por subsistema y dichos resultados se muestran en la tabla 17.

Tabla 17 : Número de paneles solares Vertex N (670W) por subsistema del edificio 4

| Subsistema   | P(W)             | P(kW)         | P(kVA)        | E <sub>carga total</sub> (kWh/día) | E <sub>gen</sub> (kWh/día) | N <sub>paneles</sub> |
|--------------|------------------|---------------|---------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| NV           | 51667,00         | 51,67         | 329,60        | 2900,48                            | 5196,30                    | 1815                 |
| C            | 64904,35         | 64,90         | 100,00        | 880,00                             | 1576,55                    | 551                  |
| CH           | 182052,45        | 182,05        | 225,00        | 1980,00                            | 3547,23                    | 1239                 |
| AS           | 42893,89         | 42,89         | 75,00         | 660,00                             | 1182,41                    | 413                  |
| BC           | 18192,68         | 18,19         | 37,50         | 330,00                             | 591,21                     | 207                  |
| <b>Total</b> | <b>359710,37</b> | <b>359,71</b> | <b>767,10</b> | <b>6750,48</b>                     | <b>12093,69381</b>         | <b>4225</b>          |

Fuente: Beltrán – Lavino

Una vez más tomando en cuenta que el área de los paneles es de 3,106 m<sup>2</sup>, se puede calcular el área que ocuparía la instalación por subsistema. (ver tabla 18). Debido a que el área de la azotea del edificio 4 es de 2100 m<sup>2</sup> se puede observar que allí se pueden instalar los paneles para atender los subsistemas de Compresores, Ascensores o Bombas centrífugas, sin embargo, basado en las recientes innovaciones sobre los edificios fotovoltaicos, y la muy buena exposición al sol de la fachada sur del edificio 4, se disponen de 1800 m<sup>2</sup> adicionales, luego el total disponible, solo en el edificio es de 3900 m<sup>2</sup>, esto es suficiente para esos tres subsistemas (C, AS y BC) que en conjunto suman 3640 m<sup>2</sup>, traducidos en 1170 paneles.

Tabla 18: Área de ocupación por los paneles fotovoltaicos por subsistema del edificio 4

| Subsistema | N <sub>paneles</sub> | Área (m <sup>2</sup> ) | Área (hectáreas) |
|------------|----------------------|------------------------|------------------|
| NV         | 1815                 | 5637,88                | 5,64             |
| C          | 551                  | 1710,52                | 1,71             |
| CH         | 1239                 | 3848,67                | 3,85             |
| AS         | 413                  | 1282,89                | 1,28             |
| BC         | 207                  | 641,45                 | 0,64             |

Fuente: Beltrán – Lavino

Existen posibles zonas para la ubicación de los paneles fotovoltaicos, pero que estarían sujetas a decisiones administrativas por la ocupación de espacios destinados al estacionamiento de vehículos como se muestra en la figura 30, y otras de áreas verdes cuya gestión involucraría a entes gubernamentales y medioambientales. En cada caso representarían una importante área en m<sup>2</sup> para la implementación del proyecto. En el anexo G se muestra un esquema de la instalación típica.

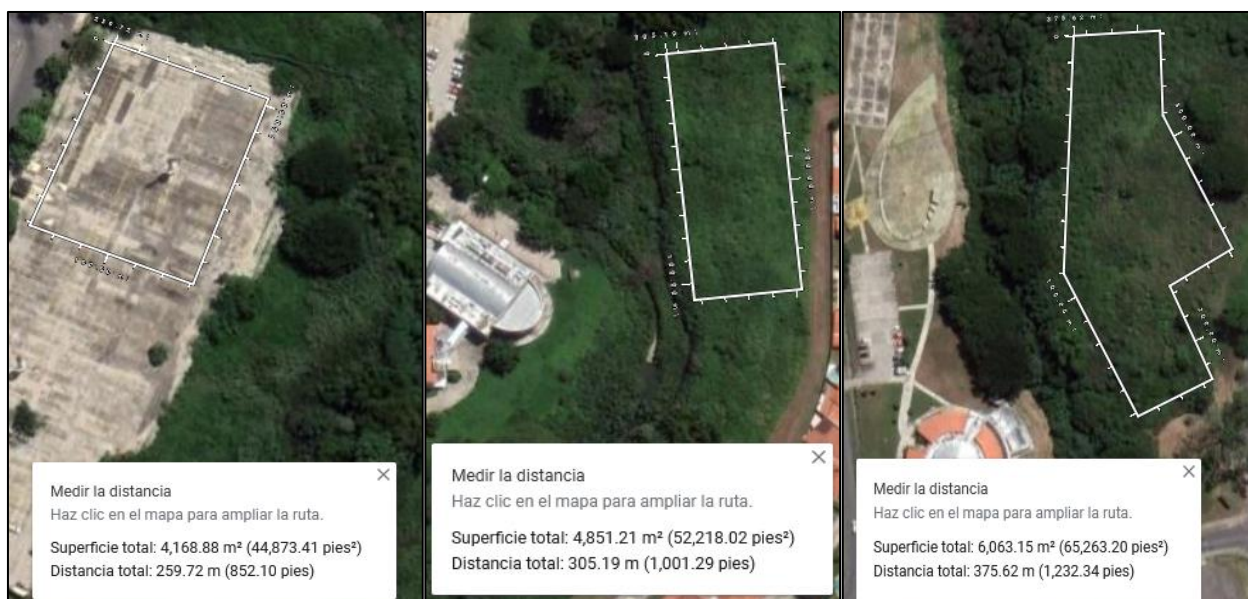


Figura 30: Áreas opcionales para la ubicación de los paneles fotovoltaicos

Fuente: Beltrán – Lavino

### 4.3 Elaboración de un estudio termo-económico de las alternativas de generación

Generar energía eléctrica sin que exista un proceso de combustión o una etapa de transformación térmica supone, desde el punto de vista ambiental, un procedimiento muy favorable por ser limpio, exento de problemas de contaminación, donde se suprimen radicalmente

el impacto originado por los combustibles durante su extracción, transformación, transporte y combustión, lo que beneficia a la atmósfera, el agua, la fauna y la vegetación, sin embargo, los proyectos de instalación de sistemas de generación de energías alternativas conllevan una inversión inicial elevada, sólo favorable si se toma en cuenta el beneficio a largo plazo, la sustentabilidad y el ahorro económico por el pago del servicio eléctrico a los proveedores de energía.

#### **4.3.1 Análisis termoeconómico del sistema de generación eólico.**

El aerogenerador propuesto es el modelo AW500-47 del fabricante estadounidense Aeronautic Wind Power con una potencia de punta de 500 kW para vientos superiores a los 12 m/s. Este aerogenerador permitirá suplir en su totalidad la energía requerida por los subsistemas del edificio 4 de la Universidad José Antonio Páez.

##### **4.3.1.1 Costos asociados a la instalación del sistema de generación eólico.**

El proyecto contempla obras cíviles, infraestructura eléctrica y el aerogenerador. En el segmento de las obras cíviles, se requiere de cimentación y edificios auxiliares, para la infraestructura eléctrica se puede clasificar en: Sistema de transporte de energía eléctrica, transporte de tensión (voltaje) y el sistema eléctrico en general y de control. En la tabla 19 se describe la inversión inicial para tal proyecto.

Por otra parte, aunque estos costos se han ido reduciendo con el tiempo, el aerogenerador necesita estar bajo control las 24 horas del día, los 7 días de la semana, por lo que siempre debe haber alguien supervisando en un centro de control, ya sea en el propio edificio o remotamente. Además, el personal de mantenimiento deberá estar in situ para arreglar posibles fallas en la operación del aerogenerador. Todo ello implica un costo que, no obstante, no es muy significativo respecto al precio total del proyecto, esto es alrededor de un 5% de la inversión inicial, anual según lo destacan Pérez et. al (2021).

Tabla 19: Inversión inicial para el proyecto de generación de energía eólica

|                              | <b>Unidades</b> | <b>Unitario (USD)</b> | <b>Total (USD)</b> |
|------------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|
| <b>OBRA CÍVIL</b>            |                 |                       |                    |
| Cimentación                  | 1               | 5500                  | 5500               |
| Edificios auxiliares         | 1               | 11300                 | 11300              |
| Varios                       | 1               | 3000                  | 3000               |
| SUBTOTAL                     |                 |                       | <b>19800</b>       |
| <b>EQUIPOS PRINCIPALES</b>   |                 |                       |                    |
| Aerogenerador AW500-47       | 1               | 400000                | 400000             |
| Instalación y grúas          | 1               | 35000                 | 35000              |
| Transporte                   | 1               | 24000                 | 24000              |
| Sistema de control           | 1               | 15000                 | 15000              |
| Equipos eléctricos internos  | 1               | 12000                 | 12000              |
| SUBTOTAL                     |                 |                       | <b>486000</b>      |
| <b>ELECTRICIDAD</b>          |                 |                       |                    |
| Cableado                     | 1               | 8000                  | 8000               |
| Subestación de tensión media | 1               | 12000                 | 12000              |
| Varios                       | 1               | 2000                  | 2000               |
| SUBTOTAL                     |                 |                       | <b>22000</b>       |
|                              |                 | <b>TOTAL</b>          | <b>527800</b>      |

Fuente: Beltrán – Lavino

#### 4.3.1.2 Costos de operación, mantenimiento y administración fijos del sistema de generación eólico.

Los aerogeneradores eólicos tienen equipamiento móvil, por lo cual requieren supervisión continua y mantenimiento frecuente. La supervisión de la operación se realiza en las computadoras de control, las cuales capturan y almacenan los parámetros relevantes como temperaturas, valores eléctricos, vibraciones y alarmas. En la operación normal no hay mucha actividad, pero la aparición de fallas y anomalías es común en máquinas rotativas. Para tareas de operación y mantenimiento el personal mínimo que se debe tener es de 3 personas:

1 jefe de planta (ingeniero) encargado de coordinar la operación y mantenimiento.

1 técnico operador

1 técnico administrativo

Y los costos mínimos estimados de este personal para Venezuela se representan en la tabla 20 a continuación:

Tabla 20: Costo del personal mínimo para la operación del sistema de generación de energía eólica

| Ítem | Descripción                | Cantidad | Sueldo mensual (USD) | Sueldos/año | Aporte patronal | Costo anual (USD) |
|------|----------------------------|----------|----------------------|-------------|-----------------|-------------------|
| 1    | Jefe de planta (ingeniero) | 1        | 400                  | 14          | 20%             | 6720              |
| 2    | Opredor técnico            | 1        | 200                  | 14          | 20%             | 3360              |
| 3    | Técnico administrativo     | 1        | 150                  | 14          | 20%             | 2520              |
|      |                            |          |                      |             |                 | 12600             |

Fuente: Beltrán – Lavino

En los costos de mantenimiento se incluyen los preventivos, correctivos, más la renovación de partes electrónicas en aerogeneradores. Para parques eólicos se suele realizar un contrato de mantenimiento y de garantía de disponibilidad con el fabricante de los aerogeneradores. Estos contratos pueden realizarse en base a la energía producida por el parque o en valores fijos por aerogenerador anuales. Para efectos del presente trabajo se estiman en el 10% del costo de instalación y se muestran en la tabla 21.

Tabla 21: Costo de mantenimiento del sistema de generación de energía eólica

| Costo de mantenimiento            | Capacidad 615 kW | Costo anual (USD) |
|-----------------------------------|------------------|-------------------|
| Contrato de mantenimineto externo | 1                | 52780             |

Fuente: Beltrán – Lavino

Y finalmente los costos de administración se resumen en los costos de vigilancia, transporte, seguros, mantenimiento de terreno y áreas comunes, y otros, que sin duda ya están incluidos en los costos operacionales de la universidad José Antonio Páez, por esa razón no se tomaran en cuenta para los efectos.

#### 4.3.1.3 Costos relativos al consumo de energía eléctrica en la planta física.

En base a los datos obtenidos en la página web <https://es.globalpetrolprices.com>, el precio de la electricidad en Venezuela para negocios es de 0,203 USD/kWh, tal como se muestra en la tabla 22 y el costo relativo al disfrute de dicho servicio es:

$$\text{Costo elect} = 0,203 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} (615 \text{ kWh}) = 124,84 \text{ USD}$$

Y al año serían:

$$\text{Costo elect/ anual} = 124,84 \text{ USD} (11\text{h})(5 \text{ días})(48 \text{ semanas}) = 329577,6 \text{ USD/año}$$

Tabla 22: Tabla 22: Precio de la corriente eléctrica en Venezuela (Junio 2022).

| Venezuela precios de la electricidad   |           |              |
|--|-----------|--------------|
| Venezuela precios de la electricidad   | Casa, kWh | Negocio, kWh |
| Venezuelan Bolivar   | 1.093     | 1.283        |
| U.S. Dollar  | 0.173     | 0.203        |
| Venezuela, junio 2022:<br>Hogares: El precio es 0.173 USD por kWh. El precio promedio en el mundo es 0.160 USD por kWh.<br>Negocio: El precio es 0.203 USD por kWh. El precio promedio en el mundo es 0.165 USD por kWh. |           |              |

Fuente: [www.es.globalpetrolprices.com](http://www.es.globalpetrolprices.com)

#### 4.3.1.4 Flujo termo-económico del sistema de generación de energía eólico.

Una vez estimados los costos energéticos del proyecto, se procede a realizar el balance utilizando la ecuación 28:

$$C^P + C^C = C^{CA} + Z^O + Z^M$$

$$C^P + 329577,6 \text{ USD} = 527800 \text{ USD} + 12600 \text{ USD} + 52780 \text{ USD}$$

$$C^P = 263602,4 \text{ USD}$$

Ahora se calculan los parámetros termo-económicos con las ecuaciones 32 y 33:

$$f^C = \frac{C^C}{C^{CA}} = \frac{329577,6 \text{ USD}}{527800 \text{ USD}} = 0,624$$

$$f^Z = \frac{Z}{C^{CA}} = \frac{65380 \text{ USD}}{527800 \text{ USD}} = 0,123$$

y

$$r = \frac{C^P - C^C}{C^C} = \frac{263602,4 \text{ USD} - 329577,6 \text{ USD}}{329577,6 \text{ USD}} = -0,20$$

Estos parámetros fijan un valor comparativo contra otros escenarios de generación de energía alternativa, pero se debe tener en cuenta que tanto más bajos sean  $f^C$  y  $f^Z$ , mayor será el

aprovechamiento de la energía del sistema y que r no puede ser un numero positivo, ya que esto conllevaría a la imposibilidad de aplicación del sistema de generación de potencia alternativo.

#### 4.3.2 Análisis termoeconómico de sistema de generación fotovoltaico.

El año 2020 estuvo marcado por la pandemia mundial y el consiguiente costo humano y económico que tuvo la propagación del virus CoVID-19. Sin embargo, un punto positivo fue la adaptación de las cadenas de suministro de generación de energía renovable y el crecimiento récord en nuevas implementaciones. Tampoco se alteró la tendencia en la continua disminución de los costos de la energía solar y eólica. En 2020, según [www.bloomberg.com](http://www.bloomberg.com), el costo nivelado promedio ponderado global de la electricidad (LCOE) según de las nuevas adiciones de capacidad de energía eólica terrestre disminuyó en un 13 %, en comparación con 2019. Durante el mismo periodo, el LCOE de la energía eólica marina se redujo en un 9 % y el de la energía solar fotovoltaica (FV) a escala de servicios públicos en un 7 % como se muestra en la figura 31.

Ésto es apenas una de las razones por las cuales se escogió a la generación de energía fotovoltaica como una de las propuestas en el presente proyecto. Considerando la disposición geográfica del edificio 4 y las diferentes áreas disponibles para la instalación de los paneles solares, inicialmente se evalúan los costos pertinentes a la inversión en cada subsistema, dejando base para la toma de desiciones adiministrativas de lugar.

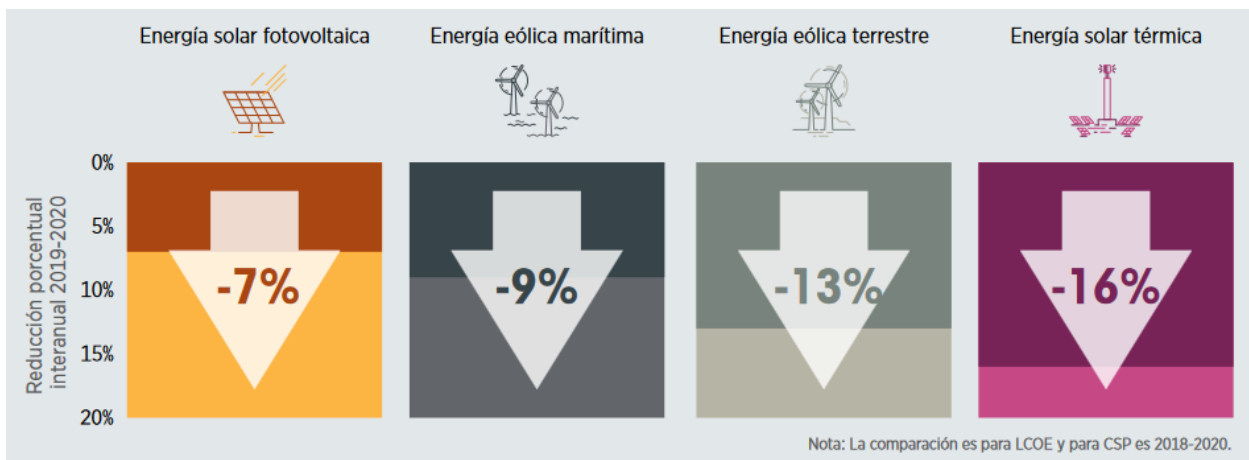


Figura 31: LCOE promedio ponderado global de tecnologías de energía solar y eólica a escala de servicios públicos recién puestas en servicio, 2019-2020

Fuente: Base de datos de costos de energías renovables de IRENA

#### **4.3.2.1 Costos asociados a la instalación del sistema de generación fotovoltaico.**

Cada uno de los módulos que se instala en un sistema de generación de energía fotovoltaico va sujeto a una estructura metálica y anclado a tierra con columnas empotradas llamadas hincas. Este proceso lo llevan a cabo maquinarias especializadas, que colocan con precisión milimétrica estas hincas que sostendrán posteriormente los paneles solares que van apoyados en unas guías que permiten a cada bloque de paneles moverse en forma independiente aprovechando de este modo la energía solar de forma uniforme. Para llevar a cabo esta labor, se necesitan de maquinarias de sujeción e izamiento que trasladen los exoesqueletos (soporte de los paneles) y los ubique por medio de GPS (Global Positioning System, por sus siglas en inglés), una red de conductores eléctricos, edificios auxiliares para la ubicación del banco de baterías, transformadores y sistemas de regulación y control. En la tabla 23 se describe la inversión inicial para tal proyecto.

De acuerdo con Pérez et. al (2021) la inversión inicial de un proyecto de generación fotovoltaica FV es función del número de paneles solares y está asociado al costo unitario de los mismos, en el caso de los paneles Vertex-N (670W) del fabricante chino Trina solar con un costo de 182,00 USD por unidad, los porcentajes asociado se muestran en la tabla 24.

#### **4.3.2.2 Costos de operación, mantenimiento y administración fijos del sistema de generación fotovoltaico.**

De manera similar a como se estimaron los costos asociados al sistema de generación de potencia eólica, también se deben calcular los referentes al sistema de generación fotovoltaico.

Los costos operacionales trata del personal propio de operación del aerogenerador como se puede apreciar en la tabla 25, que incluye a los operadores de turno (sala de control y operadores de campo principalmente) y al personal de mantenimiento que realiza tareas de mantenimiento siguiendo diagramas de turno. Todas las tecnologías requieren personal de operación si bien en algunos casos la misma se puede realizar en forma remota. Este costo depende de la cantidad de personas designadas a la actividad y su nivel de especialización. Así mismo es función de:

- La cantidad de máquinas o La localización de la planta. o Los auxiliares de planta.
- El grado de automatización.
- Regímenes legales y sindicales de contratación de mano de obra.
- Régimen operacional de la unidad.

Tabla 23: Inversión inicial para el proyecto de generación de energía fotovoltaica

|                               | Subsistemas   |               |               |               |               |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                               | NV            | C             | CH            | AS            | BC            |
| <b>OBRA CÍVIL</b>             |               |               |               |               |               |
| Acondicionamiento del terreno | 33000         | 10000         | 22500         | 8000          | 3800          |
| Exoesqueletos                 | 16500         | 5000          | 11500         | 4000          | 2000          |
| Edificios auxiliares          | 11300         | 11300         | 11300         | 11300         | 11300         |
| Varios                        | 6000          | 3000          | 5000          | 3000          | 3000          |
| <b>SUBTOTAL</b>               | <b>66800</b>  | <b>29300</b>  | <b>50300</b>  | <b>26300</b>  | <b>20100</b>  |
| <b>EQUIPOS PRINCIPALES</b>    |               |               |               |               |               |
| Paneles vertex -N (670W)      | 330359        | 100230        | 225518        | 75173         | 37586         |
| Baterías                      | 165000        | 50000         | 115000        | 40000         | 20000         |
| Instalación                   | 99108         | 30069         | 67655         | 22552         | 11276         |
| Transporte                    | 66072         | 20046         | 45104         | 15035         | 7517          |
| Sistema de control            | 20000         | 6000          | 13500         | 5000          | 3000          |
| Equipos eléctricos internos   | 10000         | 3000          | 6800          | 2300          | 1150          |
| <b>SUBTOTAL</b>               | <b>690538</b> | <b>209345</b> | <b>473577</b> | <b>160059</b> | <b>80529</b>  |
| <b>ELECTRICIDAD</b>           |               |               |               |               |               |
| Cableado                      | 20000         | 6000          | 14000         | 5000          | 2500          |
| Sala de contro - regulación   | 17000         | 6000          | 12000         | 4000          | 2200          |
| Varios                        | 6000          | 2500          | 5000          | 2000          | 1500          |
| <b>SUBTOTAL</b>               | <b>43000</b>  | <b>14500</b>  | <b>31000</b>  | <b>11000</b>  | <b>6200</b>   |
| <b>TOTAL</b>                  | <b>800338</b> | <b>253145</b> | <b>554877</b> | <b>197359</b> | <b>106829</b> |

Fuente: Beltrán – Lavino

Tabla 24: Porcentaje por ítem de la inversión inicial para el proyecto de generación de energía fotovoltaica

|                               | Subsistemas |   |    |    |    |
|-------------------------------|-------------|---|----|----|----|
|                               | NV          | C | CH | AS | BC |
| <b>OBRA CÍVIL</b>             |             |   |    |    |    |
| Acondicionamiento del terreno | 10%         |   |    |    |    |
| Exoesqueletos                 | 5%          |   |    |    |    |
| Edificios auxiliares          | 4%          |   |    |    |    |
| Varios                        | 0,5%        |   |    |    |    |
| <b>EQUIPOS PRINCIPALES</b>    |             |   |    |    |    |
| Paneles vertex -N (670W)      | -           |   |    |    |    |
| Baterías                      | 50%         |   |    |    |    |
| Instalación                   | 30%         |   |    |    |    |
| Transporte                    | 20%         |   |    |    |    |
| Sistema de control            | 6%          |   |    |    |    |
| Equipos eléctricos internos   | 3%          |   |    |    |    |
| <b>ELECTRICIDAD</b>           |             |   |    |    |    |
| Cableado                      | 5%          |   |    |    |    |
| Sala de contro - regulación   | 4%          |   |    |    |    |
| Varios                        | 3%          |   |    |    |    |

Fuente: Beltrán – Lavino

Tabla 25: Costos operacionales del personal para el proyecto de generación de energía fotovoltaica

| Subsistema                 | Costo unitario (USD) | NV    | C     | CH    | AS    | BC    |
|----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Jefe de planta (ingeniero) | 400                  | 400   | 400   | 400   | 400   | 400   |
| Operador técnico           | 200                  | 600   | 200   | 200   | 200   | 200   |
| Técnico administrativo     | 150                  | 300   | 150   | 150   | 150   | 150   |
|                            | Sub Total (USD)      | 1300  | 750   | 750   | 750   | 750   |
|                            | Total (USD)          | 21840 | 12600 | 12600 | 12600 | 12600 |

Fuente: Beltrán y Lavino

Según Delgado S. y Seekatz A. (2018), el costo de mantenimiento se estima en un 20% de la inversión inicial y el mismo se muestra en la tabla 26.

Tabla 26: Costos de mantenimiento anual para el proyecto de generación de energía fotovoltaica

| Subsistema          | NV     | C     | CH     | AS    | BC    |
|---------------------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Mantenimiento anual | 160068 | 50629 | 110975 | 39472 | 21366 |

Fuente: Beltrán – Lavino

#### 4.3.2.3 Flujo termo-económico del sistema de generación de energía fotovoltaico.

Se utilizan las ecuaciones 29, 32 y 33 para calcular los parámetros termoeconómicos del sistema de generación fotovoltaica para los subsistemas del edificio 4 de la Universidad José Antonio Páez, mostrados en la tabla 27 y se obtiene que ninguno de los planteamientos para la generación de energía solar es viable, dado que tres de los subsistemas arrojan el parámetro CP negativo, lo que significa que es más costoso generar energía fotovoltaica que usar la energía eléctrica que el proveedor de servicio aporta desde el SIN, y los otros dos subsistemas con valores de CP positivos, resultan con un valor de r positivos, es decir, que el costo asociado a los productos de la generación fotovoltaica son más elevados que el correspondiente consumible eléctrico externo.

Tabla 27: Parámetros termoeconómicos de los subsistemas de generación fotovoltaica

| Subsistema | NV       | C        | CH       | AS       | BC       |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $C^P$      | 652668   | -13203   | 348875   | -80147   | -188782  |
| $f^C$      | 0,411798 | 1,301931 | 0,593966 | 1,669941 | 3,085082 |
| $f^Z$      | 0,227288 | 0,249774 | 0,222708 | 0,263843 | 0,317945 |
| r          | 0,98     | -1,04    | 0,06     | -1,24    | -1,57    |

Fuente: Beltrán – Lavino

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El edificio 4 de la Universidad José Antonio Paéz posee cinco subsistemas operativos clasificados en porcentaje, según el consumo de corriente eléctrica y la operatividad en: niveles (43%), sala de compresores (13%), plantas de agua helada (29%), ascensores (10%) y sistema de bombas centrífugas (5%). Destacándose que el mayor consumo de energía se debe a la iluminación y aparatos eléctricos a 110v y 220V dentro del edificio.

Los usuarios del edificio 4 tienen una percepción acerca del suministro de energía eléctrica y otros servicios que va de regular a deficiente, notándose mayor énfasis en el servicio de aire acondicionado donde el 50% opina que el sistema es de deficiente a regular, mientras que un 62,5% cree que el suministro de aire comprimido tiene las mismas características.

En el instante de tomar las mediciones eléctricas el consumo de energía del edificio era del 60,7% de la energía nominal de los subsistemas, el resto de la energía no aprovechada es producto de la inoperatividad de aulas y oficinas, así como también el uso de los baños y la baja carga térmica producto de la matrícula estudiantil en ese momento.

La sala de compresores trabaja en el límite de su punto nominal, esto se demuestra con el consumo de corriente eléctrica en el momento de la medición y la lectura de la presión de trabajo, por lo que se recomienda instalar al menos dos unidades compresoras adicionales.

La instalación eléctrica de los sistemas de agua helada (chillers) no permite seccionar o limitar el suministro de aire acondicionado por aulas, más si por piso, sin embargo, esta distribución condiciona a los chillers a permanecer trabajando y consumiendo energía de forma innecesaria.

El valle de San Diego, zona geográfica donde se encuentra el edificio 4 de la Universidad José Antonio Paéz, posee buenas condiciones climáticas en cuanto a velocidad del viento e irradiación solar, para instalar sistemas alternativos de generación de energía eólica y fotovoltaica respectivamente.

Se recomienda realizar estudios futuros con el apoyo de la facultad de arquitectura para determinar la viabilidad de la modernización del edificio 4 hacia un edificio fotovoltaico, ubicando paneles solares en las fachadas y aprovechando la altura de más de 25m y la exposición al sol de alrededor 100m horizontales en las horas solares pico (HSP).

La inversión inicial para la puesta en operación del sistema de generación de energía eólica es de 527.800 USD, mientras que para el sistema de generación de energía fotovoltaica asciende a 1.912.548 USD, sin embargo, la adecuación de uno de estos sistemas conllevaría a las sustentabilidad del edificio, lo que se traduce ganancia en tiempo y calidad del servicio de educación de manera continua sin importar las caídas de tensión (voltaje) o interrupción del suministro eléctrico externo.

Una vez realizado el estudio termoeconómico, resultó que solo es viable aplicar el sistema de generación de potencia eólico, debido a que su equivalente fotovoltaico genera pérdidas de energía en comparación con el suministrado por el proveedor del servicio externo.

La técnica FODA permitió el análisis del problema de ineficiencia eléctrica utilizando las fortalezas y debilidades de la institución, relacionadas con sus oportunidades y amenazas. Luego es posible tratar de explotar las fortalezas, superar las debilidades, aprovechar oportunidades y defenderse contra las amenazas a fin de establecer una política de inversión para la factibilidad del proyecto de generación de energías alternativas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abreu, J. (2021). Propuesta de mejora al sistema de gestión de mantenimiento de los activos de la planta física de la UCAB Extensión Guayana. Trabajo Especial de Grado. Universidad Católica Andrés Bello. Caracas. República Bolivariana de Venezuela.
- Arias, F. (2006) El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología científica (6<sup>ta</sup> edición) Venezuela. Editorial Episteme
- Avila1, S.S (2017), Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. *Revista Científica*, 30 (3), 263-277. Universidad Industrial Francisco José de Caldas. Bogotá. Colombia.
- Butler, D. (2008), Architects of a low-energy future. *Nature* 452, 520-523.
- Chirinos, P., Flores, J. y Martínez A. (2018). Sistema de generación de energía a través de una turbina hidrogenadora como alternativa para el ahorro energético en el municipio Machiques de Perijá del Estado Zulia. Trabajo Especial de Grado. Universidad Privada Dr. Rafael Bellosó Chacín. Maracaibo. República Bolivariana de Venezuela.
- Çengel, Y. (2.007). Transferencia de calor y masa. (3ra edición). México. Editorial McGraw- Hill.
- Çengel, Y. y Boles, M. (2.006). Termodinámica. (5ta edición). México. Editorial
- Delgado S. y Seekatz A. (2018). Estudio de la Aplicación de Paneles Fotovoltaicos como fuente de energía alterna, en desarrollos de viviendas de interés social. Trabajo Especial de Grado. Universidad Católica Andrés Bello. Caracas. República Bolivariana de Venezuela.
- Dubs R. y Siso E (2002). El Proyecto Factible: una modalidad de investigación. *Sapiens. Revista Universitaria de Investigación*. UPEL. Caracas. República Bolivariana de Venezuela.
- Fernández-Díez P. (2003) Termodinámica. Universidad de Cantabria. Santander. España.
- Gúzman H. (2014). Selección de aerogenerador - e. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México DF. México.
- Hernández, R (2003): Métodos de la investigación, Investigación estadística. Editorial Mc Graw Hill: México, D.F.
- Hernández R., Fernández C., Baptista P., (2014) “Metodología de la Investigación”. 6ta edición. McGraw – Hill. México DF. México.
- Hurtado, I. Toro J. (2005) Paradigmas y métodos de investigación en tiempos de cambios. 5ta edición. Episteme Consultores Asociados C.A. Valencia. Venezuela

- Martínez, J. (2004). Análisis exergético de nuevos ciclos de potencia. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Monagas E. y Hornebo V. (2016). Evaluación de la eficiencia energética institucional en las dependencias de la Universidad de Carabobo sedes Aragua y Carabobo. IX Jornadas Nacionales y I Jornadas Internacionales de Investigación del IUT Valencia. Valencia. República Bolivariana de Venezuela.
- Pérez et.al (2021) Delving Into Thermoconomics: A Brief Theoretical Comparison of Thermo-economic Approaches for Simple Cooling Systems. Sec. Quantitative Sustainability Assessment Volume 2 – 2021. <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.656818>
- Philips, (2002), Norma internacional sobre iluminación para interiores. UNE 12464.1. pp.
- Siem Geovanni y Sosa María Eugenia (2021), Auditoría energética de una edificación universitaria patrimonial. Caso de estudio: Facultad de arquitectura y urbanismo de la Universidad Central de Venezuela. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción de la FAU-UCV. Universidad Central de Venezuela. Caracas. República Bolivariana de Venezuela.
- Sosa, M. (2017). Habitabilidad y eficiencia energética en clima tropical: aplicación en instituciones educativas y oficinas” Trabajo de ascenso. Universidad Central de Venezuela. Caracas. República Bolivariana de Venezuela.
- Tamayo y Tamayo, Mario (1997) El Proceso de la Investigación científica. Editorial Limusa S.A. México.1997.
- Véliz M. y Arredondo J. (2009) Aspectos teóricos sobre los tipos de muestreo. Trabajo Especial de Grado. Universidad de Oriente. Cumaná. República Bolivariana de Venezuela.

## ANEXOS

## Anexo A: Modelo AW500-47 del fabricante estadounidense Aeronautic Wind Power



[Home](#)

[Goss Video](#)

[About](#)

[Products](#)

[Applications](#)

[Services](#)

[Network](#)

[Contact Us](#)

### AW 500kW Wind Turbine - 47m rotor

#### Blades

3 blades, upwind orientation  
Fiberglass reinforced polyester

#### Rotor

Power regulation: Active Stall Regulation (ASR)  
Rotor size: 47m diameter (154')  
Rotor speed: 25.3 rpm nominal  
nominal Swept area: 1735 m<sup>2</sup> (9,197 ft<sup>2</sup>)  
Tilt angle: 4°  
Coning angle: 3° Forward  
Blades length: 21.0 m  
Tip speed: 62-63 m/s (139-141 mph) at full load  
Pitch angle: ASR  
Pitch bearings: Slew ring (4-point ball bearings)  
Air brake, normal: Pitch to -20°, actuated by the ASR System  
Air brake, emergency: Pitch to -85° fail safe, activated by accumulators in the hub  
Nominal Pitch Speed: 7.5° /sec  
Mechanical brake: A fail-safe type disk brake  
Brake torque: 1.8 times of nominal torque (approx.)  
RPM max. value: 1600 (50Hz) / 1920 (60 Hz), on high-speed shaft

#### Generator

Nominal Electric Power: 200/500kW (dual wound)  
Generator: Closed, asynchronous induction, 4/6 pole DW, IP54 or 55  
Generator speed: 1000/1500 (50 Hz) / 1200/1800 (60 Hz) rpm at sync. speed  
Loss in generator: Approx. 3% at full load  
Generator cut-in: Thyristor controlled gradual cut-in  
Grid connection: 690V  
Connection Relay: SEL 547 Protective Relay (standard)

#### Operational

Yaw motors: 4 pcs. w/electrical brakes built in  
Yaw brakes: 4 pcs. disc hydraulic brakes  
Yaw bearing: Slew ring (4-point ball bearings)  
Cut-in wind speed: 3m/s (6.7 mph), based on 10 min average  
Cut-out wind speed: 25 m/s (56 mph), based on 2 min average  
Survival Speed: 70 m/s (157 mph), (based on 50 year extreme)

Controller: Mita-Teknik

Op. Temp. Range: -30oC to +55oC (Very Low and Very High Temp options available)

Noise: 100 dBA Sound Power (at Nacelle)

### Monopole Tower

Conical Steel, White: 50, 55, and 65m hub heights

Nacelle Access: Interior tower ladder through locked door

Surface Treatment: In accordance with ISO 12944

Laser inspected flanges, ultrasonic inspection of raw materials/welds

### SCADA System

local and remote surveillance and operation

### Safety Features

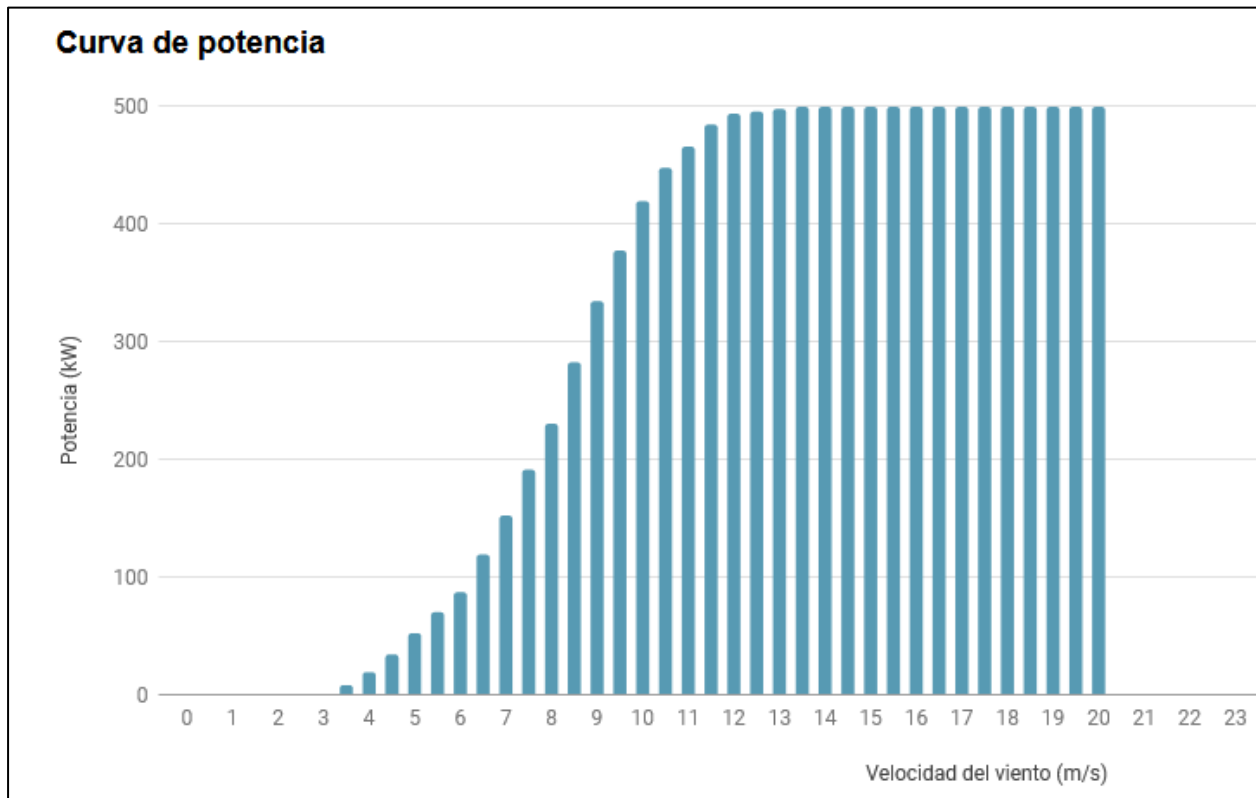
Induction generator has inherent anti-islanding

Fail-safe hydraulic disk brake

Grid monitoring for shutdown and operational performance

Fall protection ladder system

Lightning protection



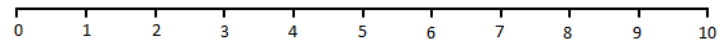
**Anexo B: Instrumento: dirigida a los usuarios, personal de ambiente y mantenimiento de la planta física de la Universidad José Antonio Páez (edificio 4)**

**INSTRUMENTO: ENCUESTA DIRIGIDA A LOS USUARIOS, PERSONAL DE AMBIENTE Y MANTENIMIENTO DE LA PLANTA FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ (EDIFICIO 4)**

**¿cómo describiría su satisfacción con los servicios energéticos de la planta física de la universidad José Antonio Páez?**

|   | Muy deficiente | Deficiente | Regular | Bueno | Muy bueno | No aplica |
|---|----------------|------------|---------|-------|-----------|-----------|
|   | 1              | 2          | 3       | 4     | 5         | 0         |
| Servicio de electricidad                            |                |            |         |       |           |           |
| Servicio de ascensores                              |                |            |         |       |           |           |
| Servicio de agua                                    |                |            |         |       |           |           |
| Servicio de aire acondicionado                      |                |            |         |       |           |           |
| Servicio de aire comprimido (aplica aulas/clínicas) |                |            |         |       |           |           |

Valore globalmente el servicio energético de la planta física de la Universidad José Antonio Páez (caso edificio 4)

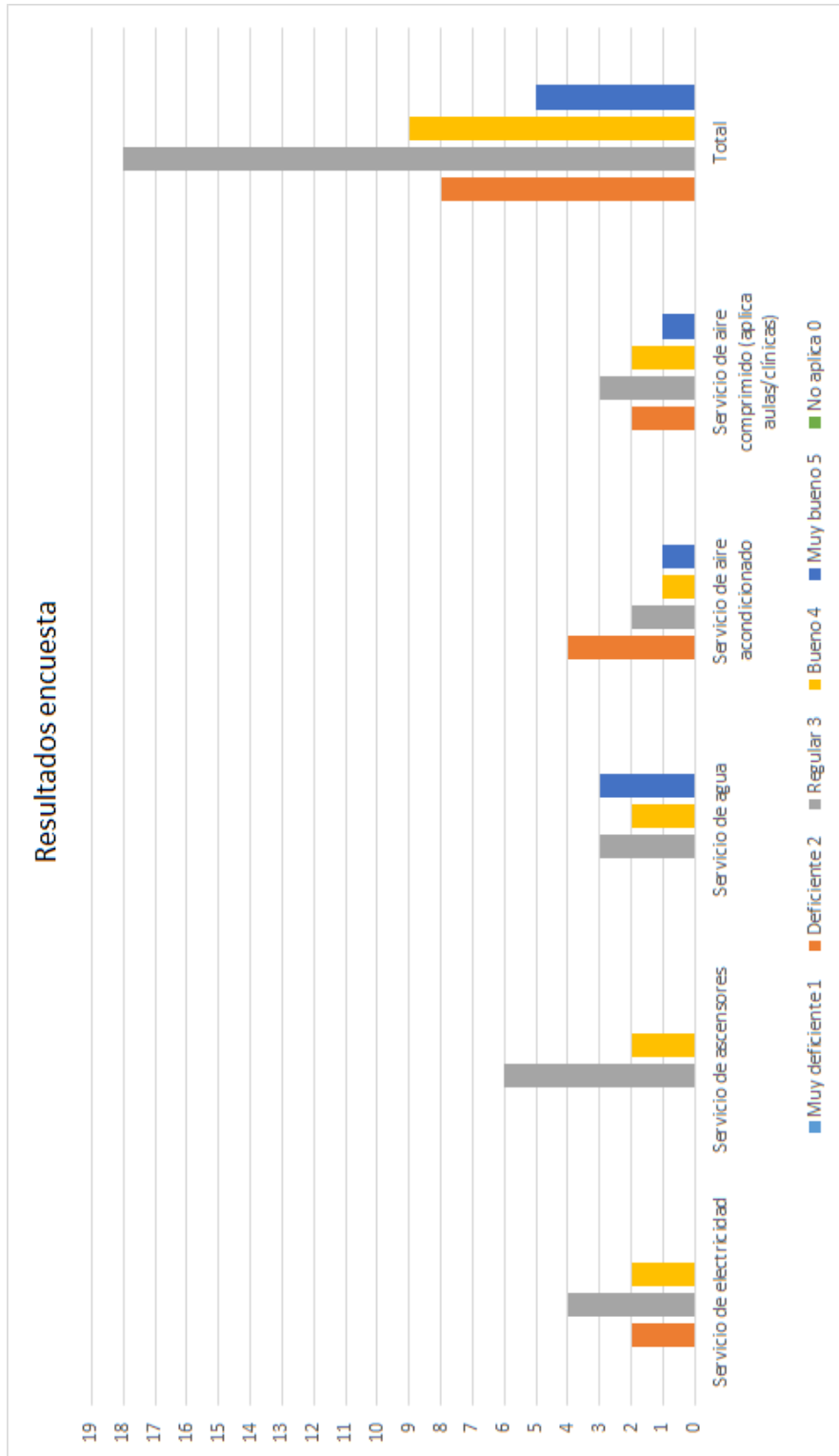


Sugerencia de mejoras

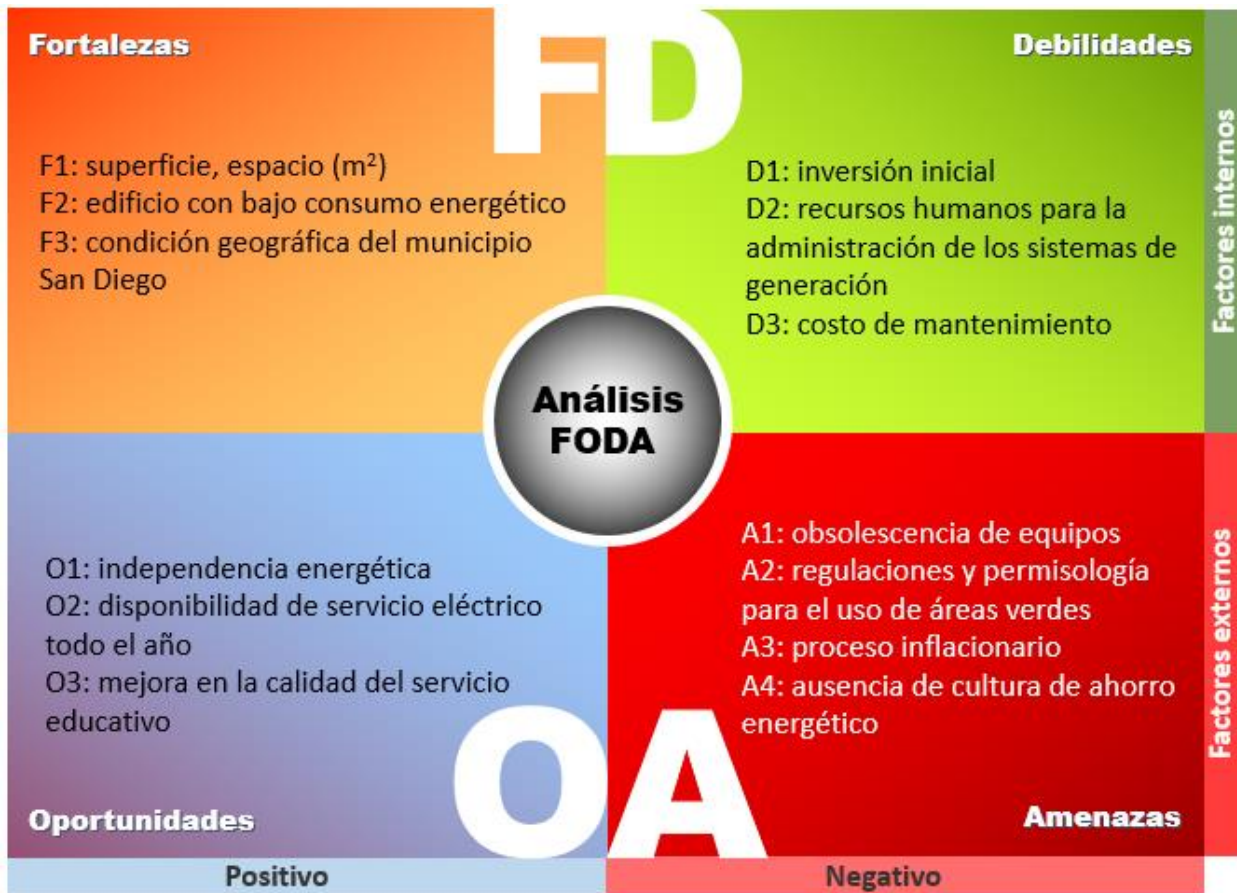
Gracias por tu colaboración, tú opinión es muy importante para nosotros.

Lavino - Beltrán

**Anexo C: Resultados de la encuesta dirigida a los usuarios, personal de ambiente y mantenimiento de la planta física de la Universidad José Antonio Páez (edificio 4)**



**Anexo D: Matriz FODA aplicada al sistema de generación de energía del edificio 4 de la Universidad José Antonio Páez.**



Anexo E: especificaciones técnicas de banco de baterías de ión – litio the Intensium® Max 20 high energy de la empresa Norwatt.

# Intensium® Max 20 High Energy

## Very high energy lithium-ion container 2.5 MWh

The Intensium® Max 20 High Energy is Saft's unmanned and ready to install Energy Storage System (ESS) in a 20-foot container, enabling utility-scale storage solutions for grids, renewables and industries.

Built with advanced NMC Li-ion technology, Intensium® Max 20 High Energy is a very compact and fully integrated storage system, combining high energy density with high levels of safety and operational reliability. The design of the latest addition in the well-proven family of Saft's Intensium Max containers is a concentration of technology leveraging years of operational experience in multiple applications and environments.

### Applications

- Integration of variable renewables: smoothing, shaping and shifting, minimizing curtailment
- Peaking capacity
- Transmission & distribution grid support
- Microgrids
- Energy management in large C&I sites

### Features

- Advanced industrial design offering highest safety and robustness
- Unmanned container with external access
- A single, easy access distribution cabinet integrating all power and control interfaces, supervision and safety devices and power supplies for the container
  - Proven architecture for high availability
    - Individually connectible strings with one Battery Management Module (BMM) per string
    - Master Battery Management Module (MBMM) for global charge and discharge management, data management, auxiliary equipment monitoring and diagnostic functions
    - One PLC for external communication and remote monitoring
- Sophisticated battery management for enhanced operability
  - Monitoring and control of voltage and temperature
  - Real time supervision of charge and discharge current limits
  - Real time indication of State of Charge (SOC)
    - Balancing of State of Charge (SOC)



| Nominal characteristics at +25°C to +77°F   | 1000V          | 1500V |
|---|----------------|-------|
| Rated energy (C/5) (MWh) <sup>(1)</sup>   | 2.5            | 2.5   |
| Voltage (V)   | 811            | 1216  |
| Nominal rate in charge and discharge  | 0.5C           | 0.5C  |
| <b>Mechanical characteristics</b>   |                |       |
| Length w/o HVAC (m)   | 6.1            | 6.1   |
| Length incl HVAC (m)  | 6.7            | 6.7   |
| Width (m)   | 2.4            | 2.4   |
| Height (m)  | 2.9            | 2.9   |
| Weight (t)  | <30            | <30   |
| Ingress Protection (IP) rating  | IP 54          | IP 54 |
| <b>Electrical characteristics</b>   |                |       |
| Minimum Voltage (V)   | 672            | 1008  |
| Maximum Voltage (V)   | 923            | 1385  |
| Rated continuous current (charge and discharge) (A)                                 | 1575           | 1050  |
| Charge and discharge power (DC) at rated continuous current (at 50% SOC) (MW)       | 1.2            | 1.2   |
| Maximum current (charge and discharge) (A) <sup>(2)</sup>                           | 2500           | 1680  |
| Charge and discharge power (DC) at maximum current (at 50% SOC) (MW) <sup>(2)</sup> | 2.0            | 2.0   |
| Discharge time at nominal power (h)   | 2              | 2     |
| <b>Operating conditions</b>   |                |       |
| Operating temperature   | -25°C to +55°C |       |
| Cycle efficiency (DC roundtrip, 0.5C)   | 96%            |       |
| Self-discharge  | <6% / month    |       |
| Design life   | 20 years       |       |
| Maximum altitude  |                |       |

- Alarms and faults management (contactor opening rules)
- Indication of State of Health (SOH) integrating cycling and calendar aging
- Advanced thermal management system based on air conditioning unit and controllable fans
  - High cooling efficiency
  - Temperature homogeneity
- Safety management system with smoke detection, fire suppression system and alarms

### Benefits

- Flexible, high energy density building blocks to optimize energy storage configurations up to 100MW
- Quick and cost effective installation, with containers delivered 'plug and play', fully assembled and tested ex factories
- Easy system integration: compatible with most power conversion systems in the market
- Excellent flexibility: scalable configuration of strings and containers
- High availability and serviceability due

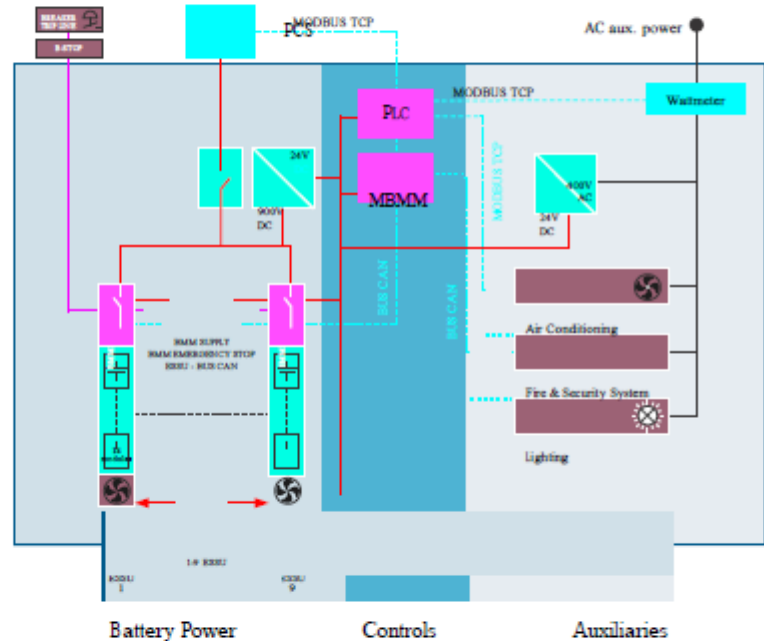
- to parallel connection of strings
- Low maintenance – diagnostic interface available
- Remote supervision capability
- Low Total Cost of Ownership (TCO)

- High energy and power availability over SOC
- Multiple charge-discharge operations per day with minimum auxiliary consumption
- Long life time due to optimum temperature management

### Safety

- Safety driven design guarantees safe behaviour in case of abuse usage or cell thermal runaway at module, string and container levels
  - Module level: electronic board for cell monitoring and balancing
  - String level: BMM to manage short-circuits, over-currents, overtemperature and over-voltages
  - Container level: emergency push buttons, DC disconnect switch, ground fault detection and fire suppression system
- Fire detection and suppression system to suppress fires in their initial stages and prevent collateral damages due to propagation. FSS status transmitted by communication bus and hard signals

| Storage conditions                     |  |
|--|--|
| Storage temperature                    | -30°C to +55°C                           |
| Storage time                           | 6 months                                 |
| Compliance to standards                |  |
| Cell safety                            | UL 1642                                  |
| System safety                          | IEC 62619, IEC 62093, IEC 62477, UL 1973 |
| EMC                                    | IEC 61000-6-4 / IEC 61000-6-2            |
| Insulation resistance                  | IEC 62477 overvoltage cat II             |
| Container protection class (operation) | IP 54                                    |
| Container dimension and transport      | ISO668                                   |
| Seismic                                | Eurocode zone 5 / IEEE 693 high level    |
| Environment conditions                 | IEC 60721                                |
| Transport classification               | UN 3536 - Class 9                        |
| Transport regulation compliance        | UN 38.3                                  |
| Marking                                | CE                                       |
| Directives                             | ROHS, REACH, WEEE                        |
| Manufacturing plants                   | ISO 9001, QS 9000, ISO 14000             |

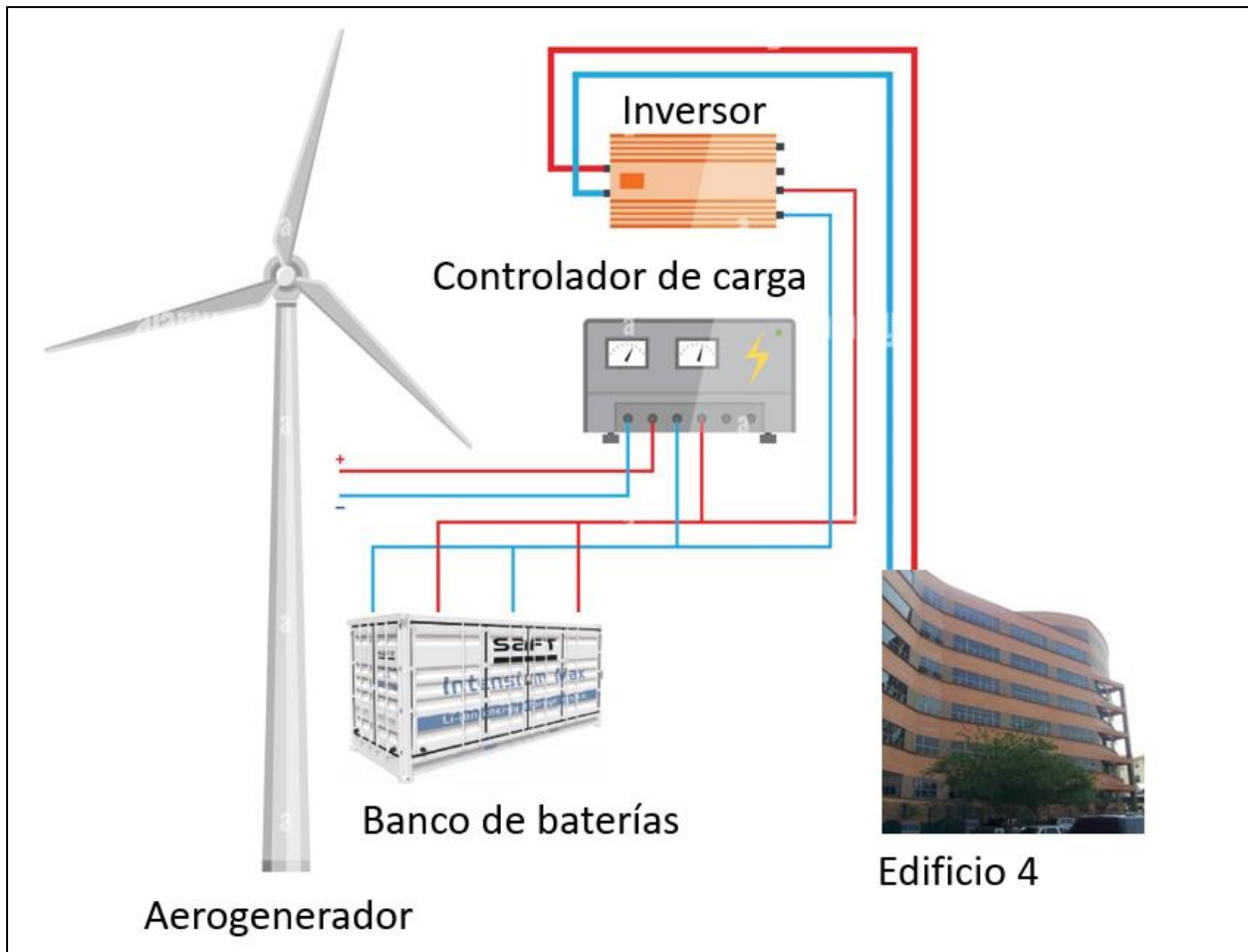


Block diagram IHE 1000V

### Battery System Architecture

- 1000V class: 9 Energy Storage System Units (ESSU)
  - 14 battery modules in series
  - One Battery Management Module (BMM)
- 1500V class: 6 Energy Storage System Units (ESSU)
  - 21 battery modules in series
  - One Battery Management Module (BMM)
- Distribution cabinet for 1.2 MW DC power output
- Communication interface via MODBUS TCP
- Disconnect switch
- Master Battery Management Module (MBMM)
- Programmable Logic Controller (PLC)
- Two auxiliary power supplies
  - 400V AC for HVAC, FSS, lighting
  - 24V DC internal self-supply for electronics and fans
- Ground fault detection function (optional)
- External battery stop

**Anexo F: Diagrama de instalación de un aerogenerador eólico.**



**Anexo G: Anexo G: Esquema típico para la instalación de una planta de generación fotovoltaica.**

