



# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN  
ENERGÍAS RENOVABLES**

## **TESIS**

**“ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO E  
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL  
DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN  
EN ENERGÍAS RENOVABLES”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN MATERIALES Y SISTEMAS  
ENERGÉTICOS RENOVABLES**

**PRESENTA**

**ING. JAIRO YAIR ESTRADA CASTELLANOS**

**DIRECTORES**

**DR. JORGE EVARISTO CONDE DÍAZ  
DR. JOEL PANTOJA ENRÍQUEZ**

**Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**

**Junio del 2018**

## Dedicatoria

A mi esposa e hijos por su paciencia y apoyo para que yo pudiera concluir este trabajo.

A mis padres por apoyarme siempre.

# Agradecimientos

A Dios por no esconderse de mí.

Al CONACYT por el apoyo económico y humano a través de sus investigadores de calidad que siempre nos guían de alguna u otra manera.

A mis compañeros de grupo por inspirarme siempre.

A mis directores de tesis, el Dr. Jorge Conde y Dr. Joel Pantoja.

Al extrañado CIDTER.

A mis maestros que siempre me dieron un rumbo a seguir.

# Contenido

Resumen .....	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Problemática .....	11
Objetivos.....	11
General.....	11
Específicos.....	11
Objetivo específico 1:.....	11
Objetivo específico 2.....	12
Objetivo específico 3.....	12
CAPITULO I: Antecedentes .....	13
1.1 Edificios energía cero .....	13
1.1.1 Eficiencia.....	14
1.1.2 Sistemas de ahorro pasivos.....	14
1.1.3 Sistemas de ahorro activos .....	15
1.2 Caso 1: Edificio Adam Joseph Lewis.....	15
1.3 Caso 2: Edificio BCA Academy.....	16
1.4 Caso 3: Edificio Lycee Kyoto .....	17
1.5 Caso 4: Edificio Ilet du Centre .....	18
1.6 Lecciones aprendidas.....	20
1.7 Conclusiones.....	22
CAPITULO II: Marco teórico .....	23
2.1 Introducción.....	23
2.2 Corriente alterna .....	24
2.3 Valor eficaz.....	25
2.4 Valor promedio.....	26
2.5 Fase.....	27
2.6 Potencia .....	29
2.6.1 Potencia activa.....	30
2.6.2 Potencia reactiva.....	30
2.6.3 Potencia aparente.....	31
2.7 Factor de potencia.....	32
2.8 Energía.....	32
2.9 Sensores de movimiento.....	32

2.9.1 Tipos de sensores de movimiento.....	33
2.9.1.1 Sensores ultrasónicos.....	33
2.9.1.2 Sensores de movimiento infrarrojo (PIR).....	33
2.10 Arduino.....	35
2.10.1 ¿Por qué Arduino?.....	36
2.10.1.1 Barato: .....	36
2.10.1.2 Multiplataforma:.....	36
2.10.1.3 Entorno de programación simple y clara:.....	36
2.10.1.4 Código abierto y software extensible: .....	36
2.10.1.5 Código abierto y hardware extensible: .....	36
2.11 Control Infrarrojo .....	37
2.12 Ahorro energético .....	38
2.13 Auditoría energética .....	40
2.13.1 ¿Qué es una auditoría energética? .....	40
2.13.2 ¿Por qué es necesario una auditoría energética? .....	40
2.13.3 Tipos de auditoria energética.....	40
2.13.3.1 Auditoria energética preliminar:.....	40
2.13.3.2 Auditoria estándar: .....	41
2.13.3.3 Simulación por computadora:.....	41
2.14 Medidas de mejora para edificios auditados.....	41
2.14.1 Mejora del factor de potencia .....	41
2.14.2 Sistemas de gestión de energía .....	42
2.14.3 Diferencias entre la auditoría energética y la certificación de eficiencia energética.....	42
2.14.4 ¿Qué se analiza en una auditoría energética? .....	43
2.14.5 Propuestas para oportunidades de ahorro .....	43
2.15 Conclusiones.....	44
CAPITULO III: Metodología.....	45
3.1 Introducción.....	45
3.2 Análisis .....	46
3.2.1 Análisis de la facturación eléctrica de la UNICACH .....	46
3.2.2 Censado de cargas del 3IER .....	46
3.2.2.1 Censado de cargas en dispositivos sin placas de especificaciones.....	47
3.2.3 Censado de iluminación.....	47
3.2.3.1 Niveles de iluminación .....	49
3.2.3.2 Método del salón .....	50
3.2.4 Mediciones de potencia y energía de los edificios .....	51

3.2.5 Mediciones de potencia y energía en equipo de aire acondicionado.....	52
3.3 Implementación .....	53
3.3.1 Elección de modelo de control .....	53
3.3.2 Adquisición de datos .....	53
3.3.2.1 Materiales: .....	53
3.3.2.2 Proceso para la adquisición de datos .....	54
3.3.2.3 Procesamiento de datos .....	54
3.3.2.4 Lógica secuencial del algoritmo .....	55
3.3.2.5 Programas utilizados .....	55
3.3.3 Instalación del sistema de ahorro de energía .....	56
3.3.3.1 Pasos para la instalación: .....	57
3.4 Evaluación .....	58
3.4.1 Mediciones .....	58
3.4.2 Análisis de los datos .....	59
3.4.3 Corrección de problemas en la instalación .....	59
3.5 Conclusiones.....	59
Capitulo IV: Resultados .....	61
4.1 Introducción.....	61
4.2 Diagnostico energético de la UNICACH .....	62
4.2.1 Análisis de la factura eléctrica.....	62
4.2.2 Censo de carga conectada del 3IER .....	65
4.2.2.1 Iluminación .....	65
4.2.2.2 Carga conectada por aire acondicionado .....	68
4.2.2.3 Equipos de cómputo .....	70
4.2.2.4 Equipos de laboratorio.....	71
4.2.2.5 Equipos de taller .....	74
4.2.2.6. Refrigeración y cafetería .....	75
4.2.2.7. Otras cargas .....	76
4.2.2.8. Carga total conectada.....	77
4.2.3 Mediciones eléctricas .....	78
4.2.3.1 Mediciones eléctricas en edificio 23 .....	79
4.2.3.2 Mediciones eléctricas en edificio 24 .....	87
4.2.3.3 Mediciones en taller.....	91
4.3 Implementación de sistema de control .....	93
4.3.1 Elección de sistema de control .....	93
4.3.2 Elección de los dispositivos electrónicos utilizados en el sistema de control ...	94
4.3.3 Desarrollo del sistema de control .....	95

4.3.3.1 Diseño del sistema de control.....	96
4.3.3.2 Descifrado de protocolos de comunicación de los aires acondicionados...	97
4.3.3.3 Construcción del sistema de control.....	100
4.3.3.4 Programación.....	102
4.4 Evaluación del sistema de control .....	106
4.4.1 Introducción.....	106
4.4.2 Demanda de potencia y consumo de energía sin sistema de control.....	108
4.4.3 Demanda de potencia y consumo de energía con sistema de control.....	110
4.4.3.1 Consideraciones preliminares.....	110
4.4.3.2 Evaluación de cubículo.....	111
CAPÍTULO V: Conclusiones.....	113
Productividad.....	116
Trabajos futuros.....	117
Referencias: .....	118

## Resumen

El presente trabajo presenta las actividades realizadas para la ejecución del primer edificio energía cero en una universidad en México. Es parte de un proyecto que incluye la instalación de un sistema solar fotovoltaico de 300 kW para suplir la energía necesitada en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (3IER), en la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), en el Sur de México.

El objetivo de nuestro trabajo fue el de reducir la energía consumida en los tres edificios que constituyen nuestro instituto de investigación. Los esfuerzos, primeramente fueron enfocados en el cálculo de la carga total conectada así como un diagnóstico detallado de la demanda de poder y gasto de energía, los cuales ayudaron a identificar ineficiencias y oportunidades de ahorro.

Se encontró que entre las causas principales que inciden en la demanda de potencia y consumo de energía, están el factor de potencia, los picos de demanda de potencia, el consumo de energía de los sistemas de aire acondicionado, ineficientes sistemas de iluminación, entre otros.

En uno de los edificios, los sistemas de aire acondicionado usan el 78% de la energía, mientras que el sistema de iluminación usa el 15%. Las otras cargas, como computadoras, impresoras, o teléfonos, solo consumen el 7% de la energía total de dicha edificación.

Se diseñó, construyó e instaló un sistema de control para intervenir en los sistemas de aire acondicionado (unidades del tipo mini Split) y de iluminación de los edificios. Además, como parte del trabajo realizado, se hizo una evaluación del ahorro alcanzado por los sistemas de control instalados.

A largo plazo, el circuito de control implementado ofrece la flexibilidad necesaria para hacerle actualizaciones a nivel software, las cuales pudieran llegar a usarse para estudiar el comportamiento de ocupantes, patrones de ocupación o el uso de energía por ocupante, así como recolección de datos para otros estudios científicos.



## Abstract

This work presents the activities accomplished in achieving the first Net Zero Energy Building in a university in Mexico. It is part of a project that involves a 300 kW photovoltaic solar system to supply the electric energy needed by the Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (3IER), at Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), in Southern Mexico.

The aim of our team was to reduce the energy consumption of the three buildings that constitutes our research center. The effort, first deals with a calculation of the total connected load and an electrical diagnostics to identify inefficiencies and saving opportunities.

Alongside the causes affecting the energy consumption was the electric power factor, high demand of power and energy in air conditioning systems, and inefficient lightning system, among others.

It was found that air conditioning systems and lighting systems use 78% and 15% of the energy in one of the buildings. While other loads, only used 7% of the energy.

A control system was proposed, designed, built, and installed, to control the air conditioning (split units) and lightning systems of the buildings. In addition an evaluation of the building energy performance was done as part of the work. For the long term, the control system implemented offers different upgrade benefits to study occupant behavior, occupations patterns and occupant energy use. Also, a monitoring system is to be installed to give other opportunities to researchers to understand building energy use in public school buildings in Mexico.

## Introducción

Hablar de energía no solamente es hablar de números; capacidad de generación, potencias instaladas, energías renovables, etc. La energía es la base de todo lo que hacemos. Todos la usamos a diario para transportarnos, cocinar, calentar o enfriar habitaciones, manufacturar, iluminar y entretenernos. Confiamos en la energía para volver nuestras vidas más cómodas, productivas y disfrutables. Para mantener la calidad de vida de la humanidad, debemos usar nuestros recursos energéticos de manera inteligente y eficiente.

De los principales sectores que más consumen energía en el mundo, el sector edificios tiene características únicas. El consumo de este rubro se considera entre el 20% y 40% en países desarrollados [1]. La mayor parte de la potencia consumida por los edificios se debe al uso de sistemas de aires acondicionados, calefacción, iluminación y otros equipos de uso diario, como computadoras personales, impresoras, o equipos de comunicación [1,2]. Ingenieros y arquitectos han mejorado la forma en que los edificios nuevos consumen la energía de tal forma que sean más eficientes. Sin embargo, al finalizar y poner en uso un edificio, el consumo de energía de éste está en función de la conciencia y comportamiento de sus ocupantes [3]; tales comportamientos pueden ser muy diferentes entre las distintas culturas alrededor del mundo.

Se han implementado distintas tecnologías innovadoras (pasivas y activas) en distintos puntos del planeta para mejorar la eficiencia de las edificaciones: Ventilación natural, uso apropiado de la luz del día, mejoras arquitectónicas, integración de energías renovables, monitoreo de consumo energético, edificios energía cero, adquisición de datos en interior de edificaciones, etc. [4].

Los países desarrollados han dado pasos agigantados en avances tecnológicos para crear edificios de alta eficiencia, pero estas parecieran no llegar a los países en vías de desarrollo. Los ingenieros y arquitectos parecieran no saber mucho del tema. A pesar de que se han fijado metas ambiciosas y acercamientos innovadores todavía falta mucho por hacer [5].

En la actualidad el ahorro empieza desde la construcción de las nuevas edificaciones [4,5]. Sin embargo, en los edificios ya construidos, solo queda tratar de mejorarlos o demolerlos [6]. Una práctica común para mejorar la eficiencia en edificios ya construidos, es haciendo estudios de diferentes índoles para identificar medidas de ahorro. Este trabajo muestra el estudio, desarrollo e implementación de un sistema automático de ahorro de energía, del cual se hablara en las siguientes páginas.

# Problemática

El grupo de edificios que conforman el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (3IER) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas no cuenta con un estudio del gasto energético ni un sistema de control para ahorro de energía.

La falta de un control que regule el consumo se ve reflejado en el gasto excesivo de energía eléctrica. Usuarios de los edificios usan los sistemas de aire acondicionado, sistemas de iluminación y otros dispositivos eléctricos y electrónicos sin ningún tipo de información que les indique el buen o mal uso de estos.

## Objetivos

### General

Realizar un estudio del consumo energético e implementar un sistema automático de ahorro de energía de los edificios del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, UNICACH.

### Específicos

#### Objetivo específico 1:

Diagnosticar el consumo energético de los edificios que conforman el 3IER.

**Actividad 1:** Instalar dispositivos para medir potencia consumida en edificios.

**Actividad 2:** Analizar información (consumo diario, consumo pico, cantidad de energía gastada por circuito, etc.).

**Actividad 3:** Identificar pérdidas de energía.

**Actividad 4:** Identificar oportunidades de ahorro de energía.

## Objetivo específico 2.

Implementar un sistema de ahorro de energía.

**Actividad 1:** Diseñar o elegir modelo de sistema automatizado de ahorro de energía.

**Actividad 2:** Desarrollar sistema de ahorro.

**Actividad 3:** Instalar sistema de ahorro de energía.

**Actividad 4:** Implementar dispositivos pasivos de ahorro de energía: Por ejemplo, cerrado mecánico de puertas (*cierrapuertas*) o techo frío (*cool roof*).

## Objetivo específico 3.

Evaluar el sistema de ahorro.

**Actividad 1:** Corregir faltas encontradas en la instalación del sistema.

**Actividad 2:** Determinar parámetros de evaluación de sistema.

**Actividad 3:** Comparar parámetros antes y después de implementación de sistema de ahorro.

**Actividad 4:** Identificar el alcance del sistema.

# CAPÍTULO I

---

## ANTECEDENTES

---

**“No puedes construir la base de un edificio en una semana, tienes que tener una base sólida si quieres tener una súper estructura”**

Gordon

En el presente capítulo se analizan las características de diferentes edificios de alta eficiencia energética. Se describe el diseño, características de bajo consumo de energía y el desempeño energético de cada edificio. Así como también se hace mención del tipo de energía renovable usado para suplir la demanda de cada construcción.

## 1.1 Edificios energía cero

Los edificios utilizan grandes cantidades de energía para funcionar y son una de las primeras formas de emisiones contaminantes [1]. Un edificio es un sistema complejo y todos sus componentes contribuyen a la demanda total de energía.

Hoy en día, y de acuerdo con los datos de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), el sector edificios representa más del 30% del consumo final de energía en los países miembros [7], y como son uno de los

principales usuarios de energía, se espera que consuman más a medida que la población y la economía crezcan.

La definición Edificio Energía Cero (EEC) se le atribuye a una edificación en la que la cantidad de energía consumida en el transcurso de un año es igual o cercana a la energía generada por alguna fuente renovable ya sea en sitio o en algún otro lugar.

En el camino hacia la conversión de un edificio cualquiera a uno del tipo energía cero es necesario dar varios pasos. Algunos de ellos se describen a continuación:

### 1.1.1 Eficiencia

Cualquier cantidad de energía que se ahorre en un edificio energía cero será energía que el edificio no tendrá que producir. Estos caminos son:

**Reducción de carga:** Reducir la carga conectada para de esa forma disminuir la demanda de potencia y energía. Así como eliminar las cargas innecesarias conectadas.

**Eficiencia del sistema:** De ser posible, cubrir las cargas que no pudieron eliminarse con equipos de alta eficiencia.

**Sistemas de generación de energía renovables:** Generar la energía que se necesite de alguna fuente energética renovable.

**Capacidad de conexión a red:** Dependiendo la necesidad del edificio en cuestión, ver la oportunidad de vender sobrantes a la compañía suministradora de energía.

**Monitoreo del edificio:** Una vez que el edificio está en servicio, monitorear y verificar que el edificio esté operando en condiciones óptimas.

### 1.1.2 Sistemas de ahorro pasivos

Estas medidas se pueden aplicar antes de que se haga uso de cualquier tecnología de control o automatización y algunas incluso pueden hacerse antes de la construcción de un edificio.

- ✓ Cerrado mecánico de puertas
- ✓ Luz natural
- ✓ Ventilación natural
- ✓ Techo frío (cool roof)
- ✓ Techo verde

- ✓ Orientación del edificio
- ✓ Sombra natural
- ✓ Enfriamiento nocturno
- ✓ Orientación de ventanas
- ✓ Doble vidrio en puertas y ventanas
- ✓ Diseño arquitectónico
- ✓ Aislamiento térmico

### 1.1.3 Sistemas de ahorro activos

- ✓ Monitoreo del sistema eléctrico
- ✓ Medidor de demanda de consumo
- ✓ Control de alumbrado
- ✓ Detección de ocupación por los ocupantes del edificio
- ✓ Controles de temperatura
- ✓ Administración de demanda de potencia
- ✓ Administración de cargas
- ✓ Aprovechamiento de aire natural
- ✓ Control de picos de consumo (por ejemplo, arranque y paro de equipos en horario fijo)
- ✓ Desconexión o conexión cíclica de cargas.

Los siguientes casos son de edificios energía cero alrededor del mundo. Se muestran adelantos tecnológicos interesantes funcionando de manera conjunta con algún tipo de energía renovable. Lo aquí presentado nos da una idea de que significa construir un edificio energía cero.

## 1.2 Caso 1

### **Edificio Adam Joseph Lewis Center for Environmental Studies**

El edificio Adam Joseph Lewis Center for Environmental Studies en Oberlin, Ohio. USA. Es un edificio de dos pisos, de 13, 600  $ft^2$  (1,265  $m^2$ ). Cuenta con 4 salones de clases, 1 auditorio pequeño, atrium, oficinas de profesores y una pequeña cocina. El objetivo de convertir este edificio en uno de energía cero fue para promover las nuevas tecnologías y crear material educativo para el programa de estudios ambientales de la universidad de Oberlin, Ohio.

El programa de diseño integral del edificio incluye iluminación natural, ventilación natural para disminuir la carga debida al sistema de enfriamiento, una cantidad grande de masa para almacenar energía pasiva solar, un sistema con bomba de calor para ayudar en el enfriamiento o calefacción, un sistema de administración

de energía y un sistema de tratamiento de agua sin tener que mandar a la planta de tratamiento del municipio. El edificio está diseñado para que funcione principalmente con energía eléctrica, de esta forma se puede implementar generadores en sitio para cubrir la demanda. El techo de la edificación tiene instalado un sistema solar fotovoltaico de 60 kW (Imagen 1.1), el cual suministra más de la mitad de la energía eléctrica utilizada por el edificio.



*Imagen 1.1 Sistema fotovoltaico del edificio Adam Joseph Lewis Center for Environmental Studies en Oberlin, Ohio. USA. [8].*

En un año de medición, la energía anual consumida por este edificio fue de  $29.8 \text{ kBtu/ft}^2$  ( $338 \text{ MJ/m}^2$ ). El sistema solar aporta el 45% del total de la energía consumida,  $16.4 \text{ kBtu/ft}^2$  ( $186 \text{ MJ/m}^2$ ). Como referencia, es importante señalar que este inmueble usa menos de la mitad de energía del edificio promedio:  $79 \text{ kBtu/ft}^2$  ( $897 \text{ MJ/m}^2$ ) [8, 9].

## 1.3 Caso 2

### **Edificio BCA Academy**

Este edificio fue construido para mostrar el uso de diversas tecnologías (pasivas y activas) utilizadas en los Edificios Energía Cero. Se encuentra en Braddell Road en Singapur. Los principales conjuntos de técnicas utilizadas fueron doble y triple vidrios en las ventanas, dispositivos de sombra artificial, paredes verdes, iluminación natural, sistema solar fotovoltaico en techo, ventilación natural, sistema de control computarizado y chimenea solar.

La carga conectada más importante es la del sistema de enfriamiento. Para enfriar el edificio se cuenta con tres chillers que funcionan con tres bombas de agua para transportar los fluidos enfriados o calentados desde las torres de enfriamiento. Además se cuenta con chimeneas solares para remover calor en espacios ventilados naturalmente. Las paredes verdes al Sur del edificio ayudan minimizando las infiltraciones de calor.



Como podemos ver en la figura 1.2, el edificio BCA Academy, tiene dos arreglos de paneles fotovoltaicos, uno en suelo o sobre el jardín, el otro en todo el techo del mismo.



El clima en el lugar es cálido húmedo. El edificio es usado principalmente para la educación. El área total del edificio es de  $4,500 \text{ m}^2$  y el área climatizada es de  $2,180 \text{ m}^2$ .

*Imagen 1.2* Edificio BCA Academy en Singapur [10].

El consumo de energía anual del edificio es de 183 MWh. El sistema solar genera 203 MWh por año en un área total de  $1,540 \text{ m}^2$  a través de un sistema fotovoltaico de una potencia nominal de 190 kW [10].

## 1.4 Caso 3

### Edificio Lycee Kyoto High School

Este edificio fue uno de los primeros en Europa en usar energía 100% limpia. Sus necesidades fueron proveídas utilizando un excelente diseño arquitectónico con muy buenas características en los materiales de construcción (aislamiento de muy buena calidad, techo verde, iluminación y otros equipos de bajo consumo), además, utiliza fuentes de energía renovable usando calentadores solares y un sistema solar eléctrico de 118 kW.

Por el lado de las tecnologías pasivas esta edificación cuenta con un sistema optimizado que aprovecha al máximo la energía del sol para calentar y almacenar el agua utilizada en todo el inmueble. Utiliza de forma muy eficiente las sombras, ventilación e iluminación natural. La orientación de las ventanas y sus tamaños tienen un efecto extremo en el enfriamiento y calentamiento de la construcción.

Utiliza un sistema de control con una interfaz fácil de usar para los ocupantes de la edificación.

El sistema solar fotovoltaico de 118 kW ocupa un área de  $961 \text{ m}^2$  y genera 123,288 kWh al año [11].



*Imagen 1.3* Edificio 3. Edificio Lycee Kyoto high school [11]

## 1.5 Caso 4

### Ilet du Centre – offices



*Imagen 1.4* Vista aérea del edificio Ilet du Centre en Saint Pierre.

"Ilet du centre" se localiza en la isla Francesa de La Reunión, en la localidad de Saint- Pierre. Esta isla, cuyo clima tropical es cálido húmedo, está localizada en el Océano Índico. Esta área es a menudo castigada por ciclones tropicales, lo cual dificulta la operación del edificio. Las condiciones del clima (Temperatura y humedad) de Saint-Pierre se muestran en la Imagen 1.5. La situación energética del lugar es complicada porque La Reunión es una isla muy pequeña. La

producción de electricidad es limitada, y se tiene como objetivo que la isla sea independiente energéticamente para el 2030.

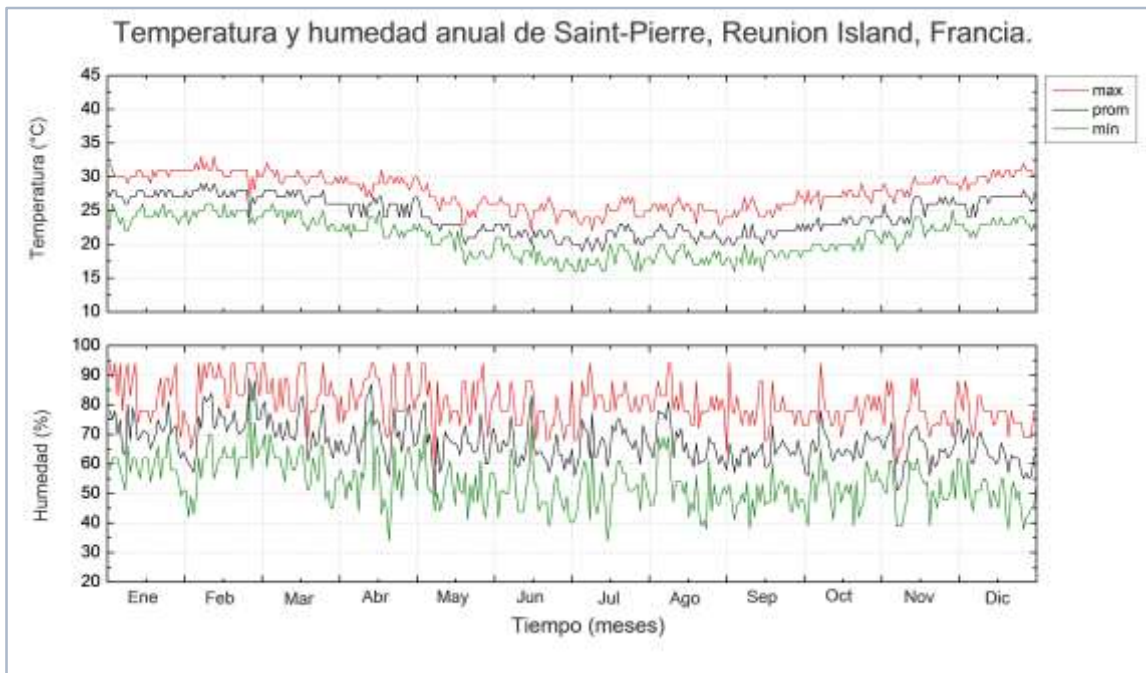


Imagen 1.5 Temperatura y humedad de Saint-Pierre, Reunion Island. Datos de <https://www.wunderground.com>

Esta edificación, conformada principalmente por departamentos y oficinas, hace el mejor uso de la energía usando de manera eficaz técnicas pasivas de climatización. Los espacios, ya sean departamentos u oficinas, no están climatizados con dispositivos activos (sistemas de aire acondicionado). Para evitar el uso de sistemas de aire acondicionado, se implementaron varias estrategias de ahorro: sombras en las paredes, techos aislados y que además, reflejan la luz del sol, porosidad mínima del 20%, ventiladores, ventilación cruzada, orientación de acuerdo a los vientos dominantes, ventilación a través de la puerta principal. El jardín grande y denso y la vegetación no permiten la acumulación de calor. La iluminación artificial es reducida hasta los niveles necesarios. Un sistema fotovoltaico produce el 25% de la energía que el edificio necesita [12].



*Imagen 1.6 Localización de St. Pierre.*

## 1.6 Lecciones aprendidas

A continuación se presentan distintas lecciones aprendidas en proyectos en donde se implementaron tecnologías para Edificios Energía Cero [13]. Todos estos edificios usaron tecnologías innovadoras para reducir el uso de energía y minimizar impactos al medio ambiente. Todos los edificios tienen protección térmica por arriba de los requeridos en diferentes códigos de eficiencia en edificios.

**Los dueños de los edificios son los principales motivadores para lograr consumos bajos en las construcciones:**

Los dueños de los edificios fueron la fuerza principal en todos los casos. Cada dueño puso las metas y tomó las decisiones adecuadas para hacer avanzar el proyecto. Los ingenieros y arquitectos hicieron todo lo posible para lograr estas expectativas, lo que resultó en la necesidad de rediseñar los edificios completos.

**Establecer metas de ahorro es crucial para el proyecto de ahorro**

En todos los casos, dueños y diseñadores se establecieron metas de ahorro. En general, los equipos de trabajo que se establecieron como meta alcanzar los mejores desempeños en eficiencia y utilizaron simulaciones para entender el comportamiento de los edificios, fueron los que obtuvieron mejores resultados.

## **No todas las decisiones son influenciadas por los costos**

Los dueños de los edificios toman decisiones basadas en lo que ellos valoran. Es muy común que el dueño de un edificio pague por características que él quiere (especialmente en características arquitectónicas). De manera contrastante, si un dueño no quiere una característica específica que se le proponga para el edificio, el costo es normalmente usado para eliminar la posibilidad de implementarla.

## **La tecnología que ahora tenemos cambiará la forma en que los edificios se comportan**

El uso apropiado de distintas tecnologías está logrando disminuir el consumo de energía en las edificaciones. Sin embargo, estas estrategias deben implementarse desde el diseño, la construcción y la operación de los edificios. Hay que notar también, que no hay una simple receta o una lista de cosas a hacer para alcanzar que un edificio gaste menos energía.

## **Una buena manera de disminuir el consumo de energía de un edificio es haciendo un diseño que tome en cuenta todos los aspectos posibles**

Un diseño integral de ahorro de energía debe empezar con un buen equipo comprometido con una meta: ahorrar energía. El edificio debe considerarse como un sistema para poder integrar tecnologías que lo manipulen. Esto incluye simulaciones que ayuden en el proceso de diseño. Estas simulaciones mostrarán los pros y contras de cada propuesta que se intente implementar.

## **Los edificios que fueron mejorados para ser de bajo consumo de energía no siempre se comportan como los diseñadores esperan.**

Los diseñadores de edificios de bajo consumo de energía raramente regresan a ver como sus construcciones se desempeñan. Las mediciones en estas edificaciones muestran que estas consumen más energía y producen menos energía de la que se predijo en el diseño o simulación. A continuación de muestran varias razones documentadas:

- El software de control o la lógica utilizada no son las adecuadas y no permiten que la tecnología empleada trabaje de la mejor forma.
- Los equipos de diseño fueron muy optimistas acerca del comportamiento de los ocupantes y la aceptación de los sistemas.
- Los ahorros de energía por iluminación natural fueron considerables, pero fueron menores de los esperados.
- Las cargas conectadas fueron mayores que las que se predijeron en los diseños.
- Los fabricantes de los materiales utilizados para aislamiento de los edificios normalmente dicen que son mejores de lo que normalmente lo son.

- Los sistemas solares utilizados para suministrar de energía a los edificios presentan desgaste por uso. El deterioro de estos sistemas normalmente tiene que ver con problemas en los inversores, polvo, sombras y corrientes parasitas.

### **La información ayuda a administrar y mejorar el sistema**

Proponer y seguir una meta de diseño no es suficiente para garantizar que en una edificación se está ahorrando de manera óptima. El consumo del edificio completo tiene que ser monitoreado y verificado. El monitoreo del sistema completo dará la retroalimentación necesaria para saber si todo funciona de manera correcta.

## **1.7 Conclusiones**

- Es posible convertir un edificio (incluso ineficiente) en un Edificio Energía Cero (EEC).
- Hay muchos tipos de tecnología que pueden aplicarse a los edificios para convertirlos en EEC, no importando cual sea el clima en el que se encuentren.
- El ejemplo y experiencia de otros equipos de trabajo en otras partes del mundo que han trabajado en Edificios Energía Cero está disponible (y publicado) para que otros grupos puedan aprender y no cometer errores que ya otros conocen.

# CAPÍTULO II

---

## MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 Introducción

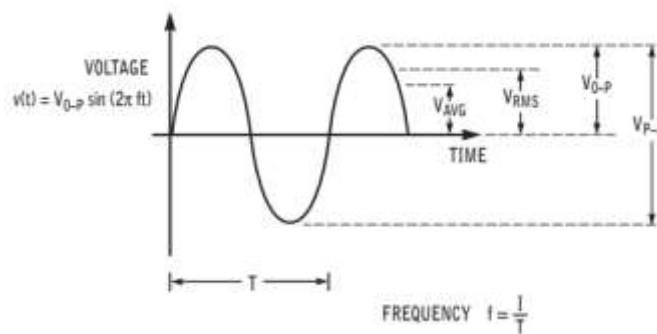
Cualquier dispositivo eléctrico que nos suministra algún beneficio tiene que convertir cierto tipo de energía a otro que nos favorezca. Estos aparatos consumen una cantidad de energía eléctrica equivalente a la que los usuarios demandan para desarrollar sus actividades en una edificación (luz, calor, aire fresco, etc). A esta energía demandada de la red eléctrica se le denomina energía activa o real, la cual se cuenta a través de medidores que el mismo distribuidor de energía instala. La cantidad de energía gastada por el consumidor es facturada por la empresa distribuidora de energía eléctrica.

Algunos aparatos debido a su principio de funcionamiento, toman de la fuente de electricidad una cantidad mayor a la que verdaderamente usan, sin que este exceso sea registrado por los medidores. Otros, consumen energía a pesar de que nadie los está utilizando (el aire acondicionado encendido en un cubículo vacío, por ejemplo). Y algunos más consumen arriba de lo esperado debido a que están trabajando en condiciones extremas debido a la falta de mantenimiento.

En este capítulo se muestran los fundamentos teóricos referentes a la medición del consumo energético, formas de ahorro para espacios no utilizados y evaluación de sistemas de ahorro.

## 2.2 Corriente alterna

La corriente alterna (CA), como su nombre lo indica, cambia de dirección o alterna entre picos positivos y negativos, a una frecuencia en particular. La forma más conocida de corriente alterna es la onda senoidal. La imagen 2.1 muestra que la corriente o voltaje empieza en cero, se vuelve positiva la mitad del ciclo y pasa a través de cero para volverse negativa en la segunda mitad del ciclo. Este ciclo se repite continuamente.



*Imagen 2.1* La señal más conocida de CA es la onda senoidal. Y sus principales componentes son Voltaje pico, Voltaje RMS, frecuencia y voltaje promedio.

La onda senoidal puede ser descrita matemáticamente como función del tiempo.

$$v(t) = V_{0-p} * \sin(2\pi ft) \quad \dots \text{Ec. 2.1}$$

La longitud del ciclo (*en segundos*) se llama periodo y se representa mediante el símbolo  $T$ . La *frecuencia* ( $f$ ), es el recíproco del periodo y su unidad de medida es en *Hertz*, la cual es equivalente a ciclos por segundo.

$$f = \frac{1}{T} \quad \dots \text{Ec. 2.2}$$

La frecuencia indica cuantos ciclos la onda senoidal completa en un segundo. Por ejemplo, la onda de voltaje senoidal estándar en las líneas de distribución en México tiene una frecuencia de  $60 \text{ Hz}$ , lo que significa que el voltaje hace sesenta



ciclos completos en un segundo. El periodo de una onda de 60 Hz es  $T = 1/f = 1/60 = 0.0167$  Segundos.

Otra forma de representar la ecuación de la onda senoidal es:

$$v(t) = V_{0-p} * \sin(\omega t) \quad \dots \text{Ec. 2.3}$$

Donde  $\omega$  es la *frecuencia en radianes*, con unidades *radianes/segundos*. Al comparar las dos ecuaciones del voltaje senoidal, podemos ver que

$$\omega = 2\pi f \quad \dots \text{Ec. 2.4}$$

y

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad \dots \text{Ec. 2.5}$$

Debido a que la onda de voltaje senoidal no es constante en el tiempo, no es fácil describirla. A veces el voltaje es positivo, a veces negativo y por cada ciclo completo atraviesa dos veces el cero. Este problema no se presenta en la señal de Corriente Directa. La imagen 2.1 nos muestra las distintas formas de referirse a la corriente alterna (CA). El valor de voltaje cero-a-pico ( $V_{0-p}$ ) es simplemente el valor máximo que puede alcanzar la onda. Este voltaje es normalmente llamado *voltaje pico*. De manera similar, el valor *pico-a-pico* ( $V_{p-p}$ ) es medido del valor máximo hasta el valor mínimo de la onda. Para una onda senoidal,  $V_{p-p}$  es siempre el doble de  $V_{0-p}$ .

## 2.3 Valor eficaz

Se llama valor eficaz de una corriente alterna, al valor que tendría una corriente continua que produjera la misma potencia que dicha corriente alterna, al aplicarla sobre una misma resistencia.

Es decir, se conoce el valor máximo de una corriente alterna ( $I_0$ ). Se aplica ésta sobre una cierta resistencia y se mide la potencia producida sobre ella. A continuación, se busca un valor de corriente continua que produzca la misma potencia sobre esa misma resistencia. A este último valor, se le llama valor eficaz de la primera corriente (la alterna).

Para una señal sinusoidal, el valor eficaz de la tensión es:

$$V_{ef} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad \dots \text{Ec. 2.6}$$

y del mismo modo para la corriente

$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad \dots \text{Ec. 2.7}$$

la potencia eficaz resultará ser:

$$P_{ef} = V_{ef} \times I_{ef} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} * \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{V_0 * I_0}{2} \quad \dots \text{Ec. 2.8}$$

Es decir que la potencia efectiva (también llamada RMS), es la mitad de la potencia máxima (o potencia de pico).

Otra forma matemática de expresar el valor RMS es de la siguiente forma:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V^2(t) dt} \quad \dots \text{Ec. 2.9}$$

Ó

$$V_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{0-P} = 0.707 V_{0-P} \quad \dots \text{Ec. 2.10}$$

## 2.4 Valor promedio

Algunas veces, el voltaje o corriente alterna es definido usando el valor promedio. Estrictamente hablando, en una onda senoidal que en la mitad de un ciclo es positivo y negativo en el siguiente, el valor promedio es cero. Debido a que los dos picos de la onda son idénticos pero de signo opuesto, estos se cancelan uno con el otro. Se podría decir entonces que el valor promedio de una onda senoidal es cero.

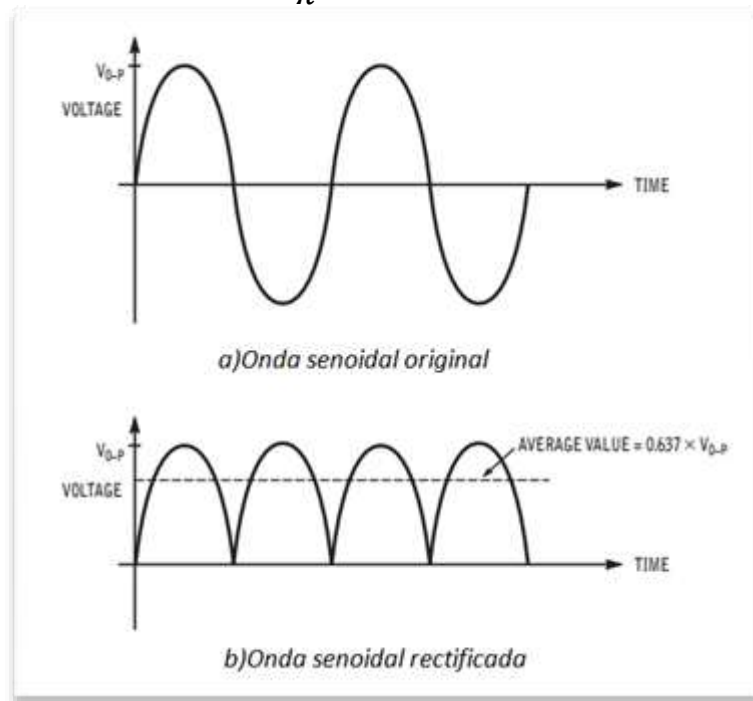
Otra forma de interpretar el valor promedio de una onda senoidal es asumiendo que la onda ha sido rectificadas completamente. Matemáticamente esto significa

que se usara el valor absoluto de los componentes de dicha onda (la parte negativa del senoide será tratada como positiva).

$$V_{AVG} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{(t_0+T)} |v(t)| dt \quad \dots \text{Ec. 2.11}$$

En la figura 2.2 se muestra una onda senoidal sin rectificar (a) y el valor promedio de una onda rectificada (b). La relación  $V_{AVG}$  y  $V_{0-P}$  depende de la forma de onda.

$$A_{AVG} = \frac{2}{\pi} V_{0-P} = 0.637 V_{0-P}$$



*Imagen 2.2 Forma de la onda antes y después de la rectificación. a) La onda senoidal original. b) La versión de la misma onda después de pasar por un proceso de rectificación. La parte negativa del ciclo es colocada en el lado de los pulsos positivos y estas también se vuelven positivas. La onda nueva rectificada resultante es utilizada para calcular el valor promedio del ciclo completo.*

## 2.5 Fase

El valor de voltaje (o corriente) especifica la amplitud altura de la onda; y la frecuencia o periodo especifica que tan rápido una onda completa un ciclo completo. Pero dos ondas senoidales de la misma frecuencia podrían no cruzar el cero al mismo tiempo. Por esto, la fase de una función seno es usada para definir su posición en el tiempo. La unidad más común para referirse a la fase es

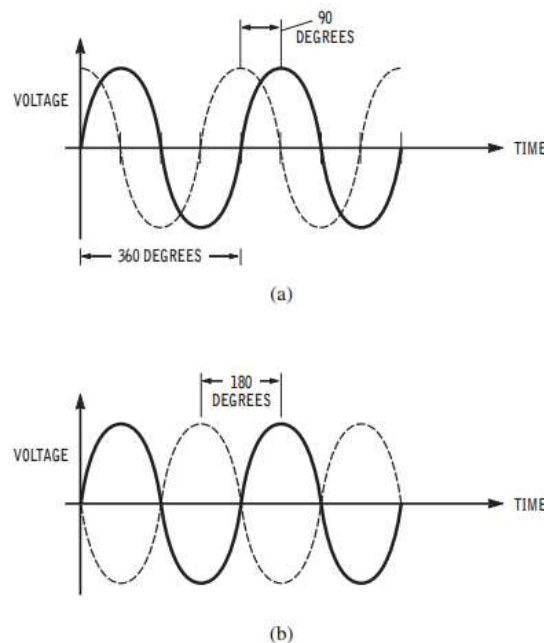
el grado. El ciclo completo de una onda tiene 360 grados de fase. La fase también puede expresarse en radianes, a un ciclo corresponde  $2\pi$  radianes.

La ecuación matemática de la función seno puede ser modificada para incluir el término de la fase.

$$v(t) = V_{0-p} * \sin(2\pi ft + \theta) \quad \dots \text{Ec. 2.12}$$

Para explicar este concepto se presenta el siguiente ejemplo:

Las dos señales senoidales en la figura 2.3 están separadas por un cuarto (1/4) de ciclo. Como un ciclo completo tiene 360 grados, las dos señales están a una diferencia de fase de 90 grados.



*Figura 2.3* Ángulos de desfase de la onda senoidal. A) El ángulo de desfase es de 90 grados. B) El ángulo de desfase es de 180 grados.

Para ser más exactos, la segunda señal está a 90 grados atrás de la primera o, equivalentemente, la segunda señal tiene una fase de -90 grados relativamente a la primera.

En la figura 2.3 (b) se muestran dos señales senoidales que están desfasadas por medio ciclo (180 grados). Este es el caso especial en el que una onda es negativa respecto a la otra. La relación de fases entre dos señales simplemente nos dice que tan lejos está una señal respecto a la otra. Cuando una señal está desfasada por 360 grados las dos señales vuelven a acoplarse por lo que no tiene caso decir que una de ellas está adelantada o atrasada respecto a la otra. Por esto, los

ángulos de atraso (o adelanto) de fase se dan en un rango de 360 grados, normalmente desde los -180 hasta +180 grados.

## 2.6 Potencia

Se le llama potencia a la razón a la que la energía fluye de un circuito a otro. La ecuación 2.13 pertenece a la fórmula utilizada para calcular la potencia en un circuito de corriente directa. Para voltajes y corrientes directos, la potencia es simplemente el voltaje multiplicado por la corriente y su unidad es el *Watt*.

$$P = V * I \quad \dots \text{Ec. 2.13}$$

En la tabla 2.1 se pueden apreciar las diferentes presentaciones de la ley de Ohm para calcular voltajes, corrientes, resistencias y potencias en un circuito de corriente continua. La combinación de distintas manifestaciones de dicha ley hace posible hacer distintos cálculos básicos en los circuitos mayormente resistivos.

*Tabla 2.1 Ecuaciones básicas de voltaje, corriente, resistencia y potencia*

$V = I * R$	<b>Ley de Ohm</b>
$I = \frac{V}{R}$	Lez de Ohm
$R = \frac{V}{I}$	Lez de Ohm
$P = V * I$	Ecuación de potencia
$P = I^2 R$	Potencia en resistor
$P = \frac{V^2}{R}$	Potencia en resistor

El concepto de potencia se complica al utilizarlo en corriente alterna. El cálculo de la potencia instantánea, mostrada en la ecuación 2.14, es el producto de multiplicar la corriente instantánea y el voltaje instantáneo para cualquier instante.

$$p(t) = v(t) * i(t) \quad \dots \text{Ec. 2.14}$$

En muchos casos, será de interés encontrar la potencia promedio transferida a un circuito. La potencia promedio es determinada al tomar la potencia instantánea y promediarla en un periodo completo de la onda. La ecuación 2.15 muestra la forma correcta de hacer este conjetura.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \int_0^T v(t) * i(t) dt \quad \dots \text{Ec. 2.15}$$

La potencia disipada por un resistor que se le aplica un voltaje de CA está dado por:

$$P = V_{RMS} * I_{RMS} = \frac{V_{RMS}^2}{R} = I_{RMS}^2 * R \quad \dots \text{Ec.2.16}$$

Esta relación se cumple para cualquier forma de onda siempre y cuando el valor *RMS* de voltaje y corriente sean usados.

### 2.6.1 Potencia activa

Es la potencia asociada con el trabajo (que en circuitos eléctricos equivale a la consumida por la resistencia). Corresponde al valor medio de la potencia instantánea y se expresa como:

$$P = V_{RMS} * I_{RMS} * \cos \theta \quad \dots \text{Ec. 2.17}$$

Siendo  $\theta$  el ángulo de desfase entre la corriente y la tensión.

### 2.6.2 Potencia reactiva

Es la potencia asociada a la magnetización o polarización de los materiales en el caso de sistemas con señales senoidales de una única frecuencia. Para una onda senoidal la potencia reactiva está definida como:

$$Q = V_{RMS} * I_{RMS} * \sin \theta \quad \dots \text{Ec. 2.18}$$

### 2.6.3 Potencia aparente

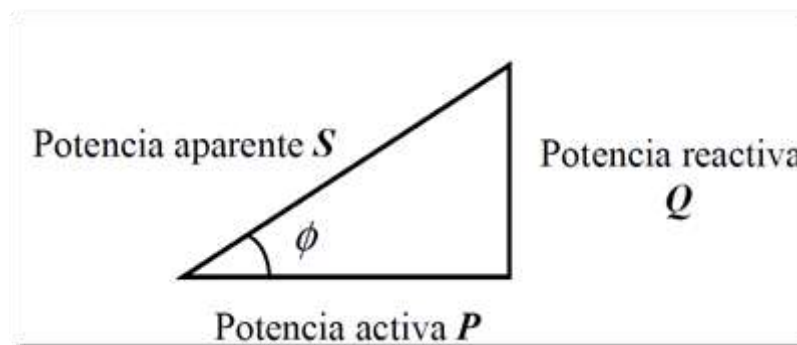
Potencia aparente ( $S$ ), es la potencia total consumida por la carga y es el producto de los valores eficaces de tensión e intensidad.

$$P = V_{RMS} * I_{RMS} * \cos \theta \quad \text{Ec. 2.19}$$

La imagen 2.4 muestra otra forma de obtener este valor de potencia, la cual se puede ver como la suma vectorial de las potencias activa y reactiva. Su unidad de medida es el volt-amper ( $VA$ ). Se calcula como:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{Ec. 2.20}$$

El llamado triángulo de potencias es la mejor forma de ver y comprender de forma gráfica la estrecha relación de los tipos de potencia presentes en un circuito eléctrico de corriente alterna.



*Figura 2.4 El triángulo de potencias nos muestra de forma gráfica la estrecha relación de las potencias activa, reactiva y aparente, así como el ángulo  $\theta$  entre la potencia aparente y potencia activa (factor de potencia).*

## 2.7 Factor de potencia

El *factor de potencia* se define como el cociente de la relación de la potencia activa entre la potencia aparente; esto es:

$$\text{Factor de potencia} = \frac{P}{S} \quad \dots \text{Ec. 21}$$

El factor de potencia es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo.

El valor ideal del factor de potencia es 1, esto indica que toda la energía consumida por los aparatos ha sido transformada en trabajo. Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad significa un mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil.

## 2.8 Energía

Para medir la energía eléctrica se emplea como unidad de medida el *watt-hora* (*Wh* o *kWh*) definido como el trabajo realizado durante una hora por una máquina que tiene una potencia de un kilowatt (*kW*).

Los *watts* por hora se calculan multiplicando la potencia eléctrica por el tiempo. Por ejemplo, un bulbo de luz de 100 watts que está encendido por seis horas usará 600 Wh de energía eléctrica.

La energía gastada en un *kilowatt-hora* representa 3, 600,000 *joules*. ( $3.600 * 10^6 J$ ). Para obtener *joules* cuando se conoce la cantidad de *kWh* solo se multiplica la cantidad conocida por  $3.600 * 10^6$ .

De manera general se puede decir que la energía (*E*) es equivalente a la potencia (*P*) multiplicada por el tiempo (*t*). Para determinar la energía en *kilowatt-hora*, la potencia debe estar expresada en *kilowatt* y el tiempo en *horas*.

## 2.9 Sensores de movimiento

Los sensores de movimiento son aparatos basados en la tecnología de los rayos infrarrojos o las ondas ultrasónicas para poder captar en tiempo real los movimientos que se generan en un espacio determinado. Estos sensores de



movimiento, adscritos sobre todo a cámaras de seguridad, puertas en almacenes y centros comerciales, etc; son uno de los dispositivos más reconocidos e importantes dentro de la eficiencia energética.

## 2.9.1 Tipos de sensores de movimiento

### 2.9.1.1 Sensores ultrasónicos

Son detectores de movimiento volumétrico que usan el principio Doppler para registrar dicho movimiento. Los sensores hacen rebotar ondas ultrasónicas de sonido sobre objetos localizados en un área vigilada y luego miden la cantidad de tiempo que les toma para regresar al sensor. El movimiento de una persona en el área provoca que las ondas de sonido regresen a frecuencias más altas o bajas, lo cual resulta en un desplazamiento Doppler y la detección de ocupación.

Los sensores ultrasónicos contienen un transmisor y, uno o varios receptores. Éstos transmiten ondas de sonido de alta frecuencia generadas por un oscilador de cristal de cuarzo.

Las ondas de sonido escapan al alcance de registro del oído humano y no causan daño a los humanos.

Una característica única de los sensores ultrasónicos es el Sistema de Circuitos Avanzados de Procesamiento de Señal. Esta característica sirve para eliminar el "ruido" causado por el movimiento del aire mediante la localización de los pequeños cambios cíclicos direccionales que se encuentran normalmente en la turbulencia del aire.

Debido a que los sensores ultrasónicos transmiten en tres dimensiones, el ultrasonido al salir del sensor y rebotar en las paredes, el piso, y el techo, les da a los sensores la capacidad de detectar pequeñas cantidades de movimiento. Las áreas con alfombrado muy espeso o con particiones y paneles anti acústicos en el techo absorberán el sonido ultrasónico y pueden reducir la cobertura.

Resulta esencial una localización apropiada para los sensores ultrasónicos. Una localización inapropiada puede hacer que los sensores ultrasónicos puedan ver por detrás de las puertas o alrededor de algunas particiones donde la detección de ocupación puede no ser deseada.

### 2.9.1.2 Sensores de movimiento infrarrojo (PIR)

Son dispositivos piro eléctricos que miden cambios en los niveles de radiación infrarroja emitida por los objetos a su alrededor a una distancia máxima de 6 metros. Como respuesta al movimiento, el sensor cambia el nivel lógico de un pin. Además es un sensor de bajo costo y reducido tamaño, utilizado en sistemas de alarmas, iluminación controlada por movimiento y aplicaciones de robótica.

Están formados por elementos fabricados de un material cristalino, que genera una carga eléctrica cuando se expone a la radiación infrarroja. Los cambios en la cantidad de radiación producen cambios de voltaje, los cuales son medidos por un amplificador. El sensor PIR contiene unos filtros especiales llamados lentes de Fresnel, que enfocan las señales infrarrojas sobre el elemento sensor. Cuando éstas cambian rápidamente, el amplificador activa la salida para indicar movimiento.



*Imagen 2.5 Sensor PIR Esta es la apariencia de un sensor PIR utilizado en el proyecto de automatización del 3IER.*

Los sensores PIR son utilizados principalmente para detectar si un humano se ha movido dentro o fuera del rango del sensor. Son pequeños, baratos, consumen poca energía para operar, fáciles de usar e instalar y no se dañan fácilmente. Por esas razones, estos dispositivos son usados en diversas aplicaciones en domótica y de oficina.

Son básicamente un sensor piro eléctrico, los cuales detectan niveles de radiación infrarroja. Cualquier ser vivo emite una cantidad de radiación, y entre más caliente este el objeto emisor, más radiación emitirá. El sensor es un detector de movimiento y se divide en dos partes. Lo que este dispositivo hace es que detecta el cambio no el nivel de radiación. Las dos partes del sensor funcionan de manera conjunta, si una de ellas “ve” una cantidad de radiación diferente que la otra entonces la salida del sensor será “alta”.

Además del sensor piro eléctrico (la parte principal) del dispositivo, podemos encontrar un grupo de circuitería de soporte, resistencia, capacitores, chip, el cual toma las señales captadas del sensor y las procesa de tal forma que nos ofrezca una salida que podamos utilizar.

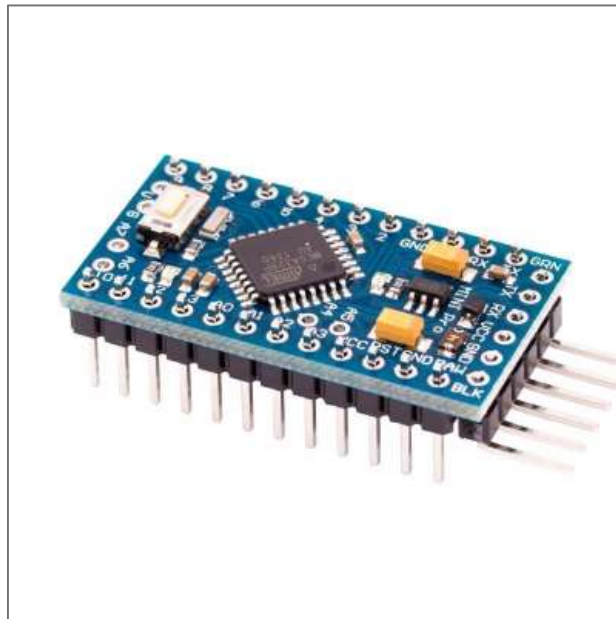
Así pues, para un proyecto básico o dispositivo que necesita detectar cuando una persona ha dejado o entrado a un área determinada, o se ha acercado a un lugar, los sensores PIR son excelentes.

Notar que estos sensores no informaran cuantas personas hay en un lugar, o que tan cerca están estas personas del sensor. El sensor es fijado para que tenga un rango de alcance de detección. Y a veces, es activado por alguna mascota, fuentes de dispositivos cambiantes de temperatura e incluso corrientes de aire.

## 2.10 Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de prototipos de código abierto, basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Está pensado para estudiantes, maestros, diseñadores y para cualquiera interesado en crear objetos o entornos interactivos.

Este dispositivo electrónico interactúa con su entorno mediante la recepción de entradas en donde pueden conectarse una variedad de sensores y dispositivos actuadores como luces, motores, pistones, etc.



*Imagen 2.6 Imagen de un ARDUINO mini con un procesador AD MEGA*

El microcontrolador de la placa se programa usando el "Arduino Programming Language" y el "Arduino Development Environment". Los proyectos de Arduino pueden ser autónomos o se pueden comunicar con software en ejecución en un ordenador (por ejemplo con Flash, Processing, MaxMSP, etc.).

Las placas se pueden ensamblar a mano o encargarse pre ensambladas; el software se puede descargar gratuitamente. Los diseños de referencia del

hardware (archivos CAD) están disponibles bajo licencia abierta, por lo que el usuario es libre de adaptarlas a sus necesidades.

## 2.10.1 ¿Por qué Arduino?

### 2.10.1.1 Barato:

Las placas Arduino son relativamente baratas comparadas con otras plataformas microcontroladoras. La versión menos cara del módulo Arduino puede ser ensamblada a mano, e incluso algunos de los módulos de Arduino pre ensamblados cuestan menos de 100 pesos.

### 2.10.1.2 Multiplataforma:

El software de Arduino se ejecuta en sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y GNU/Linux. La mayoría de los sistemas microcontroladores están limitados a Windows.

### 2.10.1.3 Entorno de programación simple y clara:

El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes, pero suficientemente flexible para que usuarios avanzados puedan aprovecharlo también. Para profesores, está convenientemente basado en el entorno de programación Processing, de manera que estudiantes aprendiendo a programar en ese entorno estarán familiarizados con el aspecto y la imagen de Arduino.

### 2.10.1.4 Código abierto y software extensible:

El software Arduino está publicado como herramientas de código abierto, disponible para extensión por programadores experimentados. El lenguaje puede ser expandido mediante librerías C++, y la gente que quiera entender los detalles técnicos pueden hacer el salto desde Arduino a la programación en lenguaje AVR C en el cual está basado. De forma similar, puedes añadir código AVR-C directamente en tus programas Arduino si quieres.

### 2.10.1.5 Código abierto y hardware extensible:

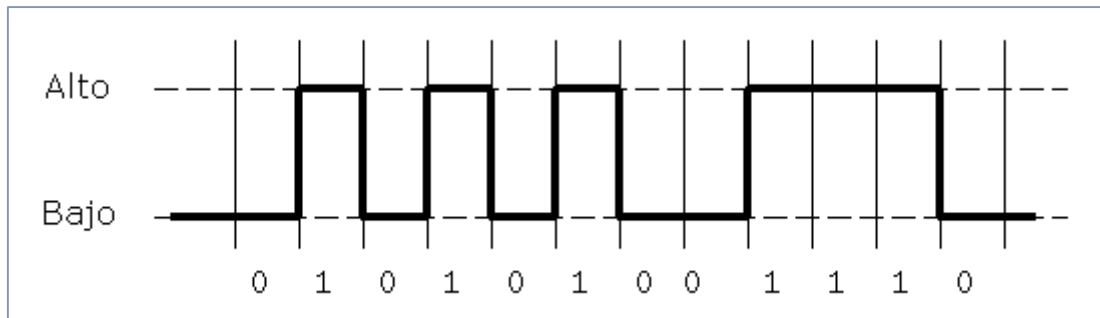
El Arduino está basado en microcontroladores ATMEGA8 y ATMEGA168 de Atmel. Los planos para los módulos están publicados bajo licencia Creative Commons, por lo que diseñadores experimentados de circuitos pueden hacer su propia versión del módulo, extendiéndolo y mejorándolo. Incluso usuarios relativamente inexpertos pueden construir la versión de la placa del módulo para entender cómo funciona y ahorrar dinero [14].

## 2.11 Control Infrarrojo

Un mando a distancia IR funciona conmutando el LED encendido y apagado en una secuencia particular. Sin embargo, para evitar interferencias a partir de fuentes de IR tales como la luz del sol o las luces artificiales usadas para iluminación, el LED no se enciende de forma permanente, pero se enciende y se apaga a una frecuencia de modulación (típicamente de 36 a 40 *kHz*). En el momento en que se está enviando una señal modulada se llama marca (1) y, cuando el LED está apagado se llama espacio (0).

Naturalmente, en el mando a distancia, cada tecla tiene un código asociado a ella (por lo general de 12 a 32 bits), y transmite este código cuando se pulsa esa tecla. Si la tecla se mantiene pulsada, el mando a distancia normalmente transmite repetidamente el código clave.

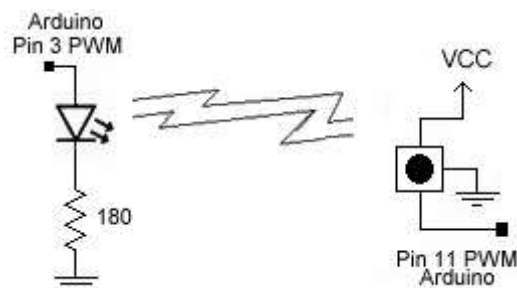
El mecanismo de funcionamiento de una transmisión por infrarrojos es bastante “simple”; un haz de luz, de alta frecuencia de 38 *kHz* (típico de los mandos a distancia para la TV) se proyecta frente a un receptor. Este haz de luz no es más que una secuencia de bits (0 y 1) que son codificados por el receptor, a través de la polarización del foto-transistor. Veamos este caso simple; el control remoto, es el cifrado de los distintos impulsos con diversos bits y secuencias, por ejemplo, el botón de encendido/apagado es:



*Imagen 2.7* Imagen de una orden codificada lista para ser enviada por un led infrarojo de un control remoto.

En el extremo receptor, el detector IR demodula esta señal, y emite una señal de nivel lógico que indica si se está recibiendo una señal o no. El detector de infrarrojos, funciona mejor cuando su frecuencia coincide con la frecuencia del emisor, pero en la práctica no importa mucho.

Cuando se manda una orden a distancia, cada tecla tiene un código único asociado a él (generalmente 12 a 32 bits): Si se mantiene pulsada la tecla, se transmite repetidamente el código.



*Imagen 2.8* Circuitos básicos emisor y receptor necesarios para la transmisión de órdenes a distancia a través de un control remoto.

Para descifrar las ordenes de un dispositivo de control hay que encontrar los tiempos de apagado de encendido del LED infra red y la frecuencia portadora a la que este se enciende. Esto se hace con osciloscopio.

## 2.12 Ahorro energético

Frente a la contribución del ahorro energético, los sistemas de domótica en la arquitectura presentan diversidad de aplicaciones con un extenso abanico de posibilidades, destacando como las más importantes las siguientes:

- Regular los horarios de funcionamiento de instalaciones de climatización e iluminación de las estancias o zonas de trabajo en edificios de uso de oficina o industrial, para adaptarlos a los horarios

de uso y ocupación de los mismos, evitándose que por ejemplo puedan quedar funcionando por la noche o fuera de los horarios de trabajo.

- En viviendas permitir un *control automático del encendido y apagado de todas las luces*, evitando así que puedan continuar encendidas cuando se sale fuera de la misma. La iluminación eficiente se consigue por medio de equipos que permiten variar los niveles de iluminación de cada recinto en función de la luz natural recibida, así como mediante detectores de presencia en zonas de paso, como zonas comunes o garajes en los edificios, para que sólo se enciendan las de dichas zonas donde se encuentren los ocupantes.
- Regular la apertura y cierre de dispositivos de protección solar como persianas, toldos y cortinas para conseguir el mejor aprovechamiento posible de la radiación solar recibida a través de los huecos.
- Control de los períodos de paro y puesta en marcha de los electrodomésticos en determinados horarios en los que el coste energético es inferior, nos referimos a los denominados periodos valle, consiguiendo así una adecuada gestión de las tarifas eléctricas. En el caso de edificios de viviendas, para uso doméstico se puede aplicar a la tarifa de discriminación horaria, de forma que el usuario puede dejar los equipos de mayor consumo funcionando durante el “horario valle” para aprovecharse de tales tarifas más económicas y reducir su factura.
- Permitir programar la desconexión de un determinado circuito eléctrico que no tenga prioridad, como puede ser el del aire acondicionado, antes de que el consumo llegue a la potencia que se ha contratado, evitando que salte el interruptor de control de potencia y magnetotérmico, esto es lo que se denomina racionalización de cargas.
- En relación al confort interior de usuarios de un edificio o vivienda, estos equipos también nos permiten adaptar la temperatura interior en función de otros factores como la orientación de la estancia o la parte o zona del edificio o vivienda en cuestión, la temperatura del exterior, la hora del día o la presencia de personas.

- Permite la detección de ventanas o puertas de la vivienda que se encuentren abiertas, avisando al propietario en caso de que esté activados los equipos de calefacción o refrigeración.

## 2.13 Auditoría energética

### 2.13.1 ¿Qué es una auditoría energética?

Un estudio en profundidad que tiene como objetivo determinar oportunidades de ahorro y eficiencia energética en un edificio o parte del mismo y elaborar un plan de acción de viabilidad técnico-económica para realizarlas. A partir de un análisis pormenorizado de los consumos energéticos del edificio se determinan qué acciones se deben acometer para reducir el consumo y los costes energéticos, en base a criterios económicos de rentabilidad.

### 2.13.2 ¿Por qué es necesario una auditoría energética?

Una auditoría energética puede ser vista como una forma de determinar la salud y desempeño de un edificio. Además de ser una herramienta muy útil para planeación de ahorro energético de un edificio a corto, medio y largo plazo. Algunas de las razones más importantes por las cuales se realiza una auditoría energética son las siguientes:

- Para reducir costos de operación de un edificio en particular.
- Para reducir el impacto ambiental asociado con la utilización de fuentes de energía convencionales.
- Para frenar la necesidad de construcción de nuevas plantas generadoras.
- Para disminuir los índices de contaminación, y por lo tanto incremento en los índices de salud.

### 2.13.3 Tipos de auditoría energética

#### 2.13.3.1 Auditoría energética preliminar:

Es la menos cara de las tres. Este tipo de auditoría envuelve como primer punto la examinación del edificio (o inmueble) incluyendo principalmente una inspección visual del lugar. Además, el auditor realiza una revisión del historial de consumo de energía del lugar, esto con la finalidad de encontrar patrones de



consumo y así poder comparar estos con consumos de otros edificios con características similares. Esta estimación inicial de ahorros potenciales puede resultar en la generación de un “menú” de opciones de ahorro. La información obtenida de este tipo de auditorías sirve como base para determinar si es necesario una revisión más detallada del inmueble.

### 2.13.3.2 Auditoria estándar:

Esta envuelve una evaluación más comprensiva y altamente detallada de instalaciones, equipos o sistemas. Se hacen mediciones se de manera muy cuidadosa para determinar el gasto de energía de cada dispositivo (incluyendo perdidas). Se determinan las eficiencias y usando los datos técnicos de los distintos dispositivos se analiza el potencial de ahorro energético de cada uno de estos. Además, este tipo de auditoria debe incluir un análisis económico de las mejoras tecnológicas propuestas.

### 2.13.3.3 Simulación por computadora:

La simulación por computadora es la más cara y normalmente la más recomendada tipo de auditoria para sistemas complejos. Esta envuelve el uso de software de simulación para predecir ciertos comportamientos del edificio auditado. Considera factores externos, como por ejemplo los cambios en las condiciones del clima. Con este tipo de auditoria se establece la condición base (actual) del edificio auditado y se compara con los efectos que se tendría en caso de aplicar una estrategia de ahorro. Este tipo de auditorías normalmente se usa para ver el desempeño de edificios nuevos basadas en diferentes configuraciones de diseño y distintas estrategias de ahorro.

## 2.14 Medidas de mejora para edificios auditados

### 2.14.1 Mejora del factor de potencia

Como ya se mencionó antes, la potencia reactiva (al igual que la potencia real y la aparente) tiene que ser suministrada por el proveedor de energía eléctrica a pesar de que esta no es registrada por el medidor de consumo. La magnitud de esta potencia reactiva incrementa a medida que el factor de potencia decrementa. Para contrarrestar esto, las compañías implementan una multa dependiendo la magnitud del factor de potencia.

## 2.14.2 Sistemas de gestión de energía

La directiva europea y el borrador del Real Decreto hacen referencia al sistema de gestión energética como sustitutivo de la obligación de realizar las auditorías energéticas. Un sistema de gestión energética es un salto de calidad con respecto a una auditoría energética, siendo necesario realizar una auditoría energética para poder implantar un sistema de gestión energética.

Los sistemas de gestión de la energía son herramientas que permiten mejorar el comportamiento energético de las organizaciones. Son fácilmente integrables con otros sistemas de gestión (calidad, medio ambiente) y permiten trabajar, en el marco de la mejora continua, para ahorrar energía y ser más eficientes, reduciendo en consecuencia los costes asociados y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Existen varias normas que establecen los requisitos básicos que deben tener los sistemas de gestión energética que quieren optar a esta certificación.

Para la implantación de un sistema de gestión energética es necesario definir la política energética, la realización de una auditoría energética, sistematizar las normas de actuación dentro de la empresa, implantándolas y dando formación al personal.

Una vez que esté implantado el sistema de gestión será necesario que un organismo independiente realice una auditoría del sistema de gestión para poder obtener la correspondiente certificación.

## 2.14.3 Diferencias entre la auditoría energética y la certificación de eficiencia energética

La certificación de eficiencia energética es una evaluación, a partir de una inspección visual, de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de la energía primaria que consume el inmueble. La comparación con modelos de referencia de la misma zona climática permite obtener su calificación energética mediante métodos simplificados.

Por su parte, la auditoría energética es un estudio en profundidad del comportamiento energético del inmueble, comprobando y verificando mediante mediciones los consumos energéticos del inmueble, con indicadores específicos y personalizados. Incluye un inventariado de todos los elementos generadores y consumidores de energía para conocer su comportamiento energético, lo que permite estudiar y proponer las oportunidades de ahorro por vía de consumos, cuantificadas técnica y económicamente.

## 2.14.4 ¿Qué se analiza en una auditoría energética?

Una auditoría energética analiza:

- Datos generales y consumos: datos generales de la actividad, suministros y sus consumos.
- Análisis de la red eléctrica: realizando una monitorización energética de la misma.
- Envolvente: análisis de sus características y valoración de la transmitancia en cerramientos y puentes térmicos, uso de termografías.
- Iluminación: inventario de lámparas y luminarias, uso del luxómetro,...
- Climatización, renovación de aires acondicionados: estudio pormenorizado de los equipos de generación y sistemas de distribución.
- Equipos eléctricos y térmicos: equipos eléctricos de climatización y ventilación, calderas, bombas (agua potable y calefacción), equipos de ofimática, equipos de la cocina u otros.
- Control y gestión de los equipos: conocer y obtener los datos de los sistemas de control, control de la calidad del aire y de temperatura ambiente.
- Energías renovables: recogida de datos de instalaciones solares térmicas, de instalaciones solares fotovoltaicas, de instalaciones mini eólicas y mini hidráulicas,...
- Equipos de agua: datos de los equipos de consumo de agua fría y agua caliente.
- Gestión energética: datos de la gestión energética actual, datos del uso del edificio relevantes.

## 2.14.5 Propuestas para oportunidades de ahorro

Una vez analizado y monitorizado el comportamiento energético del edificio, se elaboran unas propuestas de oportunidades de ahorro, siempre en base a criterios económicos de rentabilidad. A continuación exponemos unos ejemplos de propuestas de mejora:

- Optimización de la potencia eléctrica contratada.
- Recuperación del calor residual en ventilación.
- Utilización de sensores de calidad ambiental para la renovación higiénica del aire.
- Estudio lumínico para la reducir y reubicar las luminarias.
- Utilización del sistema de energía solar para la obtención de agua (en algunos edificios) caliente sanitaria.
- Integración de sistemas de aprovechamiento de energías renovables.
- Generación eléctrica a partir de energía solar (energía fotovoltaica).
- Utilización de elementos para el control solar en superficies acristaladas.
- Implantación de un Sistema de Gestión de la Energía.
- Formación y sensibilización sobre el ahorro energético.
- Optimización en la contratación del agua.
- Mejora de los aislamientos térmicos Del material envolvente del edificio; techos, paredes, ventana, etc..

## 2.15 Conclusiones

La teoría revisada en este capítulo nos brindó información de suma importancia para lograr los avances planeados al principio de esta tesis.

Primeramente se revisó la teoría relacionada con la corriente, voltaje y potencia de circuitos de corriente alterna. Esta sección nos permitió conocer a detalle la forma en que se gasta la energía eléctrica en los edificios. En el análisis de potencia demandada, de manera especial se destaca la participación de la potencia reactiva y potencia aparente. Estos conceptos teóricos nos ayudan a concluir como otros factores (como el factor de potencia) influyen de manera activa en un circuito eléctrico.

Así mismo, se gracias a la teoría estudiada, se pudieron realizar los trabajos previos de diseño y manufactura de los equipos necesarios para el desarrollo del presente trabajo.

Gracias a la teoría estudiada se pudo distinguir los factores que afectan el consumo, así como la forma óptima de solucionarlo y evaluarlo.

# CAPÍTULO III

---

## METODOLOGÍA

---

### 3.1 Introducción

La idea detrás del objetivo general del trabajo aquí presentado se encauza en reducir el consumo de energía de los edificios del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (3IER). Para este fin, se plantearon tres objetivos específicos: el primero consiste en medir el consumo de energía y la demanda de potencia de los edificios en estudio; el segundo –y de acuerdo a los resultados de las mediciones- fue el implementar un sistema de ahorro de energía que reduzca en gasto de energía; y el tercero, evaluar el sistema implementado para ver las mejoras logradas y proponer (o replantear) otras opciones de ahorro en los edificios.

En esta sección se muestra la metodología utilizada para alcanzar los objetivos planteados anteriormente.

## 3.2 Análisis

### 3.2.1 Análisis de la facturación eléctrica de la UNICACH

Dado que el 3IER es parte de la UNICACH, y no se tienen registros previos del gasto de energía del instituto de investigación, este análisis se hizo para observar cuales eran las variables de mayor interés que contribuyen al gasto de energía. Con la información obtenida aquí se pudieron determinar las áreas en las que enfocaríamos nuestros estudios. La metodología utilizada fue la siguiente:

1. Obtención de los recibos de energía eléctrica de la UNICACH de los últimos 2 años.
2. Escritura de datos en tablas a modo de facilitar los trabajos de graficado y comparación de los gastos del primer y segundo año, y además, que estos fueran observables por cada mes.
3. Análisis de datos obtenidos.
4. Destacar los rubros que contribuyen al cobro de la energía eléctrica de la UNICACH.

### 3.2.2 Censado de cargas del 3IER

Con el fin de saber cuánta carga se encuentra conectada a los edificios objetos de estudio, se hizo un recuento de todas estas. Cabe mencionar que este censo de cargas se hizo a la fecha Abril del 2017. Todas las cargas que se le agreguen a dichos edificios después de esa fecha no estarán registrados en nuestras listas.

Este censado se dividió en 7 rubros:

- Iluminación
- Aires acondicionados
- Equipo de computo
- Equipo de laboratorio
- Equipo o herramientas de taller
- Refrigeración y cafetería
- Otras cargas

Cada rubro contribuye al gasto de energía del 3IER. Para la obtención de la potencia total conectada el procedimiento que se siguió fue el siguiente:

- Tomar datos de placas de cada equipo. Estos datos normalmente se encuentran en algún lugar del equipo.

- Hacer un listado de todos los equipos encontrados tomando en cuenta sus datos de placa.
- Sumar todas las potencias obtenidas de las placas y datos de los dispositivos.
- Mostrar resultados de lecturas en forma de tablas.

### 3.2.2.1 Censado de cargas en dispositivos sin placas de especificaciones

Para los casos donde no fue posible leer los datos de placa de algún dispositivo, debido al desgaste de estos o por alguna otra razón que haya hecho que dicho equipo o cuenta con una placa de especificaciones, el procedimiento que se siguió fue el siguiente:

Se realizó **una medición de forma directa de forma directa** en el equipo.

Estas mediciones fueron de corriente y voltaje reales (potencia real) para determinar la potencia que el equipo demanda en un lapso de tiempo que corresponda a un ciclo completo (apagado-encendido-apagado). Con el fin de conocer su demanda pico (a la hora de encender el equipo) y su demanda nominal (cuando el equipo está en uso normal). Se anotara la demanda mayor registrada durante la medición, ya que esta es la demanda máxima que el equipo puede generar a la red eléctrica, tanto de potencia demandada a la hora de encendido como la potencia nominal.

-El equipo a medir deberá estar en condición 'OFF'. De los dos cables, neutro y fase que alimentan el equipo a medir, se interrumpió el cable de alimentación del dispositivo para conectar un medidor de corriente y se hizo una conexión en paralelo al neutro y la fase de la alimentación que media el voltaje de alimentación del dispositivo. La multiplicación de estas dos variables (corriente y voltaje) determinó la potencia demandada en un ciclo completo de unos del dispositivo, en donde intervienen encendido, uso nominal y apagado.

**Nota:** Para hacer estas mediciones se utilizó el equipo AMPROBE que mide corriente, voltaje y potencia.

### 3.2.3 Censado de iluminación

Para la evaluación de la luminaria se siguió la siguiente metodología proporcionada por la NORMA NOM-025-STPS-2008.

En el puesto de trabajo se debe realizar al menos una medición en cada plano de trabajo, colocando el luxómetro tan cerca como sea posible del plano de

trabajo y tomando precauciones para no proyectar sombras ni reflejar luz adicional sobre el luxómetro.

Se debe usar un luxómetro que cuente con:

- a) Detector para medir iluminación;
- b) Corrección cosenoidal;
- c) Corrección de color, detector con una desviación máxima de  $\pm 5\%$  respecto a la respuesta espectral fotópica, y
- d) Exactitud de  $\pm 5\%$  (considerando la incertidumbre por calibración).

Se debe verificar el luxómetro antes y después de iniciar una evaluación conforme lo establezca el fabricante y evitar bloquear la iluminación durante la realización de la evaluación.

1.-El luxómetro deberá contar con el certificado de calibración de acuerdo a lo establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Las lecturas serán válidas mientras los resultados obtenidos en el luxómetro no cambien de acuerdo con los requisitos establecidos en los párrafos siguientes:

2.-Debe asegurarse que se cumpla con el inciso d) ya que la calibración no implica el ajuste del instrumento y por tanto, por sí sola, no garantiza que se realicen las mediciones con la exactitud requerida. Debido a lo anterior se deberá verificar y registrar en el informe el error que comete el instrumento y aplicar el factor de corrección si es necesario, además de corregir los resultados de la medición.

3.-Cuando el luxómetro tenga variaciones en la coincidencia de sus lecturas se debe someter para su certificación al laboratorio.

4.- La forma de respaldar la veracidad del luxómetro será a través del registro de mediciones realizadas midiendo los niveles de iluminación que produce una lámpara incandescente, que únicamente será utilizada para este fin, a distancias conocidas. Las lecturas obtenidas durante la verificación deberán coincidir con las lecturas de referencia que deberán haber sido obtenidas al momento de que se recibió el luxómetro después de su certificación, una vez que se haya aplicado el factor de corrección reportado en el certificado.

5.- El reporte de verificación debe contener la fecha de su realización, la intensidad de corriente a la que se operó la lámpara incandescente, las condiciones ambientales al momento de la verificación, las distancias a las cuales se midieron los niveles de iluminación y los valores de iluminancia indicados por el instrumento para cada distancia.

6.- En caso de que el luxómetro haya sufrido una caída, se le dio uso rudo o estuvo expuesto a condiciones extremas de temperatura y humedad, se debe someter a una nueva verificación y elaborar el reporte de verificación.



Se obtendrán mediciones en diferentes puntos siguiendo un método en específico para identificar aquellas áreas en donde exista una iluminación deficiente o exceso de iluminación que provoque deslumbramiento.

Para este procedimiento se registraron datos de las condiciones de iluminación de las tareas de trabajo. Así como de las áreas donde exista una iluminación deficiente o se presente deslumbramiento, y posteriormente, conforme se modifiquen las características de las luminarias o las condiciones de iluminación del área de trabajo, con los siguientes datos:

- a) Distribución de las áreas de trabajo, del sistema de iluminación (número y distribución de luminarias), de la maquinaria y del equipo de trabajo;
- b) Potencia de las lámparas;
- c) Descripción del área iluminada: colores y tipo de superficie del local o edificio;
- d) Descripción de las tareas visuales y de las áreas de trabajo, de acuerdo con la tabla anterior
- e) Descripción de los puestos de trabajo que requieren iluminación localizada, y
- f) La información sobre la percepción de las condiciones de iluminación por parte del trabajador al patrón.

Para la medición de luz artificial se debe cumplir con lo siguiente:

- a) Encender las lámparas con antelación, permitiendo que la luz se estabilice; si se utiliza lámparas de descarga incluyendo lámparas fluorescentes, se debe esperar un periodo de 20 minutos antes de iniciar las lecturas.
- b) En instalaciones nuevas con lámparas de descarga o fluorescentes, se debe esperar un periodo de 100 horas de operación antes de realizar la medición.
- c) Los sistemas de ventilación deben operar normalmente, debido a que la iluminación de las lámparas de descarga y fluorescentes, presentan fluctuaciones por los cambios de temperatura.

### 3.2.3.1 Niveles de iluminación

De acuerdo con la NOM 025-STPS-2008, es necesario establecer los requerimientos de iluminación en los centros de trabajo, para que se cuente con la cantidad de iluminación requerida para cada actividad visual, a fin de proveer un ambiente seguro y saludable en la realización de tareas que se desarrollen (Tabla 5.6 ver anexo).

Para la ubicación de los puntos de medición se deben seleccionar en función de las necesidades y características de cada centro de trabajo, de tal manera que describen el entorno ambiental de la iluminación de una forma confiable.

Las áreas de trabajo deben dividirse en zonas del mismo tamaño, de acuerdo a lo establecido en la tabla (Tabla 5.7 ver anexo) y realizar mediciones en donde

haya un mayor número de personas o en el centro geométrico de una de estas zonas; en caso de las mediciones coincidan los puntos focales de las luminarias, se debe considerar el número de zonas de evaluación.

El valor del índice de área, para establecer el número de zonas a evaluar, está dado por la ecuación siguiente:

$$IC = \frac{(x)(y)}{h(x+y)^k}$$

Donde:

IC = Índice del área

x,y = dimensiones del área (largo y ancho), en metros.

h = altura de la luminaria respecto al plano de trabajo, en metros.

En pasillos o escaleras, el plano de trabajo por evaluar debe ser un plano horizontal a  $75\text{cm} \pm 10$ , sobre el nivel del piso, realizando mediciones en los puntos medios entre luminarias contiguas.

### 3.2.3.2 Método del salón

Se utiliza para evaluar el nivel de iluminación promedio en el lugar de trabajo a partir de cierto número de mediciones y puntos de medición en función de la constante del salón, K, que viene dada por donde L es el largo del salón, A el ancho y h la altura de las luminarias sobre el plano útil.

$$K = \frac{(A)(L)}{h(A+L)}$$

Para la determinación de la iluminación promedio con el método de la constante del salón, se realizara con la siguiente expresión (Tabla 5.8 ANEXO):

$$E_p = \frac{1}{N}(E_i)$$

Donde:

$E_p$  = Nivel promedio en lux

$E_i$  = Nivel de iluminación Medido en Lux en cada punto

N = Número de medidas realizadas

### 3.2.4 Mediciones de potencia y energía de los edificios

Con los valores de corriente y voltaje RMS se obtienen los valores de potencia en cualquier instante. La energía es la integral (o área bajo la curva) de la potencia instantánea. A través de las lecturas de estas dos variables encontramos los rubros que más contribuyen al gasto de energía.

El consumo de energía eléctrica se mide en watts-hora, o precisamente múltiplos de watts-hora (escritos  $W \cdot h$ , igual a *watts x horas*) que es la medida universal de Energía.

1 kW.h [kilo Watt hora]= 1000 W.h

1 W.h [Watt hora] = 60 Wm [Watt minuto]

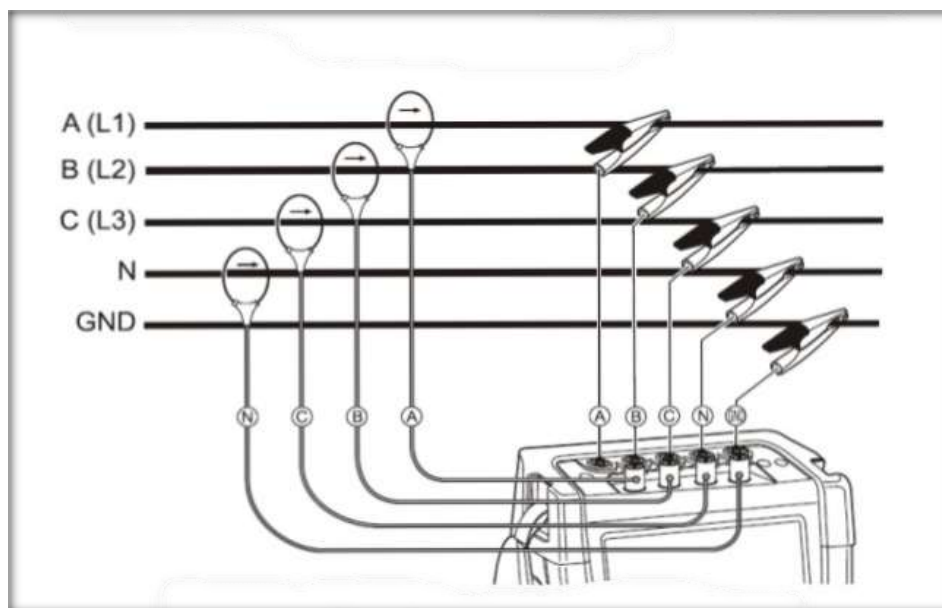
1 W.m = 60 W.s [Watt segundo]

1 W.h = 60 x 60 W.s = 3600 W.s = 3.6 kW.s (kilo Watt segundo)

1 W.s = 1 Joule

El Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables cuenta con tres edificaciones las cuales se alimentan a través de 5 centros de carga, enumerados centros de carga 1 al 5. Se tomaran mediciones en cada uno de los cinco puntos de medición.

Para hacer las mediciones se utilizó el analizador de calidad de potencia y energía, equipo FLUKE 435 Series II, En la figura 3.1 se presenta la configuración en cada circuito trifásico analizado.



*Figura 3.1* Configuración de conexión del dispositivo medidor de potencia y energía (Fluke 435 II). El voltaje y corriente de cada fase es monitoreado para saber la potencia demandada en un lapso de una semana completa, así como también la energía consumida.

Cada circuito se monitoreara por una semana para saber el consumo de cada uno de ellos. Después de realizar estas mediciones se hará una superposición de todos los datos (los cuales tienen una duración de una semana cada uno con mediciones cada 10 segundos) para que podamos estimar la demanda total en una semana con actividades normales de clases y trabajos de oficina.

Las lecturas que se obtendrán del dispositivo de medición serán:

- Corriente ( $I_{RMS}$ )
- Voltaje ( $V_{RMS}$ )
- Potencia aparente
- Potencia real
- Potencia reactiva
- Factor de potencia
- Coseno de Phi
- Energía

### 3.2.5 Mediciones de potencia y energía en equipo de aire acondicionado

A pesar de que las mediciones de potencia y energía nos dieron mediciones del gasto total de energía de los edificios, el sistema que se implementó interviene directamente en los sistemas de iluminación y aire acondicionado. Por lo tanto para poder observar los ahorros logrados se hizo un monitoreo de únicamente los aires acondicionados. La metodología se aplicó antes y después de la instalación y fue la misma (una medición con sistema de ahorro y una sin sistema de ahorro).

- Conexión del dispositivo FLUKE 435 para medir en dos fases a 220 o 230 V.
- Las evaluaciones fueron por día.
- Descarga y análisis de datos.
- Graficar y comparar lecturas del antes y después.

## 3.3 Implementación

### 3.3.1 Elección de modelo de control

Se utilizara como criterio de selección, una tecnología que nos permita controlar apagado y encendido de sistema de iluminación y aire acondicionado, además de que esta tecnología tiene que soportar actualizaciones de programación y conexión de nuevo equipo de monitoreo para que en un futuro puedan hacerse mejoras.

### 3.3.2 Adquisición de datos

#### 3.3.2.1 Materiales:

##### **Arduino UNO:**

Es una plataforma de hardware y software de código abierto, basada en una sencilla placa con entradas y salidas, analógicas y digitales, en un entorno de desarrollo que está basado en el lenguaje de programación Processing. Es decir, una plataforma de código abierto para prototipos electrónicos.

##### **IDE para ARDUINO:**

IDE – entorno de desarrollo integrado, llamado IDE (sigla en inglés de integrated development environment), es un programa informático compuesto por un conjunto de herramientas de programación. Puede dedicarse en exclusiva a un solo lenguaje de programación o bien puede utilizarse para varios.

Un IDE es un entorno de programación que ha sido empaquetado como un programa de aplicación, es decir, que consiste en un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica (GUI). Además en el caso de Arduino incorpora las herramientas para cargar el programa ya compilado en la memoria flash del hardware a través del puerto serie.

##### **Receptor de infrarrojo**

Módulo Receptor de infrarrojos IR VS1838 KY-022 de alta sensibilidad, para proyectos de domótica, robótica, mecatrónica.

- Especificaciones:
- Voltaje de operación: 5 VCD
- Angulo de recepción: 90°
- Frecuencia: 37.9 KHz
- Peso: 3 g
- Dimensiones: 24 x 16 x 14 mm

## **Programa para escanear señal de control remoto**

Este programa de control estará instalado en el ARDUINO UNO para hacer la labor de escaneo de la frecuencia portadora de control de los aires acondicionados. Usará el programa IDE de ARDUINO para codificación, modificación y operación.

## **Controles remoto de los distintos aires**

Para replicar una señal de un control remoto de un aire acondicionado en especial se necesita tenerlo físicamente para obtener dicha señal.

### **3.3.2.2 Proceso para la adquisición de datos**

Para poder replicar los datos que controlan el encendido, apagado, subir y bajar temperatura del aire acondicionado se realizó un programa para tal efecto. Dicho programa se instaló en el arduino UNO. Se conectó un receptor infrarrojo a las terminales Tierra, Vcc y pin 13 del arduino.

Al 'correr' el programa, este se pone en modo 'espera' y se procede presionar los botones que se desean duplicar. Cada botón se presiona frente al decodificador de infrarrojo por al menos 20 veces para obtener las señales de estos. Una vez obteniendo los datos, estos se copian a un archivo de Excel para su posterior tratamiento.

### **3.3.2.3 Procesamiento de datos**

De los escaneos de las señales se obtendrán al menos 20 lecturas, la cantidad de datos dependerá del protocolo de comunicación que el fabricante del control remoto use. Estos datos estarán en tablas de Excel los cuales se les dará el siguiente tratamiento:

- Se buscan las señales con la misma cantidad de datos y se ordenan en una hoja nueva de Excel.
- Se eliminan columnas de datos que a pesar de que tienen la misma cantidad de lecturas, estas difieren bastante unas de otras.
- De las señales parecidas, tanto en cantidad de datos como en los datos mismos, se hacen las diferencias de una señal de referencia contra todas las otras.
- Se saca el promedio de cada una de las columnas obtenidas.
- Los datos resultantes se guardan para su posterior uso en la programación del duplicado de la señal.

Con los datos obtenidos del paso anterior se procede a la programación de un algoritmo de control que replique las señales

### 3.3.2.4 Lógica secuencial del algoritmo

1. Sensor detecta una persona en el cuarto
2. Si detecta a alguien no se efectúa ninguna acción de control (el usuario decide el estado del aire acondicionado y la iluminación del cuarto)
3. Si no se detecta a nadie. El sistema aumenta la temperatura de referencia del aire acondicionado.
4. Si en los siguientes 5 minutos nadie ocupa el cuarto el aire acondicionado se apaga.
5. Si alguien vuelve antes de pasar los 5 minutos el sistema no hace ninguna acción de control (el usuario tiene el control de nuevo).
6. Si en paso dos no se detecta a nadie. La luz se apaga automáticamente.
7. Después de apagado el aire acondicionado y la luz solo se podrán activar cuando un usuario ocupe de nuevo el cuarto.
8. Regreso al paso uno.

### 3.3.2.5 Programas utilizados

#### *LiveWire (simulación electrónica)*

Es una herramienta que permite experimentar con circuitos electrónicos para saber cómo funcionan sin tener que armarlos realmente. Es un “Laboratorio” que permite hacer simulaciones virtuales empleando animación y sonido que demuestran los principios de funcionamiento de los circuitos electrónicos, teniendo la oportunidad de visualizar qué ocurre con el desempeño del circuito cuando se realiza alguna modificación. El programa incluye, transistores, diodos, circuitos integrados, bobinas, resistencias, capacitores y cientos de otros componentes que pueden ser conectados para investigar los conceptos de voltaje, corriente y carga. Su uso es muy sencillo, simplemente se debe “arrastrar” los componentes sobre el área de trabajo y los tiene que conectar siguiendo pasos muy simples hasta formar el circuito que se quiera. Una vez armado el circuito sobre dicho tablero se siguen pasos muy simples para conectarle instrumentos (osciloscopios, fuentes de alimentación, multímetros, frecuencímetros, etc.) y así ver cómo opera. Si se trata de una alarma, por ejemplo, se puede accionar virtualmente un sensor y ver qué ocurre con el sistema de aviso. Es decir, trabajará en forma virtual como lo haría en el mundo real.

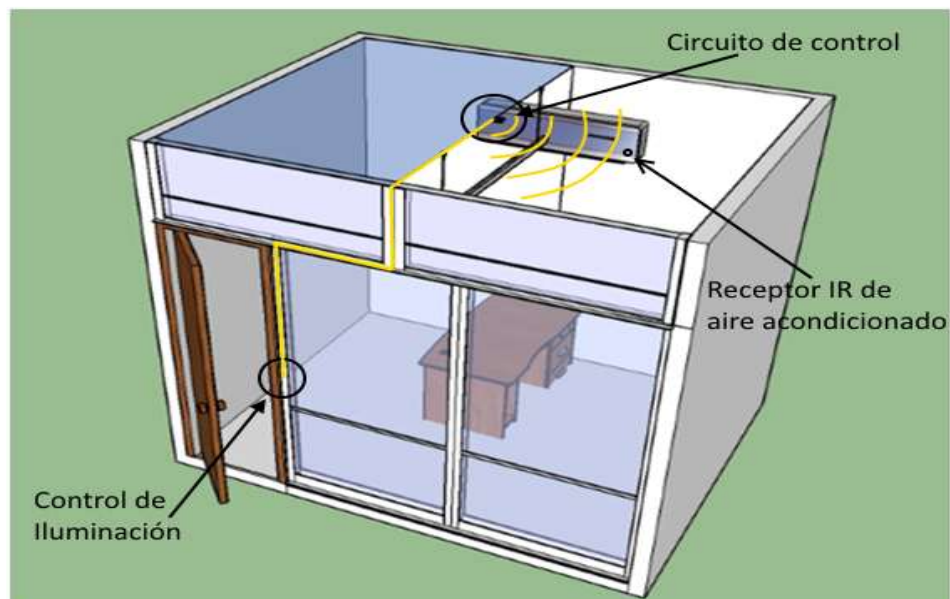
### *PCB Wizard (diseño de circuitos impresos)*

Es un programa muy fácil de aprender y fácil de utilizar. Si se quiere obtener un circuito impreso, simplemente se debe “arrastrar” los componentes sobre un “tablero o documento” y los tiene que conectar siguiendo pasos muy simples. Una vez armado el circuito sobre dicho tablero se tiene que ejecutar una instrucción y PCB Wizard hará el resto... es decir, el circuito impreso aparecerá automáticamente. Se pueden hacer circuitos impresos de una y dos capas; además, se puede interactuar con el programa Livewire para simular el funcionamiento del circuito que se ha dibujado y así se sabrá rápidamente si el prototipo hace lo que el usuario quiere aún antes de armarlo física-mente. Tiene una amplia gama de herramientas que cubren todos los pasos tradicionales de producción en PCB (diseño de circuitos impresos), incluyendo dibujos esquemáticos, capturas esquemáticas, ubicación de componentes y archivos de generación para producir kits y prototipos. En suma, PCB Wizard es un programa que ofrece una gran cantidad de herramientas inteligentes que permiten que “diseñar circuitos impresos” sea muy fácil.

### 3.3.3 Instalación del sistema de ahorro de energía

En cada cuarto se deberá controlar el apagado, encendido, y cambio de temperatura de referencia del aire acondicionado y apagado y encendido del sistema de iluminación.

Se instalara para este fin una caja donde estará ubicado el sistema de control (arduino y placa de potencia) de la forma mostrada en la siguiente figura:



*Imagen 3.2* Cubículo de un investigador en el 3IER.



El circuito de control instalado en el centro de cada cuarto está conectado de forma alámbrica al interruptor de la iluminación y de forma inalámbrica al control IR del aire acondicionado. Un algoritmo de control se encargara de las órdenes y lógica de control.

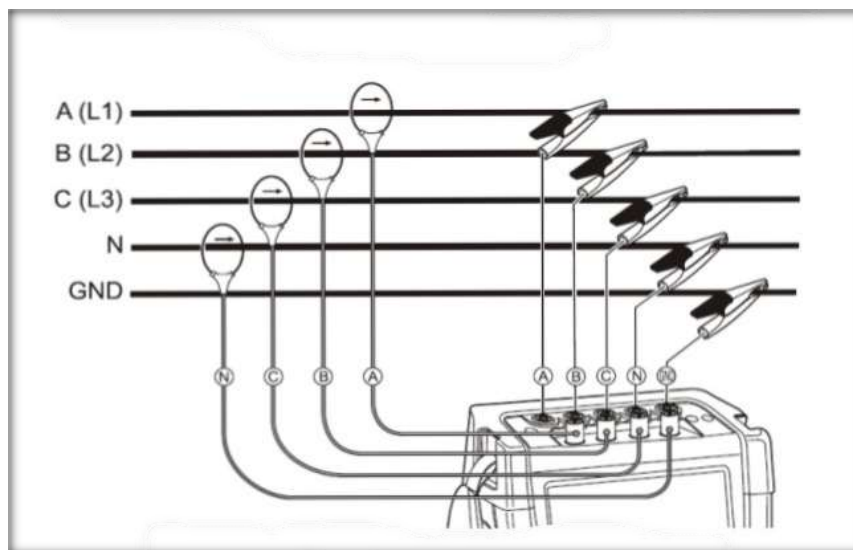
### 3.3.3.1 Pasos para la instalación:

- Localizar cables de alimentación del sistema de iluminación.
- Interrumpir la alimentación con cable en serie (para después conectar el TRIAC)
- Hacer el cableado correspondiente para los sensores.
- Localizar e instalar caja de sensor (o sensores) y caja de circuito electrónico.
- Instalar circuito electrónico.
- Programar arduino.
- Poner a prueba el dispositivo.

## 3.4 Evaluación

### 3.4.1 Mediciones

Para hacer las mediciones se utilizará el analizador de calidad de potencia y energía, equipo FLUKE 435 Series II, En la siguiente figura se presenta la configuración en cada circuito trifásico analizado.



*Imagen 3.3: Configuración de conexión del dispositivo medidor de potencia y energía (Fluke 435 II). El voltaje y corriente de cada fase es monitoreado para saber la potencia demandada en un lapso de una semana completa, así como también la energía consumida.*

Cada circuito se monitoreara por una semana para saber el consumo de cada uno de ellos. Después de realizar estas mediciones se hará una superposición de todos los datos (los cuales tienen una duración de una semana cada uno con mediciones cada 10 segundos) para que podamos estimar la demanda total en una semana con actividades normales de clases y trabajos de oficina.

Las lecturas que se obtendrán del dispositivo de medición serán:

- Corriente ( $I_{RMS}$ )
- Voltaje ( $V_{RMS}$ )
- Potencia aparente
- Potencia real
- Potencia reactiva
- Factor de potencia
- Coseno de Phi
- Energía

### 3.4.2 Análisis de los datos

Los datos se analizarán y compararán con los datos obtenidos antes de la implementación del sistema de control con el fin de descubrir los ahorros logrados. Los programas para este fin serán el Excel, Power log 430 II y el Origin Pro (para graficar).

Los pasos para la obtención de los datos y análisis de estos son los siguientes:

- Monitoreo del sistema eléctrico a analizar. El aparato de medición utilizado es el FLUKE 234.
- Descarga de los datos a un equipo de cómputo.
- Vista de graficas previas para analizar si los datos muestran coherencia con los datos esperados y medidos a través de otro instrumento de medición.
- Convertir los datos a formato .txt.
- Graficar y dar formato de presentación en el programa ORIGIN Pro.
- Presentar graficas de los datos obtenidos.

### 3.4.3 Corrección de problemas en la instalación

En esta sección se trabajara en la corrección de cualquier problema originado por algún problema derivado de la instalación.

- Detectar el error
- Buscar las causas que lo originan
- Corregir falta
- Poner en marcha el dispositivo en donde se halla encontrado el error.

## 3.5 Conclusiones

La metodología planteada fue una recopilación de ideas de distintos documentos (árticos, revistas, etc) debido a que no hay mucha literatura relacionada a la eficiencia de edificios ya construidos que usen sistema de aire acondicionado del tipo mini Split. La información encontrada, ofrece datos de edificios con sistemas centrales de enfriamiento, ventilación natural, uso natural de sombras, etc.

Para los sistemas de iluminación la literatura nos indica varias formas de ahorrar, sin embargo, todas estas normalmente implican regulación de la luz artificial con la natural. Para el nuestro caso de estudio, este proyecto no contemplo cambio

de los tipos de luminarias, por lo tanto, nuestro sistema de ahorro tuvo que ser adaptado a las condiciones ya establecidas de infraestructura.

Para el desarrollo del dispositivo de ahorro se eligió una metodología de construcción que se basara con tecnología de fácil acceso en nuestra región. Por lo tanto, el desarrollo del dispositivo es de fácil construcción y replica.

# CAPÍTULO IV

---

## RESULTADOS

---

### 4.1 Introducción

Para conocer de mejor manera a cualquier sistema, son necesarios datos que muestren las características de este, entre más detalles hallan, mejor. En el campo del consumo de energía, la forma antigua de recolectar datos era de forma manual, leyendo los medidores una vez a la semana o al mes. Esto era toda una faena y no se parece en casi nada a la forma de adquirir datos en la actualidad. La forma moderna de hacerlo es usando dispositivos que hagan mediciones en intervalos de tiempo, de tal forma que estos datos permitan observar patrones de desperdicio que serían imposibles observar de otra forma.

Los detalles en la recolección de datos son invaluable para la identificación de oportunidades de ahorro energético, sin embargo tomar acciones, y monitorear el progreso que se tenga por cada acción tomada, son elementales en el ciclo de mejoramiento de la eficiencia de cualquier sistema.

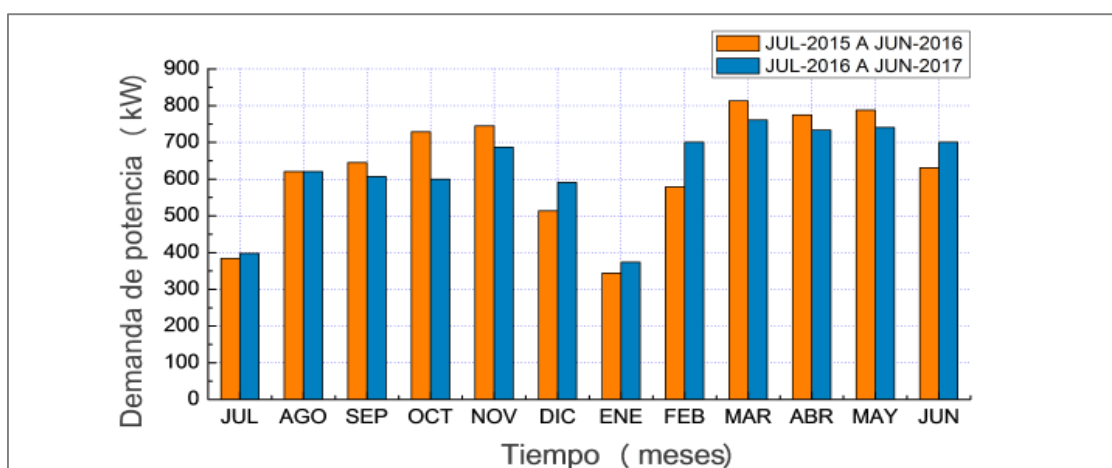
En este capítulo se exponen los resultados emanados del presente trabajo. Los datos y resultados producidos fueron recolectados en respuesta a los tres objetivos específicos planteados en el capítulo 1 de esta tesis. El primer objetivo específico, tuvo como finalidad fundamental el análisis de datos para identificar oportunidades de ahorro de energía. El segundo objetivo abordó el diseño e implementación de un sistema automático de ahorro, el cual controla los sistemas de aire acondicionado e iluminación de los edificios que conforman el 3IER. En el tercer objetivo se analizan datos del antes y después de la implementación del sistema de control. Los tres objetivos específicos buscan dar el primer paso en la realización del primer edificio energía cero en una Universidad pública en América latina. Los tres objetivos fueron completados

exitosamente. Los hallazgos presentados aquí demuestran el potencial de la teoría y la práctica cuando estas son ocupadas a favor del desarrollo responsable.

## 4.2 Diagnostico energético de la UNICACH

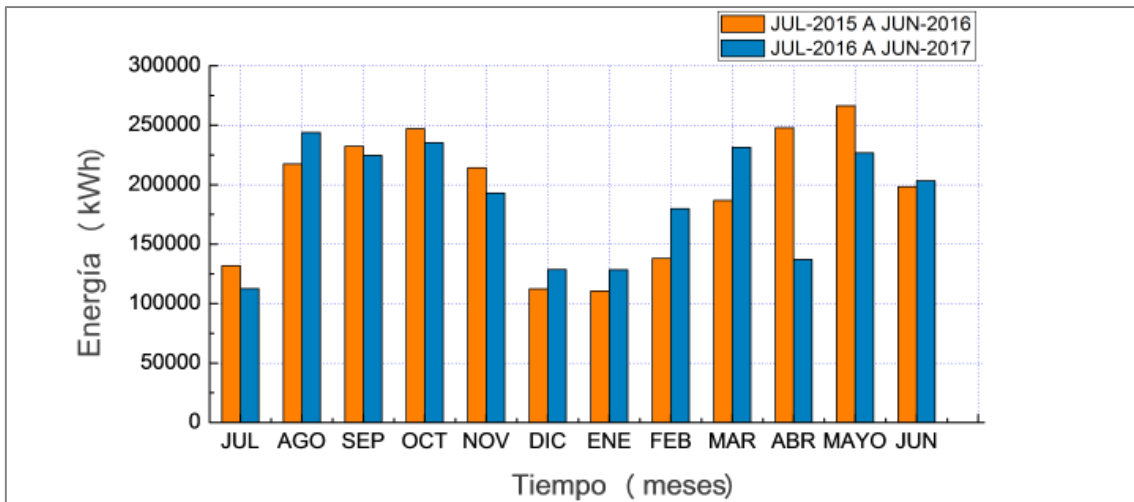
### 4.2.1 Análisis de la factura eléctrica

La Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas campus ciudad universitaria tiene como proveedor de energía eléctrica a la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La tarifa de dicho contrato es la H-M (Tarifa horaria para servicio general en media tensión, con demanda de 100 kW o más). Con una demanda contratada de 880 kW, demanda conectada de 880 kW y multiplicador r700. La figura 4.1.1 muestra la demanda máxima en periodos mensuales de dos años de facturación.



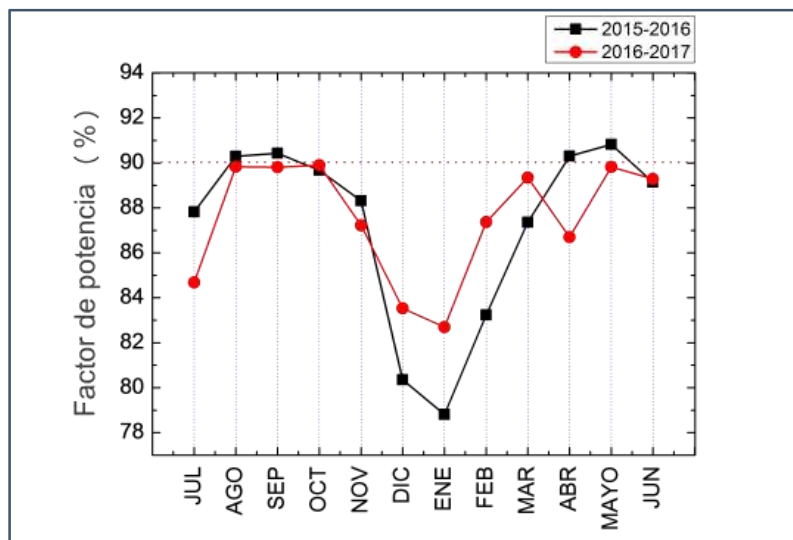
*Figura 4.1.1 Demanda máxima de potencia eléctrica en la UNICACH De julio de 2015 a junio de 2016 y julio de 2016 a junio de 2017. Al compararlas, ambas demandas de potencia lucen muy similares en ambos años, lo cual podría sugerir que el comportamiento en el uso de la energía eléctrica es similar año con año. (Fuente: aviso recibo CFE)*

La demanda máxima de potencia es una de las partes más importantes de la facturación de energía eléctrica de la universidad, ya que delimita el cobro por demanda facturable. Otro de los conceptos que hacen a la factura de energía eléctrica es el consumo de energía medido en kilowatts-hora. En la figura 4.1.2 podemos observar el consumo de energía de la universidad.



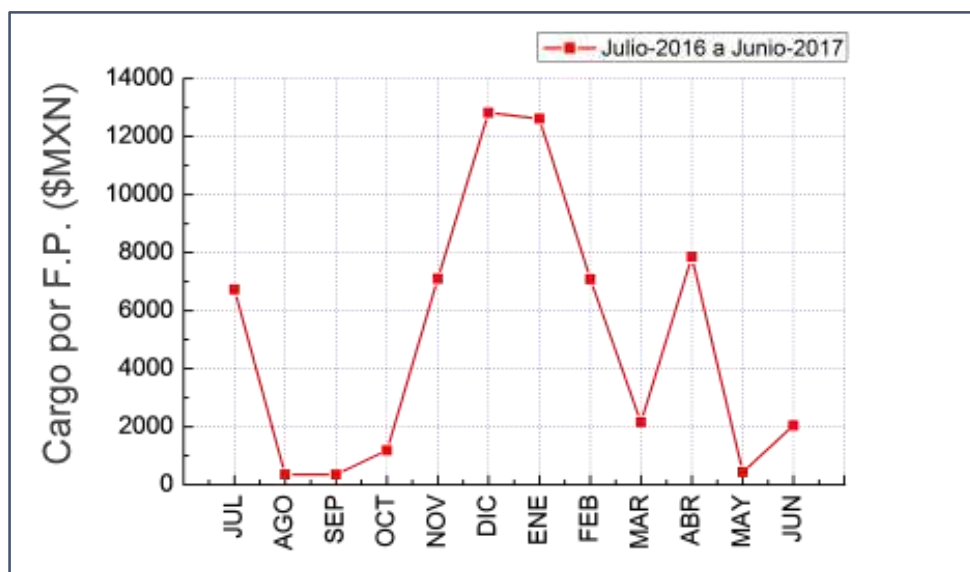
*Figura 4.1.2 Demanda de energía mensual* La demanda de energía de los dos años presentados son similares. El consumo de energía coincide con los periodos de clase Agosto-Diciembre y Febrero-Junio.

En el recibo eléctrico facturado a la UNICACH también se pueden observar multas por bajo factor de potencia en algunos meses. La figura 4.1.3 muestra el factor de potencia en el periodo de Julio de 2015 a junio de 2017. Si observamos las dos gráficas, una en la imagen 4.1.2, y dos, la gráfica de la imagen 4.1.3, podemos ver que hay una coincidencia de los meses en los que menos se gasta energía con los meses con el peor factor de potencia. La mayoría de los meses el factor de potencia está por debajo de lo permitido por la CFE (90% o 0.9).

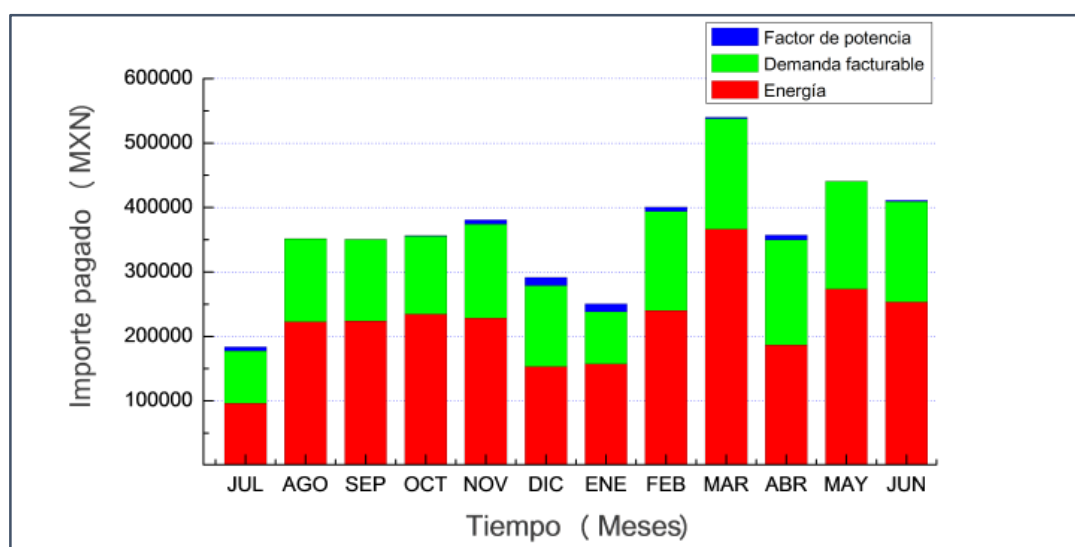


*Imagen 4.1.3 Histórico de factor de potencia de dos años* En la imagen podemos apreciar que los niveles bajos de factor de potencia son en los meses en los que disminuyen las actividades en la universidad, llegando a su punto más bajo en los meses de diciembre y enero en ambos años.

El bajo factor de potencia es penalizado con una multa económica que varía dependiendo de su valor medido mensualmente. En la imagen 4.1.4 podemos observar la multa cobrada por parte del proveedor eléctrico a la UNICACH en el periodo de Julio de 2016 a Junio de 2017. La imagen 4.1.5 muestra la cantidad pagada en pesos mexicanos en el mismo periodo.



*Imagen 4.1.4 Importe pagado por bajo factor de potencia* El factor de potencia es uno de los tres rubros que componen la factura mensual de la UNICACH. En este reporte anual de Julio de 2016 a Junio de 2017 podemos observar que los mayores cobros en moneda nacional se dan cuando el factor de potencia toca su punto más bajo, en los meses de Diciembre y Enero. Curiosamente los meses en que menos se paga por los otros dos rubros facturables.



*Imagen 4.1.5 Componentes de la factura eléctrica mensual* Los cargos que CFE hace a la UNICACH están divididos en tres rubros (Sin incluir I.V.A). Aquí podemos ver las cantidades que componen el total cobrado a la institución por factor de potencia, demanda facturable y energía consumida en el periodo de Julio de 2016 a Junio de 2017. Todas las cantidades dadas en pesos mexicanos.

El análisis de facturación energética es de gran importancia para el desarrollo de diversas metodologías que logren un mayor aprovechamiento en el consumo energético, fomentando técnicas de ahorro de energía eléctrica.

Este análisis se llevó a cabo para tener un panorama en el comportamiento del consumo energético, localizando posibles problemas y dando soluciones;



previniendo altos costos y futuros daños en el sistema eléctrico. En el caso de la UNICACH se consideró investigar de manera detallada ciertos aspectos de la facturación eléctrica, que darán paso a la implementación de diferentes proyectos para el ahorro y uso eficiente de la energía para diversas actividades. Se detectaron ciertos parámetros que son responsables de altos costos en el recibo eléctrico, tal es el caso de la disminución del factor de potencia por debajo de 0.9, ya que la empresa CFE penaliza a la institución, haciendo un cargo extra por este fenómeno, de igual forma se observa que la carga contratada por la universidad es de 880 *kW* y debido a que la universidad se expandirá en un futuro esta carga aumentara, por lo que, se debe tomar en cuenta ya que la empresa CFE cobra el excedente del consumo por carga contratada a un precio más elevado al establecido por la tarifa H-M por *kW*.

Desde un punto de vista económico, la cantidad de dinero anual que la universidad paga debido al consumo de energía es para considerarse como oportunidad de inversión en fuentes alternas de energía renovable. La generación de energía solar o eólica en sitio podría contribuir de manera muy importante en la producción de energía eléctrica fomentando el uso de fuentes alternas de energía y logrando una reducción de costos y apoyando al medio ambiente.

## 4.2.2 Censo de carga conectada del 3IER

Los recibos facturados a la UNICACH nos muestran datos importantes del consumo de energía de toda la escuela, sin embargo no se tenían datos de como es el comportamiento del consumo de los edificios cubiertos en este estudio. Por esta razón, se hizo un censo de la carga conectada al 3IER. Primeramente se dividió la carga total en 7 rubros. Los cuales fueron:

- Iluminación
- Aires acondicionados
- Equipo de computo
- Equipo de laboratorio
- Equipo o herramientas de taller
- Refrigeración y cafetería
- Otras cargas

### 4.2.2.1 Iluminación

El objetivo de hacer un censo en este rubro es establecer los requerimientos de iluminación en las áreas de los centros de trabajo, laboratorios y salones para que se cuente con la cantidad de iluminación requerida para cada actividad visual, a fin de proveer un ambiente seguro y saludable en la realización de las tareas que desarrollen los trabajadores.

La imagen 4.2.1 muestra las lámparas instaladas en el edificio 23, se contabilizaron 70 bases de lámparas, de las cuales 24 están instaladas en la

planta baja y 46 instaladas en la planta alta, haciendo un total de 140 lámparas fluorescentes en todo el edificio.

Las lámparas instaladas en este edificio tienen las siguientes características:

MARCA	INFORMACIÓN	OBSERVACIÓN
PHILIPS	<b>F32T8/TL850 800 SERIES 32 WATT Y BALASTRO 2X32</b>	BASE DE LAMPARA CON 2 DOS LAMPARAS DE 32 WATT CADA UNA. 2850lm



*Imagen 4.2.1A* Tubo Philips 32 W



*Imagen 4.2.1B* Balastro Philips 2x32

En el edificio 24 se contabilizaron 102 bases de lámparas tipo LED, de las cuales 41 están instaladas en la planta baja y 61 instaladas en la planta alta, haciendo un total de 204.

Las características de las lámparas son las siguientes:

MARCA	INFORMACIÓN	OBSERVACIÓN
uiui	<b>T8 LED. Luz fría. 18 / 6500K CRI 70 127 V-60 Hz. 85-190 mA.</b>	<b>Cada base tiene dos lámparas de 18 W.</b>



*Imagen 4.2.2A* Lámparas LED instaladas en el edificio 24 del CIDTER



*Imagen 4.2.2B* Vista ampliada de lámparas LED del edificio 24

En el edificio taller se contabilizaron 13 bases de lámparas con 2 lámparas en cada base, haciendo un total de 26. La imagen 4.2.3 muestra los dispositivos de iluminación instalados en este edificio. Los detalles de describen a continuación:

MARCA	INFORMACIÓN	OBSERVACIÓN
MEGAMEX evolution	LÁMPARAS DE 28 WATT balastro 2x28	Cada base tiene dos lámparas de 28 W.



*Imagen 4.2.3A* Lámpara fluorescente en edificio taller, CIDTER.



*Imagen 4.2.3B* Balastro para lámparas fluorescente del taller.

La carga total del 3IER en el rubro de iluminación es mostrada en la tabla 4.1. Donde puede observarse el total de lámparas en los tres edificios que conforman el 3IER y el total de watts que estas consumen según sus placas de datos:

*Tabla 4.1 Demanda total de iluminación conectada* En esta tabla se muestran la potencia total conectada en los tres edificios del CIDTER

EDIFICIO	CATIDAD DE LAMPARAS	MODELO	CONSUMO	CONSUMO POR EDIFICIO
23	140	F32T8/TL850 800 SERIES	32 Watts	4, 480 Watts
24	204	T8 LED. Luz fría. 18 / 6500K CRI 70 127 V-60 Hz. 85-190 mA.	18 Watts	3,672 Watts
TALLER	26	MEGAMEX evolution t52865 6500k 127 V	28 Watts	728 Watts
			Total:	11, 736 Watts

#### 4.2.2.2 Carga conectada por aire acondicionado

Para encontrar la carga total que representan todos los aires acondicionados se hace la lectura de datos de placa de cada uno de los aires acondicionados y posteriormente se hace la suma de la información obtenida. Dichos datos se encuentran localizados en el condensador (unidad exterior) o evaporador (unidad interior) de cada unidad. Todos los equipos de aire acondicionado son del tipo mini Split. Las unidades exteriores se encuentran localizadas en el techo de los edificios y las unidades interiores se encuentran en cada uno de los espacios que se desean enfriar. A continuación se muestra la imagen de una placa de un aire acondicionado de donde se obtuvieron los datos posteriormente enlistados.



*Imagen 4.2.4 Datos de placa de sistemas de Aire Acondicionado Cada aire acondicionado cuenta con una placa en donde el fabricante especifica datos importantes como Voltaje de operación, máxima corriente demandada y potencia nominal del equipo.*

Los equipos reportados en este apartado están ubicados en los edificios 23 y 24. La suma de las potencias demandadas de las dos edificaciones hace el total de la demanda de potencia en el rubro de sistemas de aire acondicionado.

A continuación se muestra el listado de las unidades examinadas:

*Tabla 4.2 Suma total de la carga debido a los aires acondicionados en el edificio 23 del CIDTER.*

Edificio 23						
Cantidad	Marca	Modelo	Voltaje	Corriente (Amps)	Potencia individual (Watts)	Potencia total (Watts)
7	LG	SP122CM	220	5,2	1192	8,344
1	LG	SP242CN	220	11,2	2355	2,355
1	MIDEA	M-18CDA	220	8,5	1670	1,670
2	LG	SJ122CD	220	5,2	1090	2,180
1	MIDEA	M-24CDA	220	10,5	2300	2,300
1	GE	AS12HDB	220	N	1700	1,700
2	LG	SP242HM	220	11,6	2360	4,720
1	LG	S342CP	220	17	3890	3,890
					<b>Total:</b>	<b>27,159</b>

Tabla 4.3 Suma total de la carga por aires acondicionados en el edificio 24 del CIDTER.

Edificio 24						
Cantidad	Marca	Modelo	Voltaje	Corriente (Amps)	Potencia U (Watts)	Potencia total (Watts)
12	York	YHFFYCO36BBA-AX	220	16	3,283	39, 396
7	York	YSDA12FS-ADK	220	5.05	1,090	7, 630
					<b>Total:</b>	<b>47, 026</b>

La carga total conectada a los dos edificios 23 y 24 es de 74, 185 *Watts*. Las unidades de aires acondicionados son unidades de tipo mini Split con un condensador en el exterior y una unidad interior.

#### 4.2.2.3 Equipos de cómputo

Para encontrar la carga que representa este rubro se tomaron lecturas de los datos de las placas de todos los equipos de cómputo e impresión. No se encontraron equipos a los que no se les pudiera ver dichos datos, por lo tanto no se recurrió a otro método para saber la carga total.

Los pasos a seguir fueron:

- Tomar datos de placas
- Hacer un listado de todos los equipos encontrados
- Sumar todas las potencias obtenidas de las placas e datos de los dispositivos.
- 

Para el caso de que los datos de las placas no estén disponibles se hace una medición del amperaje y voltaje que energizan al dispositivo y se calcula la potencia aparente que el equipo consume con la siguiente formula:

$$P = I * V \quad \dots \text{Ec. 4.1}$$

Para hacer esta medición se utilizó un amperímetro de gancho (el medidor de la marca AMPROBE, modelo: ACD-41PQ) que mide corriente, voltaje y tiene un apartado especial para darnos directamente datos de potencia.

La carga total conectada debida a los sistema de cómputo (computadoras e impresoras) es de 20, 283.22 *Watts*. La siguiente tabla muestra un concentrado

de los equipos conectados y el total conectado en el Centro. En el apéndice 5.3 se muestra una tabla detallada de todos los aparatos conectados.

*Tabla 4.4 Concentrado de carga por equipos de cómputo (Ver anexo 5 para más detalles)*

EDIFICIO 23		
Cantidad	Dispositivo	Potencia (Watts)
11	Impresoras	7040
29	Computadoras	4482,12
EDIFICIO 24		
40	Computadoras	3728,1
9	Impresoras	3648
TALLER		
1	Computadora	40.8
Portátiles (lap tops)		
35	Lap tops	1225
Total:		20, 164.02 Watts

Los equipos conectados son computadoras de escritorio, laptops de distintas marcas y modelos, impresoras de distintas capacidades, etc. Las siguientes imágenes son ejemplos de los dispositivos conectados.

#### 4.2.2.4 Equipos de laboratorio

El 3IER cuenta con 6 laboratorios para distintas actividades científicas. La carga que representan estos dispositivos es variada y depende mucho de la actividad científica del centro.

Para encontrar la carga que representa este rubro se tomaron lecturas de los datos de placas de todos los equipos encontrados en los laboratorios. En caso de no contar con los datos de las placas se prosiguió hacer una medición con un medidor de gancho para calcular el consumo.

*Tabla 4.5 Lista de carga conectada a los laboratorios del 3IER.*

CARGA CONECTADA A LOS LABORATORIOS DEL CIDTER	
Laboratorio	Carga conectada
Lab. De sistemas de control	3, 314.98
Lab. De caracterización de materiales	17, 969.98
Lab 1. Edificio 24	129.7
Lab 2. Edificio 24	17, 151
Lab 3. Edificio 24	15, 617.5

Lab 4. Edificio 24	1, 532
Total:	55, 715.16

A continuación se muestra el inventario completo de la carga conectada en equipo de laboratorio:

*Tabla 4.6* Lista de carga conectada a los laboratorios del edificio 23

Lab. De sistemas de control					
D07S	Comp. Escritorio DELL	127	4,4	1	558,8
LG 37CH40	Television LG	127	18	1	2286
TECHNO 400	CNC31	127	0,78	1	99,06
HP PAVILLON	laptop	132,7	0,23	1	30,521
Lenovo	laptop	130	0,31	1	40,3
HP	laptop	130	2,31	1	300,3
Lab. de caracterizacion de materiales					
Pedrollo	Bomba de agua	115	1	1	115
ZLXE005WW	Purificador de agua	127	2,5	1	317,5
Rio55a M-33	Riossa	127	7	1	889
Raigeku	X RAY	240	20	1	4800
AMCR5350	Acondicionador de voltaje	208	41,66	1	8665,28
SynergyUV	UVSystem	120	0,56	1	67,2
Cimarec	plancha	120	12	1	1440
Dell	Computadora	120	4,4	1	528
Thermo	plancha	120	8,9	1	1068
cvp-3250c	Agitador	120	0,5	1	60
	Balanza	100	0,2	1	20
				Total:	21284,961

*Tabla 4.7* Lista de carga conectada a los laboratorios del edificio 24.

Laboratorio 1					
weller TC201T	cautin	120	0,216666667	1	26
	Computadora de escri.	120	0,216666667	1	26
hp	Computadora de escri.	120	0,364166667	1	43,7
Laboratorio 2					
6400 calorimeter	calorimetro	120	5	1	600
Thermo	mufla	120	12	1	1440



Balanza analitica	balanza	120	12	1	1440
Thermo	parrilla electrica	120	8,9	3	3204
Nobertthem SN326443	Mufla cilindrica	230	8,9	1	2047
VTC-50A	Spin coater	110	10	1	1100
Baluv	Reactor	115	0,217391304	1	25
Linder blue M	Horno	120	6,8	1	816
Labconco premier		120	10		1150
polyscience	baño de agua	120	8,6	1	1032
ultrasonic bath 9.5L	ultrasonicbath	120	4,1	1	492
bante instrument	bate	110	4,590909091	1	505
Felisia mufla	mufla	120	12,5	1	1500
master Hardrare	motor	110	16,36363636	1	1800
Laboratorio 3					
WRP05DXA	FRIGOBAR	127	3	1	381
Superminizoo	Xray Raigaku	120	15	1	1800
DELL	CPU	120	1	1	120
acer X173W	MONITOR	120	1,5	1	180
HPE3E03A	impresora	120	5,3	1	636
Thermo scientific	espectometro	120	2,5	1	300
vogarlan-12	regulador	120	16	1	1920
GWinsteGPS-303000	Regulador	120	1,25	1	150
Spexsampleprep		115	7,5	1	862,5
Thermoscientific	plancha	120	8,9	1	1068
ultrasonic bath 2.8L	ULTRASONIC	120	2,1	1	252
15337410	cargador de baterias	120	10	1	1200
keithley	multimetro	120	0,1833333333	1	22
elevador reductor de V.		220	4,545454545	1	1000
Raigaku ultra dry		120	2,5	1	300
DELL	Cpu	120	1	1	120
Dell	monitor	120	1,5	1	180
Particulate System	analizador de particulas	120	2,0833333333	1	250
Flowprep060	micrometro	120	1,25	1	150
Carbolite Gero		120	2,9	1	348
MTF25	Regulador	120	15	1	1800
prefiervacum	service center	120	6,9	1	828
acros	refrigerador	120	4,166666667	1	500
Regulador	regulador	120	12,916666667	1	1550
dell	monitor	120	1,5	2	360
Laboratorio 4					
Binder 62574-8713	Horno	120	9,166666667	1	1100
BCN3D	Impresora 3D	120	3,6	1	432
<b>Total:</b>					<b>33524,2</b>

#### 4.2.2.5 Equipos de taller

Los equipos eléctricos del taller se usan dependiendo de los requerimientos de trabajo del centro. Existen varios tipos de equipos de alto consumo, los cuales demandan altas corrientes y producen variaciones considerables en la red eléctrica. En esta sección se muestra una lista de los equipos utilizados en el taller del 3IER así como la potencia que demandan.

Para encontrar la carga que representa este rubro se tomaron lecturas de los datos de las placas de todos los equipos encontrados en los laboratorios. En caso de no contar con los datos de las placas se prosiguió hacer una medición con un medidor de gancho para calcular el consumo.

Los pasos a seguir fueron:

- Tomar datos de placas
- Hacer un listado de todos los equipos encontrados
- Sumar todas las potencias obtenidas de las placas e datos de los dispositivos.

Para el caso de que los datos de las placas no estén disponibles se hace una medición del amperaje y voltaje que energizan al dispositivo y se calcula la potencia aparente que el equipo consume con la siguiente fórmula:

$$P = I * V$$

... Ec. 4.2

Para hacer esta medición se utilizó un amperímetro de gancho (el medidor de la marca AMPROBE, modelo: ACD-41PQ) que mide corriente, voltaje y tiene un apartado especial para darnos directamente datos de potencia.

#### IMPLEMENTACIÓN

*Tabla 4.8 Carga conectada en el taller del 3IER.*

Taller					
Marca	Equipo	Voltaje De operación	Amperaje De operación	Cant.	Potencia (En Watts)
RR16P6LX	Frigobar	115	0,8	1	92
Toshiba	laptop	120	0,34	1	40.8
Cyclone	vebtilador	120	1,1	1	132
Takoma14X40	Torno	220	6,4	1	1, 408

Miller252	Soldadura	220	46	1	10, 120
Infra	soldadura	220	15,9	1	3, 500
Craftsman	Taladro	120	6	3	2, 160
Truper-tapi	Taladro	120	2,1	1	253
Dewalt	cortadora	120	16,7	1	2, 000
Skilsaw	Sierra de mesa	127	13,3	1	1, 689.1
Siemes	motor	220	19,5	1	4, 290
Pretul	cortadora	115	15	1	1, 725
Skil	Esmeril	120	3	1	360
Truper	esmeril	120	8	1	960
Craftman	taladro	120	6	2	1, 440
	Radio	120	0,1	1	12
Spot Welding	Sierra de mesa	120	15	1	1, 800
Infra	Soldadura	120	18	1	2, 169
Khova	Cepilladora portatil	120	15,5	1	1, 864
<b>Total:</b>					<b>36, 014.9</b>

#### 4.2.2.6. Refrigeración y cafetería

Para encontrar la carga que representa este rubro se tomaron lecturas de los datos de las placas de todos los equipos encontrados en los laboratorios. En caso de no contar con los datos de las placas se prosiguió hacer una medición con un medidor de gancho para calcular el consumo.

Los pasos a seguir fueron:

- Tomar datos de placas
- Hacer un listado de todos los equipos encontrados
- Sumar todas las potencias obtenidas de las placas e datos de los dispositivos.

Para el caso de que los datos de las placas no estén disponibles se hace una medición del amperaje y voltaje que energizan al dispositivo y se calcula la potencia aparente que el equipo consume con la siguiente formula:

$$P = I * V \quad \dots \text{Ec. 4.3}$$

Para hacer esta medición se utilizó un amperímetro de gancho (el medidor de la marca AMPROBE, modelo: ACD-41PQ) que mide corriente, voltaje y tiene un apartado especial para darnos directamente datos de potencia.

## IMPLEMENTACIÓN

Se tomaron medidas de todas las placas de los equipos y se realizó una lista de todos ellos. Aquí se presenta dicho listado:

*Tabla 4.9 Equipos de refrigeración y cafetería*

No referencia	Equipo	Voltaje (V)	Corriente (A)	Cantidad	Potencia (W)
77807-5017	Cafetera	131	0,43	1	56,33
WS5501Q	frigobar	127	3	1	381
WS5501Q	frigobar	127	3	1	381
	cafetera	120	7,5	1	900
WS5501Q	Frigobar	127	3	1	381
	Cafetera	127	5,6	1	711,2
	Moledora de café	127	9,06	1	1150
76986-3010	cafetera	125	10	1	1250
Dolce gusto	cafeteria	120	12,5	1	1500
whirlpool	frigobar	127	3	1	381
	cafetera	120	10	1	130
WRP05DXA	FRIGOBAR	127	3	1	381
Acros	refrigerador	120	4,17	1	500
RR16P6LX	Frigobar	115	0,8	1	92
<b>Total:</b>					<b>8194,53</b>

### 4.2.2.7. Otras cargas

La tabla 4.10 muestra un listado de los equipos que no pertenecían a los otros rubros arriba mencionados. Equipos como hornos de microondas, despachadores de agua, etc.

*Tabla 4.10 Listado de equipos que pertenecen al grupo "otras cargas"*

DC-300	Despachador de agua	131	5,6	1	733,6
	microondas	120	8,75	1	1050
Benq MX522P	proyector	120	2,7	1	324
	microondas	120	8,75	1	1050
Benq MX522P	Proyector	127	2,7	1	342,9
DC-300	Despachador de agua	131	5,6	1	733,6
workcentre3615	fotocopiadora	127	11	1	1397
regulador	regulador	127	15	1	1905
whirlpoll	microondas	120	8,75	1	1050

	cargador de baterias AA	120	0,05	1	6
Benq MX522P	proyectores	120	2,7	4	1296
	Celulares	120	0.05	60	360
				Total:	10248,1

#### 4.2.2.8. Carga total conectada

Cuantificar las cargas conectadas en un edificio nos da una idea amplia de los requerimientos que se necesitarían en caso de que todos los dispositivos de cierto lugar estuvieran funcionando al mismo tiempo. La suma de las potencias de consumo de todos los equipos nos indica la demanda máxima que podríamos necesitar para suplir los requerimientos de un edificio. En la imagen 4.2.5 se muestra una gráfica de pastel que representa la carga total conectada a los edificios del 3IER en los siete rubros distintos que se eligieron para cuantificar la carga conectada.

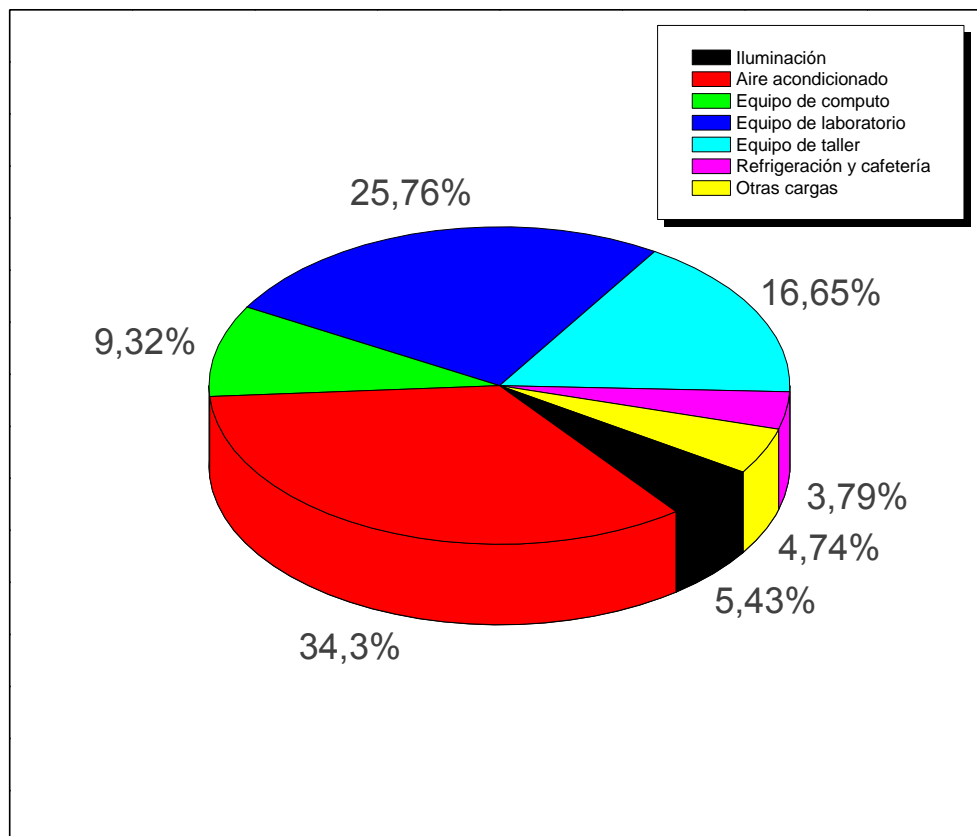


Imagen 4.2.5 Gráfica de carga total conectada a los edificios que conforma el 3IER.

Como se puede observar en la gráfica, los rubros con la mayor carga conectada son el de aire acondicionado con un 34.3 %, equipos de laboratorio con un 25.76% y equipos del taller con un 16.65 %. El total de estos tres rubros equivale al 76.71 % de la carga total conectada.

### 4.2.3 Mediciones eléctricas

Antes de analizar los resultados y discusiones de esta sección debe de observarse que estas mediciones se repitieron para todos circuitos que abastecen de energía eléctrica a los tres edificios del 3IER. Las mediciones se realizaron en lapsos de una semana, tomando en cuenta que el comportamiento es similar en todas ellas (excepto en semanas de vacaciones, semanas de eventos especiales, o semanas con ocupaciones fuera de lo común). De los cinco circuitos que abastecen de energía eléctrica al instituto de investigación, los circuitos 1 y 2 son para el edificio 23, los circuitos 3 y 4 para el edificio 24 y el circuito 5 suministra el taller del instituto. Acorde con lo antes expuesto, la figura 4.2.6 muestra un diagrama general del conexionado de dichos circuitos con los centros de carga a cada edificación. La numeración de cada centro de carga depende del circuito eléctrico del mismo número.



*Imagen 4.2.6 Conexión de circuitos de alimentación* Los circuitos eléctricos 1 y 2 se conectan a los centros de carga 1 y 2, los cuales son la fuente de alimentación del edificio 23. Los circuitos 3, 4 y 5 suministran energía eléctrica al edificio 24 y al taller. El total de los centros de carga recibe potencia de dos transformadores, tal y como se muestra en esta imagen.

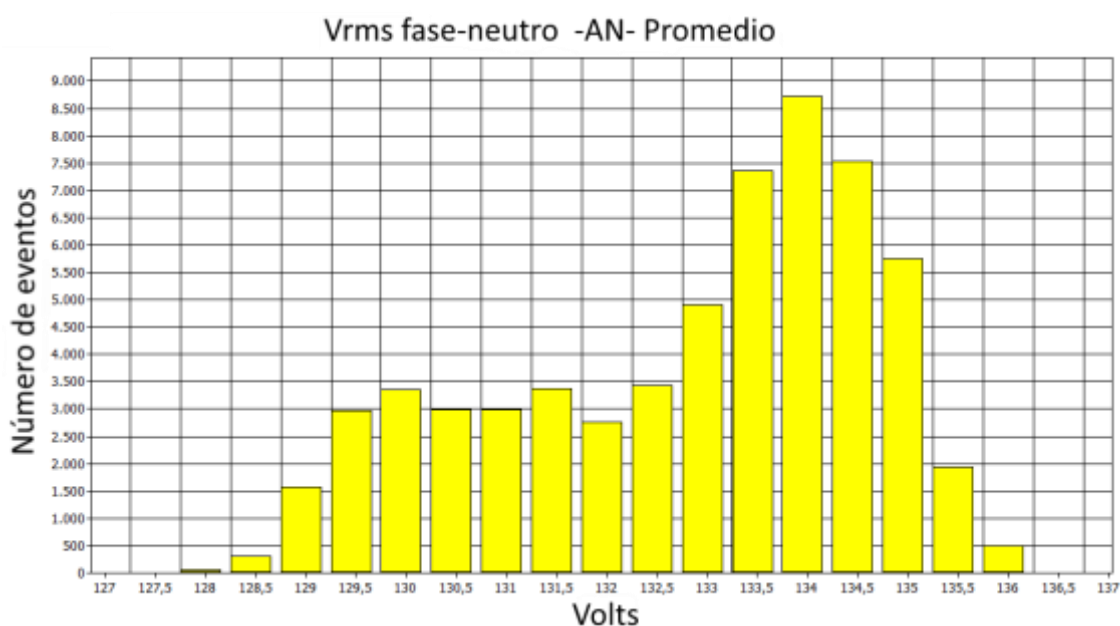
### 4.2.3.1 Mediciones eléctricas en edificio 23

En cuanto a las mediciones, estas fueron en la sección de *potencia y energía*, las cuales abarcan mediciones de voltaje, corriente, potencia (activa, reactiva y aparente), energía y factor de potencia.

#### *Mediciones de voltaje*

Con respecto a las mediciones de voltaje, se presenta aquí un análisis estadístico de las lecturas de voltaje de una semana completa en el centro de carga 1 (circuito 1). Como primer paso, cabe mencionar que las cargas conectadas a este centro de carga son mayormente sistemas de iluminación, sistemas de cómputo y algunos sistemas de aire acondicionado. Además, este circuito se encuentra conectado a un sistema fotovoltaico a través de un inversor con capacidad de 5 *kWp*. Dicho de otra manera, es probable que las lecturas aquí presentadas estuvieran influenciadas por este sistema, sin que en esta tesis adentremos en dicho tema.

Las lecturas se hicieron cada 10 segundos, el total de mediciones en una semana fue de 60 480. A pesar de que el voltaje suministrado por el proveedor de energía eléctrica (Comisión Federal de Electricidad) es de 127 Volts, definitivamente los datos de la figura 1 muestran un voltaje bastante arriba de lo nominal para la fase A. La mayoría de los datos están entre 132 y 136 Volts. Teniendo como intervalo con la mayor frecuencia 134 Volts. Los valores extremos fueron: 135.89 el más alto y 86.17 Volts el más bajo.



*Imagen 4.2.7 Frecuencia de voltajes medidas en el edificio 23 en el 3IER.*

En vista de que estas mediciones de voltaje alto se repiten en las otras dos fases del circuito 1 (fase B y fase C), tal y como se muestra en las tablas n, cabe decir que un voltaje alto podría ocasionar comportamientos negativos en la confiabilidad de los equipos. Dicho de otra manera todo equipo está diseñado para funcionar dentro de ciertos parámetros nominales y cualquier variación fuera de estos podría afectar significativamente los costos de operación, desempeño y expectativa de vida [15], [16].

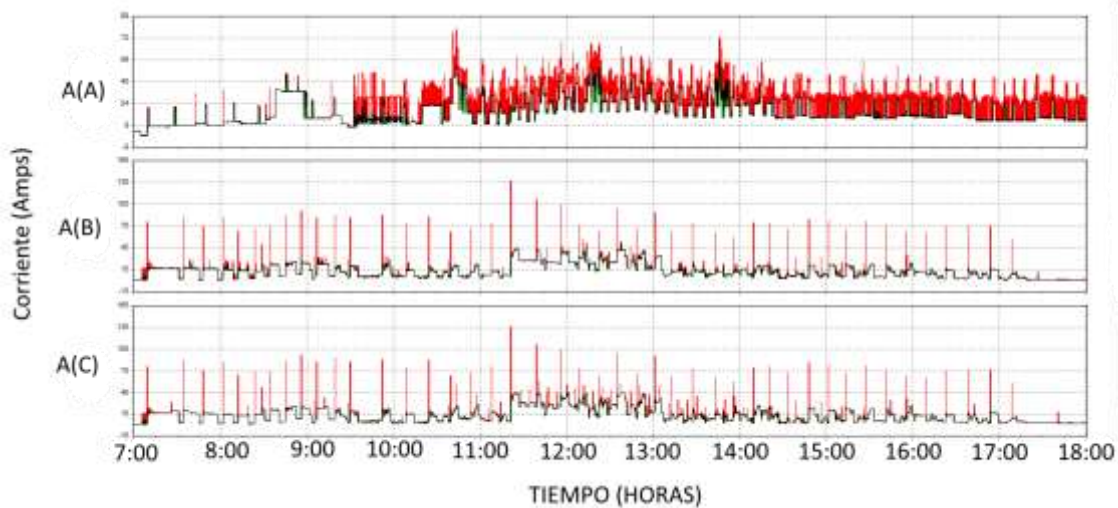
RESUMEN DE FASES (valores extremos)	FASE A	FASE B	FASE C
Voltaje superior	135.82 V	135.3 V	138.45 V
Voltaje inferior	127.45 V	127.56	130.14 V
Voltaje promedio	132.53 V	131.93 V	135.07 V

Como se hizo mención en el apartado de carga total conectada, los motores de los aires acondicionados son los que representan la mayor demanda de potencia en las edificaciones. De la tabla anterior se observan dos cosas, la primera es el alto voltaje promedio en las tres fases, y la segunda es el desbalance de voltaje entre fases. Las dos situaciones son negativas para los motores de los sistemas de enfriamiento. [Referencia variación de voltaje en motores]

### *Mediciones de corriente*

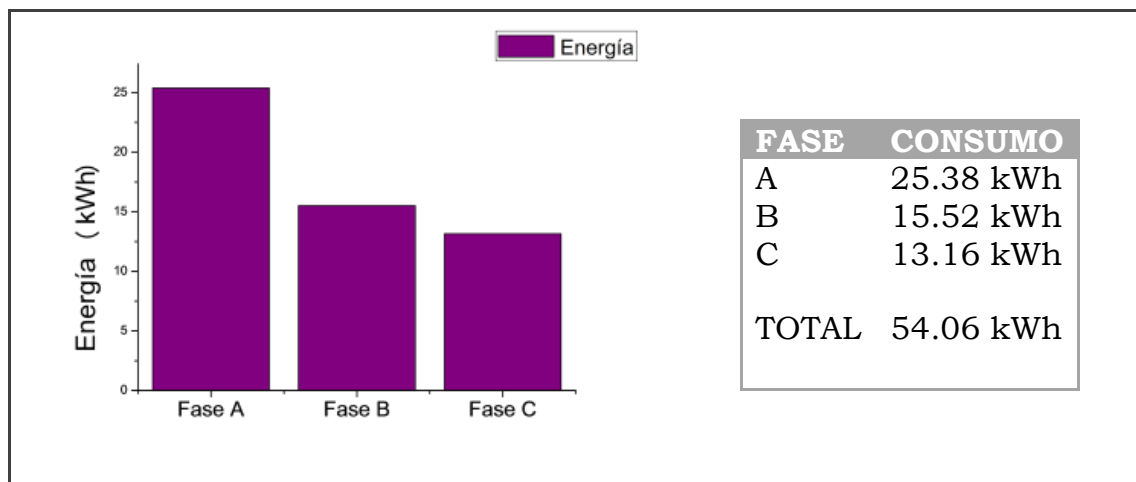
A diferencia del voltaje, la corriente depende de lo que nuestros dispositivos demandan y podrá tomar diferentes valores en un mismo dispositivo dependiendo si el dispositivo está arrancando, se encuentra en su consumo nominal, o está sobrecargado. Además, sus formas de onda podrían incluso llegar a deformar las ondas de voltaje. En este análisis, observamos que los cambios de corriente son cíclicos, los cuales hacen que la demanda de potencia también lo sea, la figura tal nos muestra el comportamiento general de la corriente en las tres fases. Se observa que los pulsos de corriente se comportan de manera similar en las fases B y C. Los pocos aires acondicionados conectados a estas fases originan tal comportamiento. En cambio, la fase A tiene un comportamiento distinto, debido a que toda la iluminación y otras cargas como sistemas de cómputo, impresoras, cafeteras, etc., están conectados a esta fase.





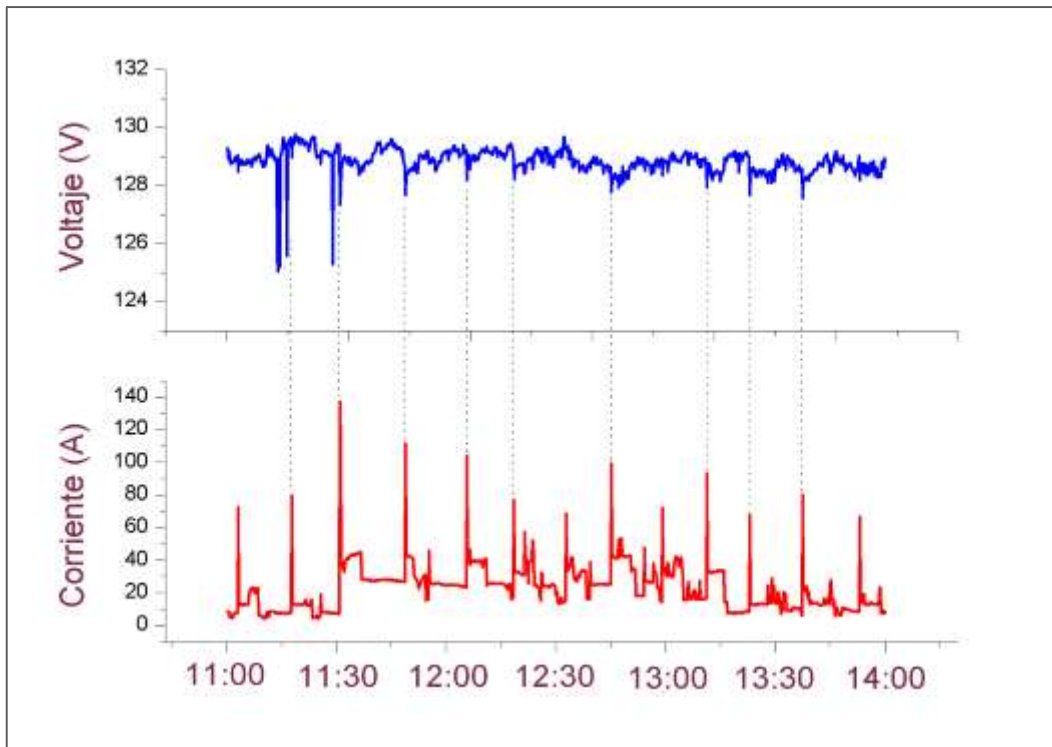
*Imagen 4.2.8 Demanda de corriente* En esta imagen se presentan las lecturas de corriente demandada en un horario de labores del CIDTER.

Este comportamiento repetitivo y de sobre demanda de corriente en una de las fases hace que el consumo por fase este en desbalance, por lo tanto la energía que se consume será distinta en las fases B y C con respecto a la fase A, la figura siguiente muestra el consumo d energía durante un día en las tres fases.



*Imagen 4.2.9 Consumo de energía del circuito 1* La sobre demanda de corriente en dos de las fases del circuito 1 medida en un día hace que la energía consumida sea mayor en ellas. La mayor parte de la carga se encuentra coectada a la fase A lo cual se puede apreciar en esta imagen.

Simultáneamente, observando la imagen 4.2.10, es posible apreciar una cantidad importante de picos en la demanda de corriente. Cuando se enciende un motor eléctrico, se genera una corriente de entrada que podría causar variaciones al voltaje, y si esta corriente es lo suficientemente severa, podría incluso notarse en una baja de iluminación en los sistemas de alumbrado [referencia Schneider motor article]. La imagen 6 nos muestra los puntos en los que los picos de corriente influyen en el valor del voltaje.



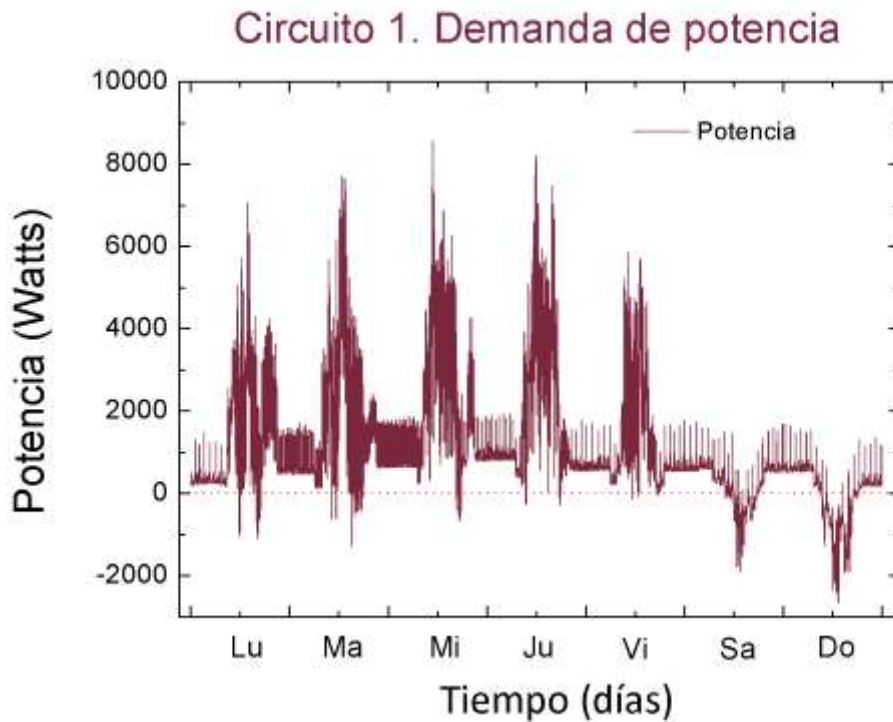
*Imagen 4.2.10 Voltaje y corriente de alimentación de aire acondicionado* En esta imagen se muestra la corriente y el voltaje de una de las fases que suministran energía a un aire acondicionado. Los picos de corriente causan variaciones al voltaje suministrado por la fase.

Con respecto al cobro de energía eléctrica, un parámetro importante a analizar es la potencia máxima demandada, ya que como se vio en el subcapítulo de análisis de la factura eléctrica, es uno de los rubros que conforman la factura de la UNICACH. La corriente y su comportamiento indican los momentos en que la demanda es máxima, por lo tanto es de relevante interés su comprensión.

### Potencia

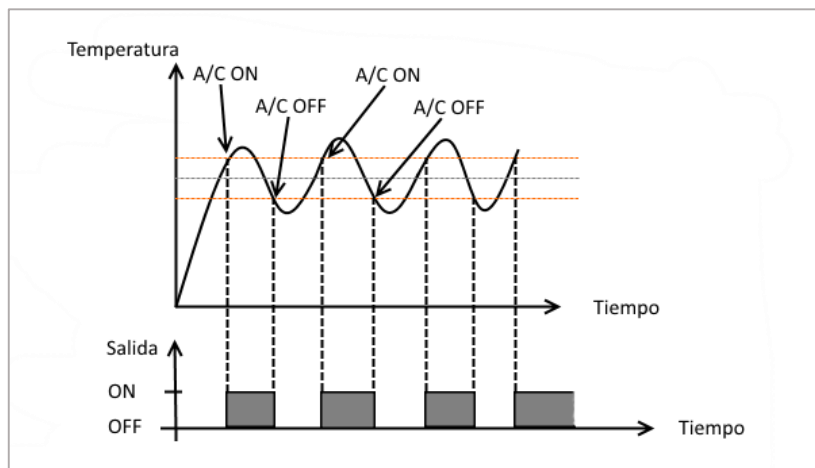
Como se vio en el subcapítulo de análisis de la factura eléctrica, la potencia máxima demandada, el factor de potencia y la energía consumida son los principales componentes de la factura eléctrica de la UNICACH. El comportamiento del voltaje y corriente de alimentación indican los momentos en que la demanda es máxima, por lo tanto es relevante comprenderlos.

El objetivo 1 de esta tesis plantea la búsqueda de oportunidades de ahorro de energía. Para localizar esas oportunidades es necesario saber que equipos demandan la mayor potencia de nuestros sistemas de suministro de energía eléctrica. Los picos de potencia nos generan gastos por demanda máxima, por lo tanto es importante identificarlos, saber las causas que provocan que estos ocurran y buscar la forma de evitarlos de alguna manera. La imagen 7 nos muestra las lecturas de demanda de potencia promedio del circuito uno tomadas por una semana. Como puede observarse existen picos de potencia demandada de más de 8kW, los cuales se deben principalmente a la corriente de arranque de los sistemas de aires acondicionados.



*Imagen 4.2.11 Demanda de potencia activa circuito 1*

Los sistemas de aire acondicionado del 3IER poseen un control básico ON-OFF. Este tipo de control de temperatura enciende el compresor del aire acondicionado cuando la temperatura rebasa un punto de referencia y lo apaga cuando la temperatura se va por debajo de esta. Este comportamiento se puede observar en la siguiente figura.



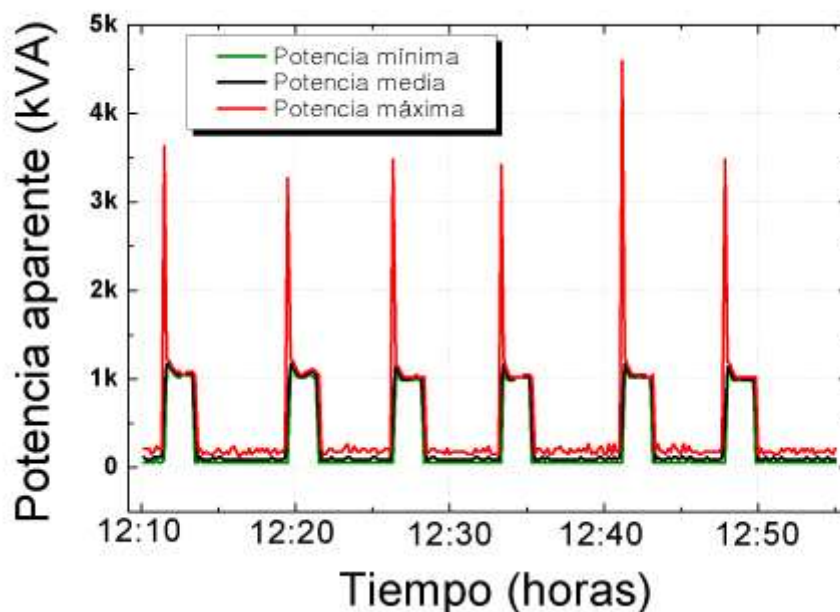
*Imagen 4.2.12 Comportamiento común del control ON-OFF*

El control ON-OFF presentado en la figura pasada es similar al comportamiento del control de temperatura de un aire acondicionado, excepto por una diferencia que al encenderse el compresor del aire acondicionado la demanda de potencia

luz más grande (hasta 4 veces) de la demanda nominal. A este comportamiento se le atribuye los picos de demanda de potencia observados en la figura 8.

Para ahondar a lo anteriormente dicho, en la imagen 10 se observa el comportamiento real de uno de los sistemas de enfriamiento. Este comportamiento es similar en todos los dispositivos.

En el 3IER existen 35 equipos de enfriamiento, todos con el mismo comportamiento mostrado en la figura 4.2.13. La probabilidad de coincidencia de estos picos de demanda es alta, generando así demandas de potencia, esta es una razón importante para considerar disminuir la cantidad de picos de demanda de potencia.



*Imagen 4.2.13 Potencia demandada por un sistema de aire acondicionado.*

### *Factor de potencia*

El factor de potencia es la relación entre la potencia usada (real) y la potencia total (aparente) consumida por un equipo eléctrico. Es una forma de medir la eficiencia de conversión de la potencia que demandamos a trabajo verdadero [17].

En el análisis de la factura eléctrica pudimos observar que el factor de potencia es uno de los tres componentes que integran el cargo cobrado por la compañía proveedora de energía eléctrica a la UNICACH. En la imagen 10 podemos ver mediciones del factor de potencia en el circuito 1 y circuito 2.

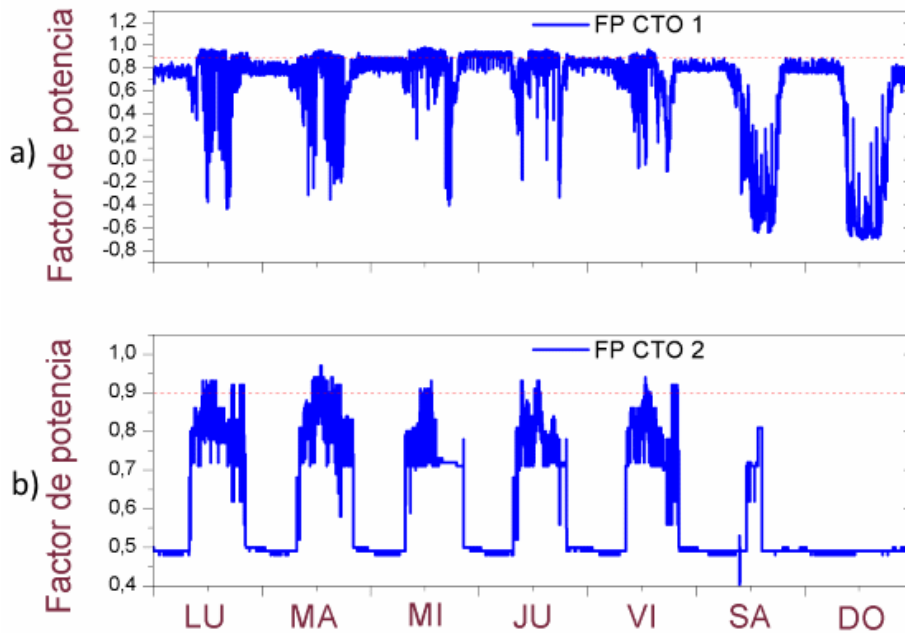


Imagen 4.2.14 Factor de potencia edificio 23

La grafica a) de la imagen 4.2.14 presenta el factor de potencia del circuito 1, el cual se hizo mención anteriormente, cuenta con un sistema fotovoltaico conectado a la red. Este sistema influye en la representación de las lecturas. Cuando la energía consumida es mayor que lo generado por el sistema fotovoltaico la corriente fluye para un lado, mientras que cuando la generación es mayor que el consumo la corriente fluye en el lado contrario. Esto causa que el factor de potencia sea medida como positivo o negativo. Esta tesis no adentra en como este sistema influye en dichas lecturas, por lo tanto nos enfocaremos en la gráfica b).

El valor aceptado de factor de potencia debe estar entre .9 y 1, lo cual indica que la potencia que se demanda del sistema está siendo utilizada eficientemente, es decir a más del 90 % de eficiencia. En la gráfica b) podemos advertir que el FP se encuentra por muy poco tiempo dentro de los márgenes establecidos. Estos momentos de mejor desempeño de nuestros equipos se da cuando los aires acondicionados conectados a este sistema están en función, lo cual sugiere que estos sistemas utilizan de forma muy eficiente la energía que demandan. El resto del tiempo, particularmente por las tardes y noches el factor de potencia cae hasta valores del 0.5. Esto es debido a que los equipos electrónicos de control permanecen encendidos todo el tiempo, y estos tipos de dispositivos no conducen corriente durante todo el ciclo del voltaje aplicado, generando así un bajo factor de potencia [18].

La corrección del factor de potencia ofrece una buena posibilidad de ahorro de energía, especialmente si el trabajo de corrección es enfocado no solamente a la corrección de factor de potencia por desplazamiento sino también del factor de potencia originado por cargas no lineales como sistemas de cómputo y otros equipos con dispositivos electrónicos.

## Energía

Finalmente, la manifestación más trascendente: la energía consumida. La potencia demandada y el factor de potencia nos indican la forma en la que utilizamos la energía, en que momentos demandamos más de ella o que tan eficiente somos al utilizarla.

En el difícil camino hacia la eficiencia energética, el ahorrar energía es el paso más importante antes de implementar cualquier forma de generación de energía renovable. En este apartado se muestran las mediciones hechas al edificio 23, se contabilizan las cantidades (en kWh) gastadas por dicho edificio y se muestra si el sistema trifásico que suministra la energía esta balanceado de tal forma que las cantidades demandadas a cada fase sean de alguna forma similares.

La imagen 4.2.15 nos indica la energía consumida en una semana en los circuitos 1 y 2. Puede apreciarse que la diferencia en consumo de los dos circuitos es notoria. Hay que recordar que todos los contactos y sistema de iluminación están conectados al circuito 1, además del sistema solar fotovoltaico. Mientras que en el circuito 2 la carga conectada es prácticamente exclusivo de aires acondicionados.

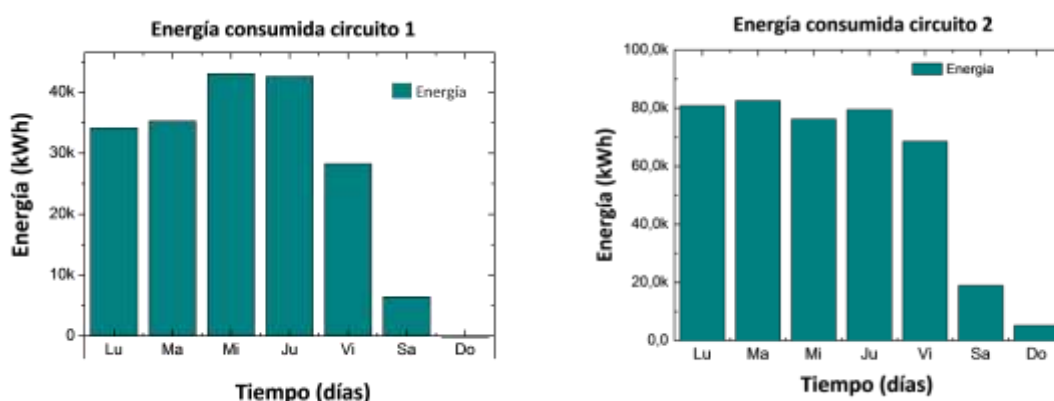


Imagen 4.2.15 Energía consumida en los dos circuitos que alimentan el edificio 23.

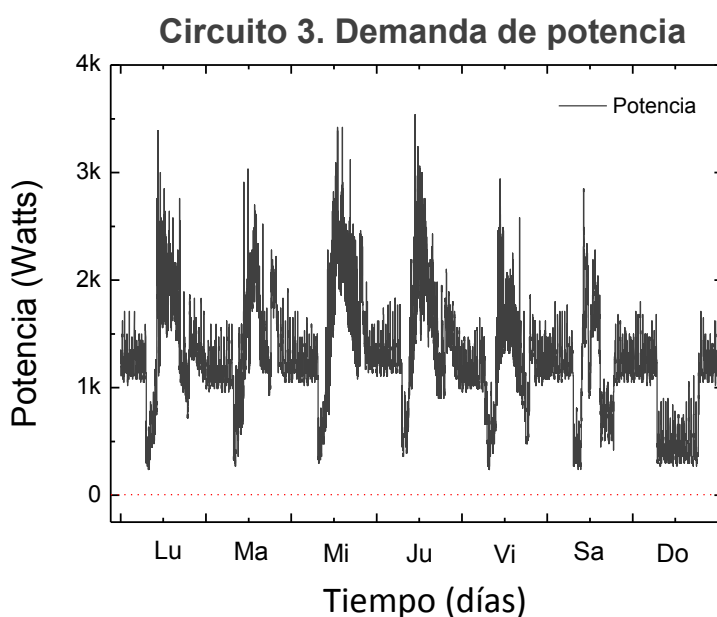
Las gráficas sugieren que el consumo de energía es durante la semana, lo cual se considera como normal.

Notar también que el día domingo de la gráfica en el circuito 1 incluso podemos apreciar un valor negativo de energía, lo cual indica ese día hay muy poca actividad y por lo tanto el sistema solar fotovoltaico incluso entrega energía a la red eléctrica.

## 4.2.3.2 Mediciones eléctricas en edificio 24

### Potencia

El edificio 24 se alimenta de los circuitos eléctricos 3 y 4. La imagen 21 muestra los datos de potencia en un lapso de una semana del circuito 3, donde la carga conectada mayormente es iluminación, equipos de cómputo y equipos de laboratorio. En estas mediciones obtenidas no se pudieron observar grandes picos de demanda de potencia de los circuitos conectados. Por lo que puede decirse que este circuito no contribuye mucho en el rubor de potencia demandada.



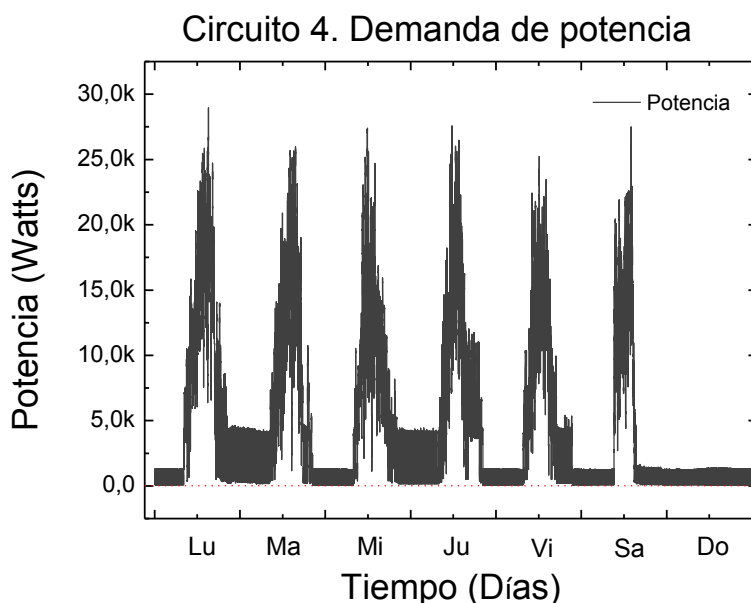
*Imagen 4.2.17* Potencia demandada del circuito 3 en el edificio 24. Este circuito tiene conectadas cargas de iluminación y sistemas de cómputo utilizados por el personal administrativo.

Por otro lado es de notar, que existen dispositivos de laboratorio que demandan cantidades considerables de potencia, sin embargo, estos equipos solo se usan de manera esporádica cuando se necesita.

La demanda de potencia nunca llega a cero a pesar de que las actividades únicamente son en el día, esto sugiere que siempre hay equipo en uso dentro de las oficinas, sala de espera, laboratorios o salones. Un punto a resaltar es que la iluminación casi siempre está en uso lo cual contribuye a que el edificio esté en demanda continua de energía.

En la figura 4.2.18 se muestran los datos obtenidos de las lecturas del circuito 4, al cual se encuentran conectados todos los sistemas de aire acondicionado. Por los picos de potencia demandada que alcanzan los casi 30 kW podemos alegar

que los sistemas de enfriamiento contribuyen de manera fuerte a la potencia demandada.



*Imagen 4.2.18 Potencia demanda por una semana en el edificio 24.*

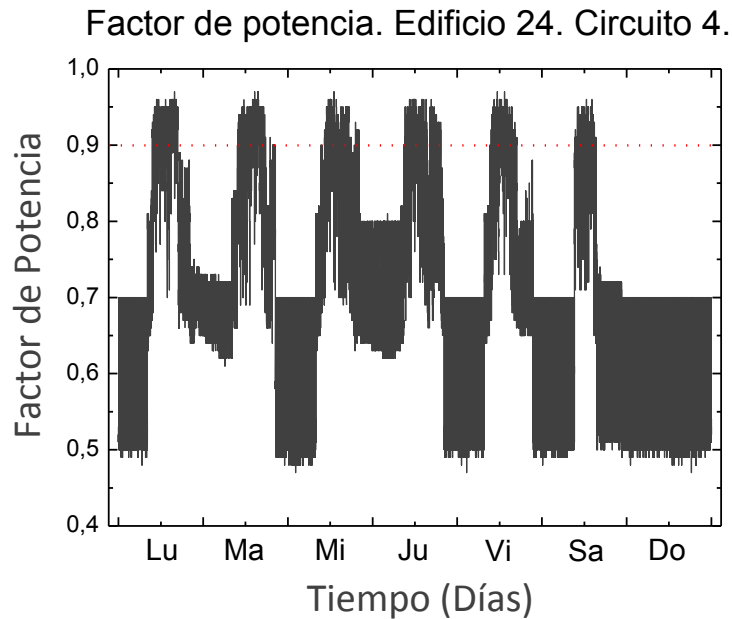
Notar también que las noches del lunes y miércoles la demanda de potencia se mantiene en casi 5 kW lo cual sugiere que dos o más aires acondicionados permanecieron encendidos. Esta es una oportunidad clara de ahorro ya que si se apagaran estos aires durante la noche el ahorro sería de varios kilowatt-hora.

Al mismo tiempo, los datos revelan que la potencia demandada en ningún momento es cero. Esto es debido a que el aire acondicionado del sistema de cómputo para mantener la conexión a internet debe permanecer siempre encendido.

### *Factor de potencia*

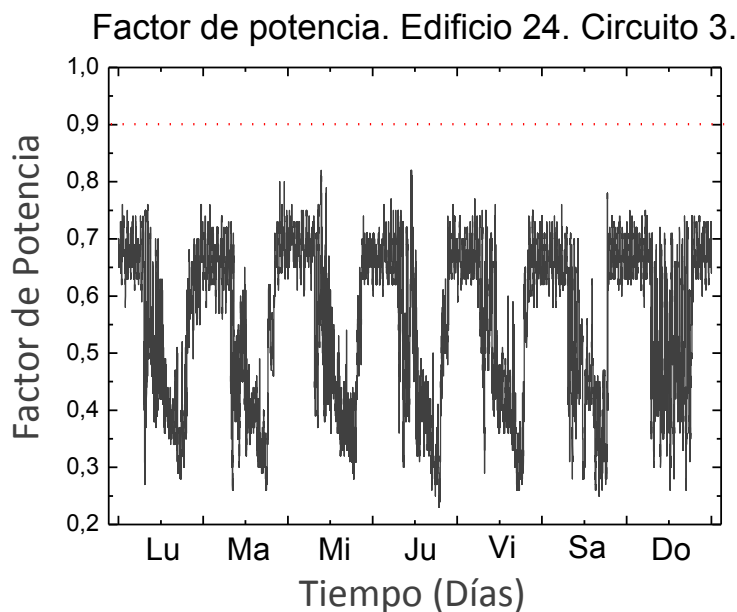
El factor de potencia debido a los aires acondicionados no representa problemas mayores a la red eléctrica. El valor aceptado por la CFE es de al menos 0.9. Los sistemas de aire acondicionado usan energía a través de ventiladores, motor del compresor y circuitería electrónica. Cuando los aires acondicionados están en funcionamiento el factor de potencia está por arriba de lo aceptable, esto se puede apreciar en la imagen 23. La mayor cantidad de energía es consumida en el día, cuando la diferencia entre potencia activa y potencia aparente es mínima. Durante la noche la diferencia entre las potencias activa y reactiva es grande, haciendo que el factor de potencia llegue incluso a valores menores a 0.5. Sin embargo, a pesar de que el factor de potencia es alto durante la noche, la potencia consumida por los circuitos no representa una porción grande del total de energía consumida.





*Imagen 4.2.19* Factor de potencia en una semana de medición en el circuito 4 del edificio 24.

Con relación a la figura 24, la carga conectada a este circuito es mayormente proveniente de sistemas de iluminación y otras cargas como computadoras, impresoras y otros dispositivos. Este tipo de cargas normalmente presentan factor de potencia bajo, debido a que distorsionan la onda de voltaje por ser cargas no lineales. Sin embargo, hay que notar que a pesar de que los dispositivos electrónicos deberían de ofrecer mejores factores de potencia, Las lecturas tomadas se encuentran entre 0.25 y 0.75, lo cual indica un problema serio debido a estas cargas.



*Imagen 4.2.20* Factor de potencia edificio 23 circuito 3.

## Energía

La energía consumida por el circuito 3 en una semana se presenta en la imagen 4.2.21 (a). Esta energía consumida es consecuencia de cargas no lineales, como sistemas de iluminación y equipos de oficina. En el circuito 4, imagen 4.2.21.(b) se encuentran conectados únicamente aires acondicionados. Como puede verse en la imagen la diferencia en energía consumida entre un circuito y otro, es difiere de forma considerable de un circuito a otro. El promedio diario consumido en el circuito 3 es de 29.5 kWh mientras que el promedio del circuito 4 es de 104.2 kWh.

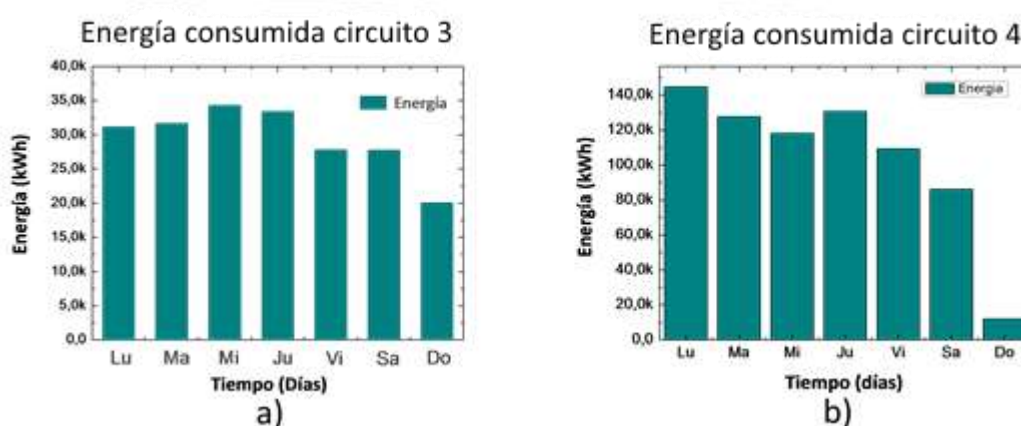
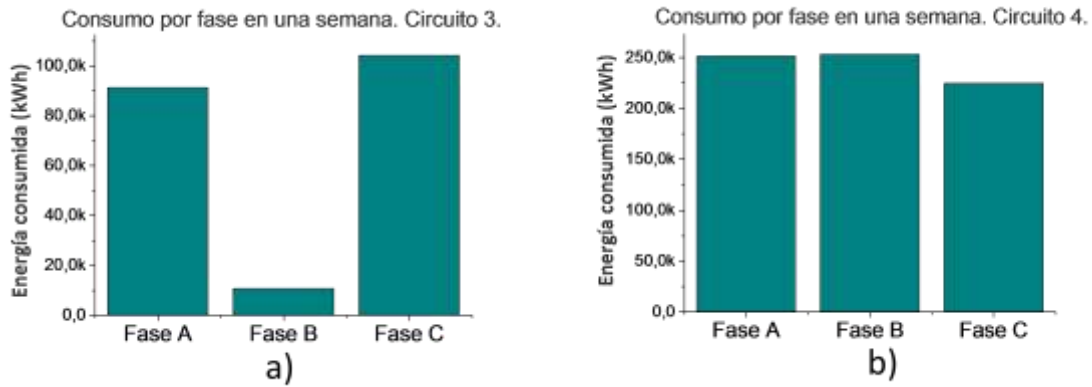


Imagen 4.2.21 Energía consumida en una semana en el edificio 24. Circuito 3 y 4.

Notar también, que para el circuito 3, la energía consumida es similar en casi todos los días (ver los días sábado y domingo) lo cual indica que los sistemas de iluminación y de oficina se mantienen en función durante casi todos los días. Esta energía no debería de gastarse durante los fines de semana ya que esos días no son laborables. Observar especialmente el día domingo, donde todos los equipos de oficina deberían permanecer apagados.

Profundizando en las lecturas de energía, se graficaron las lecturas de energía utilizada por cada fase de los circuito 3 y cuatro. Las gráficas obtenidas se pueden observar en la imagen 4.2.22. Es sabido que las cargas deben ser conectadas de forma balanceada en un sistema trifásico, sin embargo como se observa en la imagen 4.2.22 (a) las fases A y C consumen aproximadamente lo mismo mientras que la fase B consume muy pocos kWh lo que ocasiona un desbalance muy notorio.

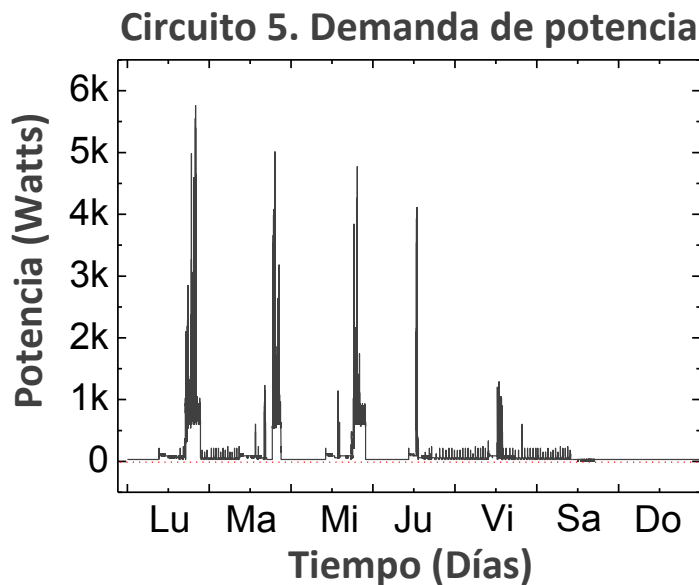
Por otro lado un ejemplo bueno de consumo de energía nos lo da la gráfica en la imagen 4.2.22 (b) donde puede observarse que las tres fases se encuentran consumiendo casi los mismo kilo-Watt-hora cada una de ellas, un aproximado de 250 kWh por fase.



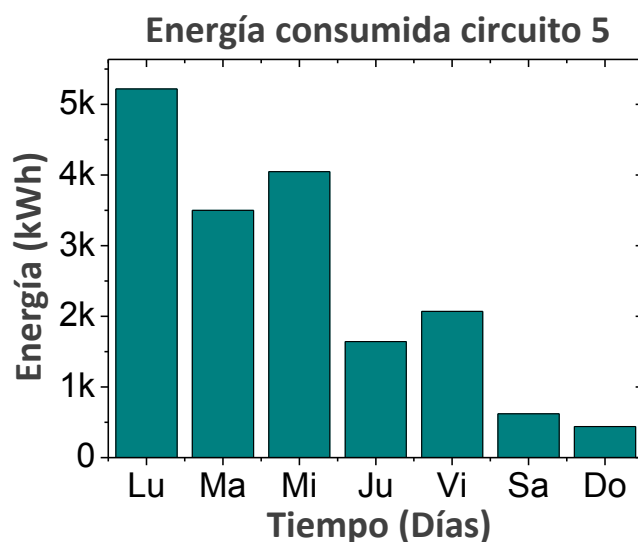
*Imagen 4.2.22 Energía consumida en una semana en el edificio 24 del 3IER.*

### 4.2.3.3 Mediciones en taller

En la imagen 4.2.23 se puede observar la potencia demandada en el circuito que mantiene al taller del 3IER. La potencia varía dependiendo las actividades que se realicen en este lugar. En el estudio de carga conectada el taller representa el 20 % de la carga total lo cual equivale a 38, 000 Watts. El estudio de carga sugiere que el taller representa una parte grande de gasto al instituto de investigación, sin embargo la energía consumida depende completamente del uso de los equipos.



*Imagen 4.2.23 Demanda de potencia del taller del 3IER.*



*Imagen 4.2.24 Energía gastada en una semana en el taller del 3IER*

En la imagen 4.2.24 se observa que el gasto de energía no tiene un patrón como el encontrado en los edificios dedicados a laboratorios, salones y cubículos. La principal diferencia es que el gasto de energía es de forma desordenada y sin marcas considerables que muestren una similitud entre los días de semana y los de fin de semana. Únicamente se puede comentar que el gasto de energía es más fuerte los días lunes, martes y miércoles. Los días jueves, viernes son de menos gasto y los días sábado y domingo son muy similares en cuanto a que casi no se gastó energía. Sin embargo en estos últimos dos días hay un gasto que en total equivale a 1 kWh, posiblemente debido al sistema de iluminación.

## 4.3 Implementación de sistema de control

### 4.3.1 Elección de sistema de control

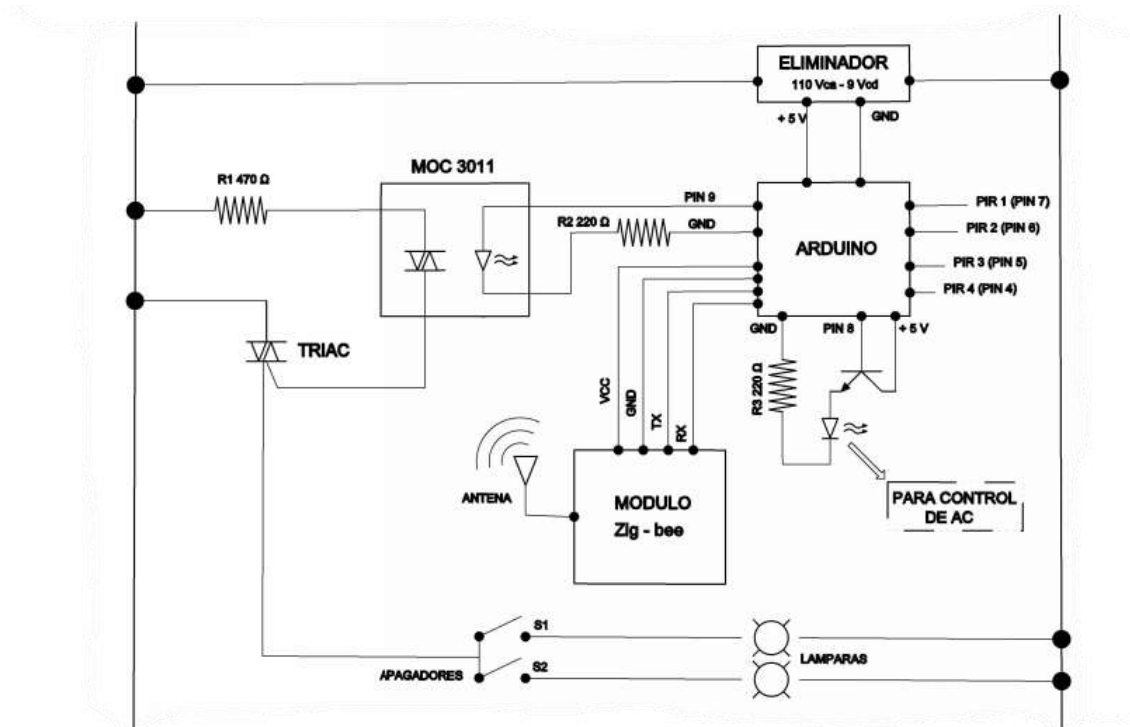
El primer paso para la implementación del sistema de control fue el de elegir cuales serían los criterios que se tomarían en cuenta para dicho sistema. El sistema implementado debía cumplir con las siguientes características:

- Controlar los sistemas de aire acondicionado.
- Controlar el sistema de iluminación.
- Ofrecer oportunidades de mejoras tanto en software como en hardware.
- Ajustarse a los espacios para su instalación.
- De fácil acceso tecnológico.
- Ser económico.
- De fácil producción en serie.

Se buscaron distintas opciones. Algunas contaban solo con algunas características pero carecían de otras. Algunas tecnologías tenían costos elevados. Otras implicaban alteraciones en los equipos que no se recomendaban ya que podía afectar a las garantías que los fabricantes tienen.

Se optó por hacer un diseño propio con tecnología de fácil adquisición en el estado.

La imagen 4.3.1. muestra el diagrama de la propuesta del sistema de control.



*Imagen 4.3.1* Diagrama de circuito de control implementado para el sistema de aire acondicionado e iluminación.

El circuito se alimenta de la red eléctrica de 120 VCA a través de un eliminador de corriente que entrega un voltaje de salida de 9 Volts. El arduino rectifica el voltaje de 9 a 5 Volts para alimentar el resto de los circuitos y sensores del dispositivo implementado.

El arduino se comunica hacia el exterior a través de tres caminos distintos. El pin 6 es la salida que envía señales de control a un LED infrarrojo el cual controla al aire acondicionado. Los pines Rx y Tx se utilizan para conectarse a un módulo Zig Bee el cual mantendrá comunicación con un sistema central de monitoreo de ocupación (este sistema de comunicación es una mejora que podrá implementarse en el futuro). Por el Pin 9 se controla a un TRIAC a través de un opto acoplador (el MOC 3011) para intervenir en las señales de apagado y encendido del sistema de iluminación. El TRIAC está conectado en serie con los apagadores del sistema de iluminación (pueden ser uno o dos apagadores).

#### 4.3.2 Elección de los dispositivos electrónicos utilizados en el sistema de control

El sistema de control está dividido en sub partes debido a que no existe en el mercado ningún dispositivo del que nos pudiéramos guiar. La parte de control la desempeña un microcontrolador ARDUINO MINI con un procesador Atmega 328 como chip central. Este dispositivo se eligió ya que cumple con los requerimientos necesarios de velocidad y procesamiento para enviar señales principalmente a través del LED infrarrojo.

El TRIAC elegido fue el BTA12 que aguanta una corriente máxima de 12 Amperes. Este dispositivo se eligió debido a que el máximo de lámparas conectadas es de 16 y la corriente máxima RMS medida con todas las lámparas encendidas fue de 4 amperes.

El opto acoplador MOC3011 sirve como un separador entre la parte de potencia y la parte de control. Su configuración y esquema de conexión a carga se muestra en la imagen 30.

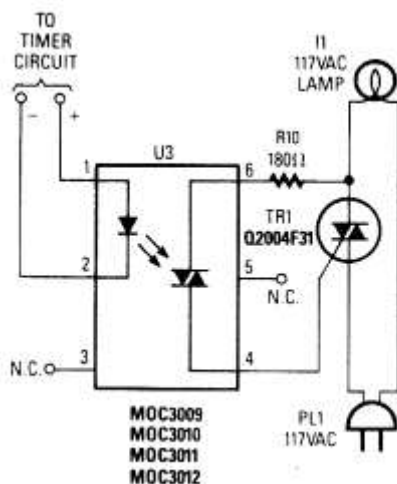


Imagen 4.3.2 Optoacoplamiento del sistema de control para la etapa de potencia

El módulo ZIG bee se implementó pensando en las mejoras que el sistema de control podría tener en el futuro. Este dispositivo junto con la antena conectada a este permitirá el acceso de datos de ocupación y el envío de acciones de control en caso de que se requiera.

El LED infra rojo actúa sobre los sistemas de aire acondicionado enviando órdenes de control codificadas en distintos protocolos de comunicación dependiendo del fabricante (en el 3IER existen sistemas de A/C principalmente de la marca YORY y LG) los cuales tuvieron que ser descifrados.

Los pines 4, 5, 6 y 7 se utilizaron para conectar los sensores PIR. Estos sensores son dispositivos electrónicos que miden la radiación infra roja emitida por los cuerpos en movimiento.

### 4.3.3 Desarrollo del sistema de control

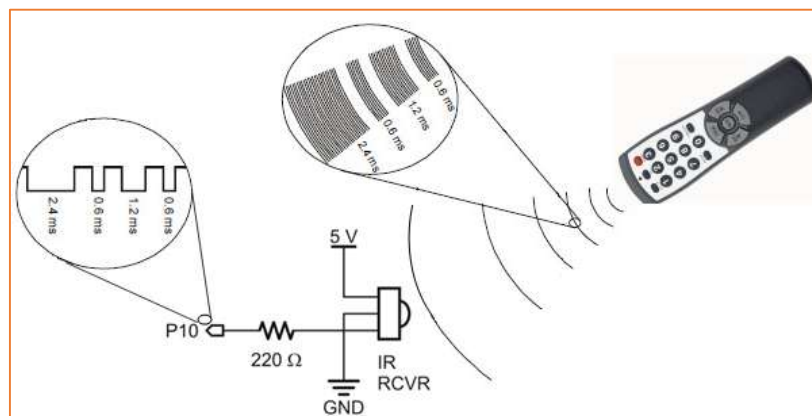
Una vez elegido el sistema que se implementara y habiendo desarrollado (o unido) las partes necesarias para lograr las acciones de control requeridas se procedió a completar los otros fragmentos para completar el dispositivo de control.

Para controlar el sistema de iluminación se utilizó un TRIAC ajustado a través de un opto acoplador. Este esquema de control es utilizado en diversas aplicaciones de control de potencia y su aplicación y conexión es sencilla. La figura 30 muestra esta configuración de conexión.

La parte de comunicación con Zig bee tampoco presento complicaciones ya que los diagramas de conexionado se pueden encontrar en las hojas de especificaciones de los dispositivos utilizados (en este caso módulo Zig bee y ARDUINO).

#### 4.3.3.1 Diseño del sistema de control

La interacción de los usuarios con los aires acondicionados es mayormente a través del control remoto, el cual envía pulsos de luz Infra Roja codificados por el fabricante. El concepto general de estos protocolos de comunicación utilizados en los equipos de aire acondicionado y otros equipos que utilicen un control remoto es la siguiente:

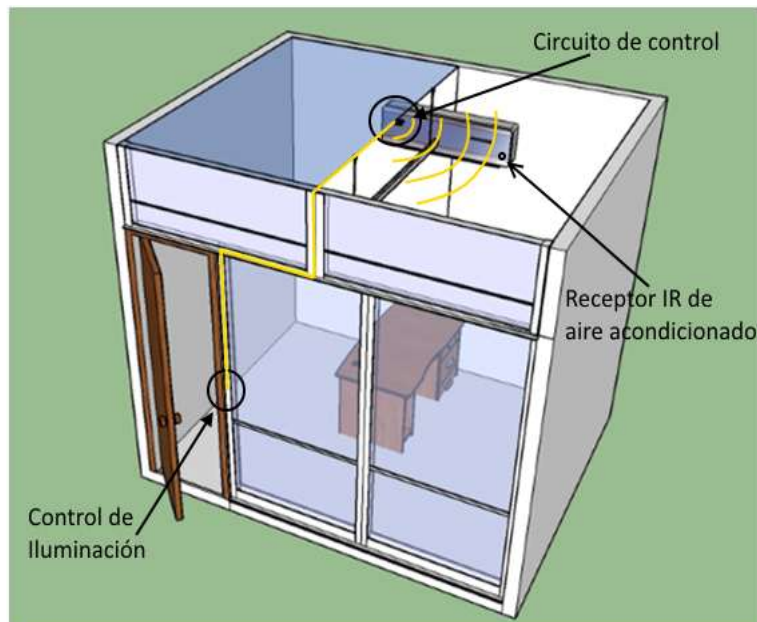


*Imagen 4.3.3 Las señales de control de un control remoto contienen una frecuencia portadora en donde se envían los bits de control con diferentes tiempos de encendido y apagado.*

Se pensó en varias propuestas de control. La primera idea fue de controlar los aires acondicionados utilizando un circuito de control con una parte de potencia que interviniera de forma directa la alimentación de Corriente Alterna a través de un relevador, interrumpiendo así las dos fases que alimentan a cada aire acondicionado las veces que se necesitara activarlo. Esta propuesta no fue factible debido a que esta manera de apagar a cada sistema no es de la forma para la cual los aires acondicionados fueron diseñados.

La segunda idea, funcionaria con la misma lógica que la primera, interrumpir o apagar cada sistema de enfriamiento cada vez que fuera necesario, pero esta vez, el control se ejercería directamente al circuito de control localizado en cada unidad interior de cada sistema.





*Imagen 4.3.4 Modelo en un cubículo usado para oficina administrativa o de investigación en el CIDTER.*

Se optó por un sistema de control que ejerciera señales de control a los aires acondicionados a través de señales Infrarrojas y a la vez, controlara al sistema de iluminación con un TRIAC. Este sistema estaría localizado en algún lugar clave en el espacio de trabajo al que se requiere controlar. La siguiente figura muestra este esquema general.

Este criterio de diseño permitió que los sistemas de enfriamiento fueran controlados de igual forma que lo serían con el control remoto. La parte de recepción infrarroja fue diseñada para este fin y nuestro dispositivo usaría esa entrada para ejercer control sobre los dispositivos.

#### 4.3.3.2 Descifrado de protocolos de comunicación de los aires acondicionados

La señal enviada a un aire acondicionado para ejercer control sobre este tiene dos componentes principales. El tiempo de encendido y apagado de un dígito y la señal portadora que aparece dentro de este pulso o dígito. La señal portadora en cada uno de los aires acondicionados se encontró con un osciloscopio. Este resultado fue, en la mayoría de los sistemas, de 38 kHz.

Los pulsos de encendido y apagado se encontraron un receptor Infra Red. Normalmente estos lectores se encuentran en cualquier dispositivo receptor que use control remoto, una televisión, Cd player, etc. Este receptor nos graba las señales de los dígitos enviados con cualquier control remoto usando un

programa y un ARDUINO UNO. Este programa escrito se muestra en la siguiente figura:

---

---

```
#define LEDPIN 13
//you may increase this value on Arduinos with greater than 2k SRAM
#define maxLen 800

volatile unsigned int irBuffer[maxLen]; //stores timings - volatile because changed by
ISR
volatile unsigned int x = 0; //Pointer thru irBuffer - volatile because changed by ISR

void setup() {
  Serial.begin(115200); //change BAUD rate as required
  attachInterrupt(0, rxIR_Interrupt_Handler, CHANGE); //set up ISR for receiving IR
  signal
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  Serial.println(F("Press the button on the remote now - once only"));
  delay(5000); // pause 5 secs
  if (x) { //if a signal is captured
    digitalWrite(LEDPIN, HIGH); //visual indicator that signal received
    Serial.println();
    Serial.print(F("Raw: (")); //dump raw header format - for library
    Serial.print((x - 1));
    Serial.print(F(")"));
    detachInterrupt(0); //stop interrupts & capture until finished here
    for (int i = 1; i < x; i++) { //now dump the times
      if (!(i & 0x1)) Serial.print(F("-"));
      Serial.print(irBuffer[i] - irBuffer[i - 1]);
      Serial.print(F(", "));
    }
    x = 0;
    Serial.println();
    Serial.println();
    digitalWrite(LEDPIN, LOW); //end of visual indicator, for this time
    attachInterrupt(0, rxIR_Interrupt_Handler, CHANGE); //re-enable ISR for receiving IR
  signal
  }

}

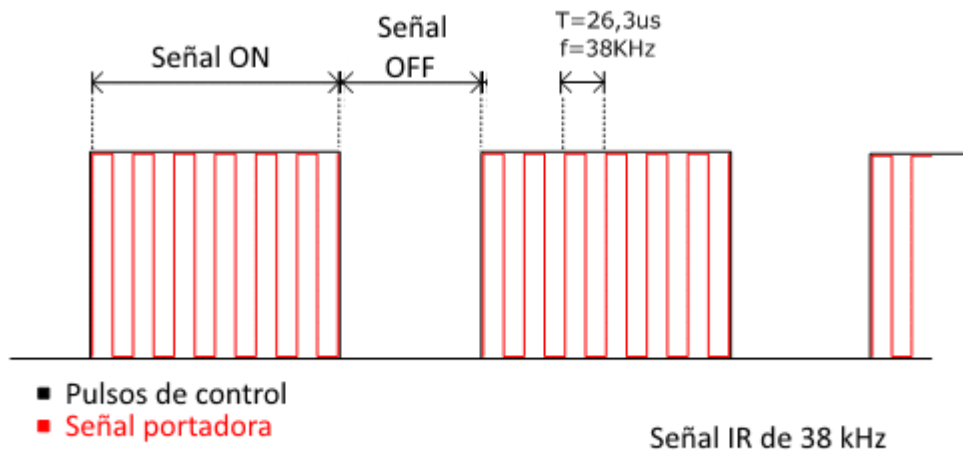
void rxIR_Interrupt_Handler() {
  if (x > maxLen) return; //ignore if irBuffer is already full
  irBuffer[x++] = micros(); //just continually record the time-stamp of signal transitions
}

}
```

---

---

Este programa nos permitió encontrar los tiempos de activación (pulso de control) y en la que señal portadora se encuentra presente. La figura vista 33 nos muestra el tiempo de encendido y apagado de dicha señal.



*Imagen 4.3.5* Tramas de datos de una orden de control remoto de un aire acondicionado [www.projectfiles.com](http://www.projectfiles.com)

El programa codificado muestra todos los momentos de la trama de datos que sirven para mandar ordenes de control al A/C, en los que la señal se mantiene presente (ON) y los momentos en los que la señal portadora se encuentra apagada (señal OFF). El tamaño de las tramas de control depende mucho del fabricante. Para cada marca o modelo de aire acondicionado se tuvieron que descifrar sus protocolos de comunicación.

Para cada aire acondicionado se descifraron la señal de ON, OFF y cambio de temperatura. Para cada señal se hicieron 20 escaneos. El programa de decodificación obtiene el número de datos de la trama y los tiempos de activación y desactivación de la señal portadora. Todos estos datos son acomodados en columnas en utilizando el programa EXCEL y son promediados para tener datos promedios. El promedio de los datos e utilizó para programar las ordenes de control en un ARDUINO UNO.

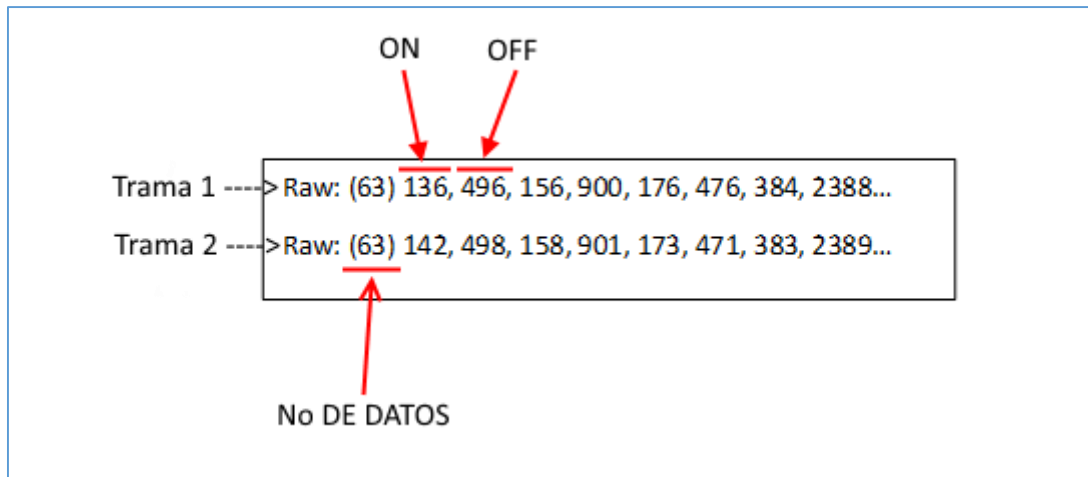


Imagen 4.3.5

### 4.3.3.3 Construcción del sistema de control.

Se realizó el diagrama de conexionado del dispositivo. Básicamente, se trata de una placa de control de 7.5 x 7.5 cm. De una sola cara. Los componentes principales se observan en la siguiente figura. Consta principalmente de un sistema central ARDUINO MINI, un LED Infrarrojo, un transistor para controlar los pulsos del LED IR, tres resistencias, una base para el módulo ZIG Bee, un optoacoplador MOC1111, un TRIAC, además de las terminales de conexión de las lámparas y eliminador de corriente.

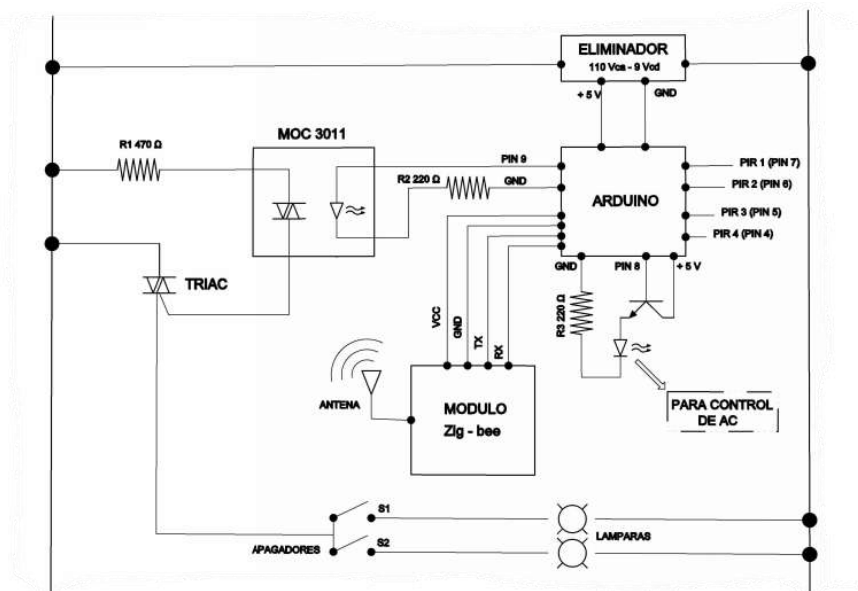
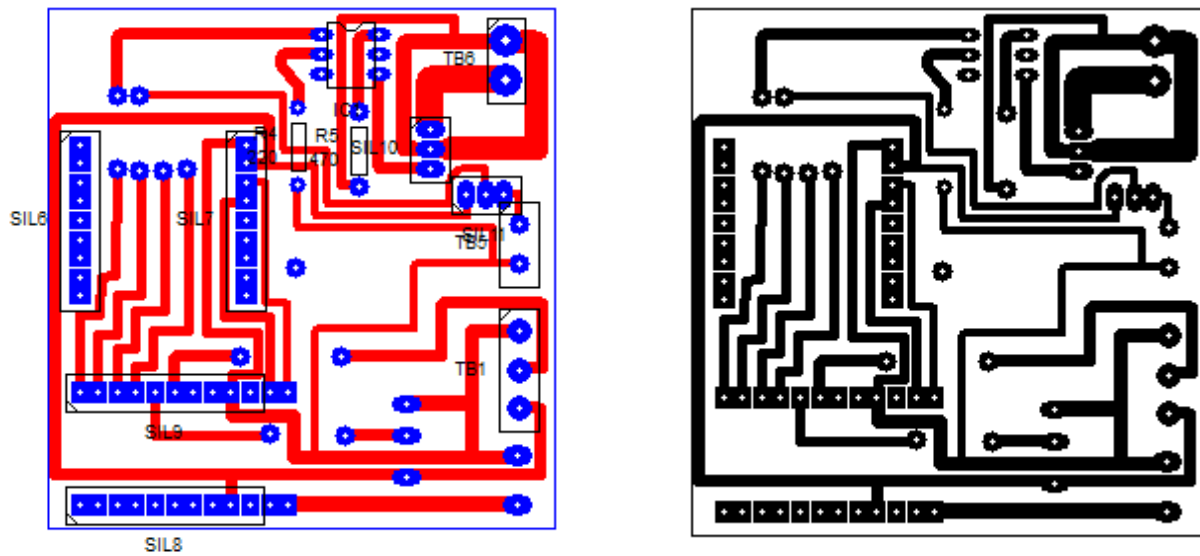


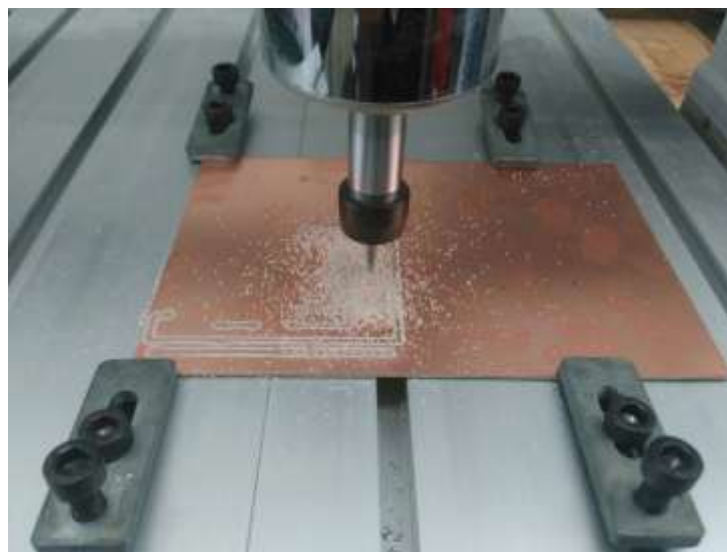
Imagen 4.3.6 Diagrama eléctrico de conexión del sistema de control.

Posteriormente se hizo el ruteado en el programa PCB wizard. El cual quedo de la siguiente forma:



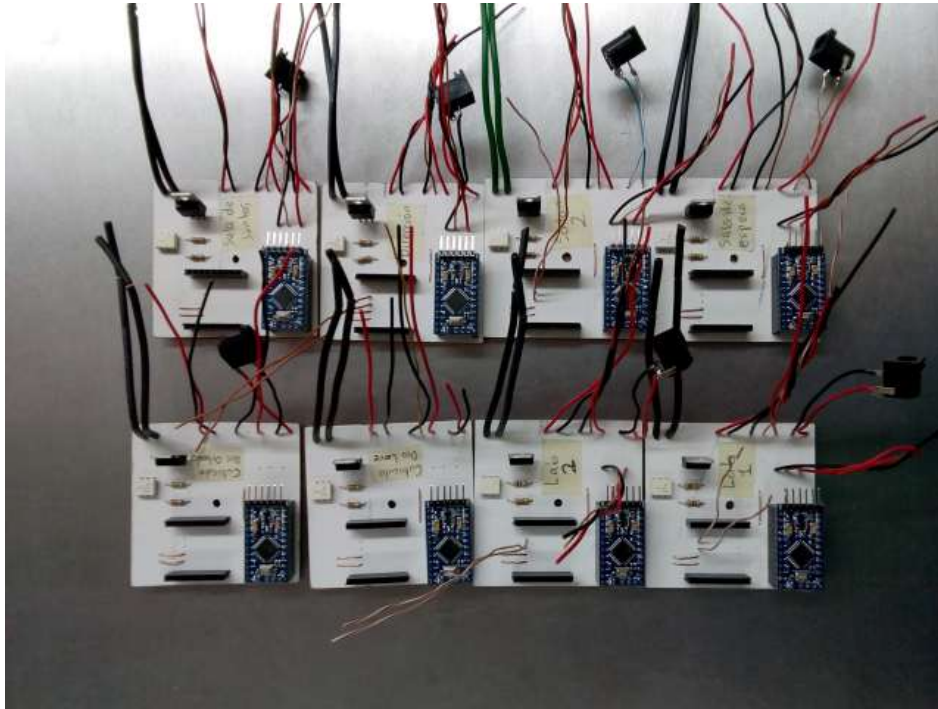
*Imagen 4.3.6* Diseño de placa del circuito de control.

El circuito impreso se hizo con la ayuda de una maquina CNC.



*Imagen 4.3.7* Manufactura del circuito de control impreso.

Para el montaje de componentes no hubo problemas.



*Imagen 4.3.8* Circuito de control en proceso de manufactura.

#### 4.3.3.4 Programación.

El programa base utilizado para enviar las señales de control fue el que se muestra en la siguiente tabla. El programa principal contiene dos sub partes. La primera sirve para hacer las oscilaciones de la onda portadora la cual debe ser lo más cercano a 38 kHz. La segunda parte se encarga de los tiempos de encendido y apagado de los bits de control. PulseIR (tiempo) sirve para dar un '1' lógico y DelayMicroseconds (tiempo) es la orden para mantener un '0' lógico. Todos los tiempos están dados en microsegundos. El programa mostrado se subió en ARDUINNO MINI para su ejecución.

A continuación se presenta el programa tal y como se cargó al Arduino Mini.

---

```
// This sketch will send out ON signal to a General Electric Minisplit Air Conditioning
```

```
int IRledPin = 8; // LED connected to digital pin 13
```

```
// The setup() method runs once, when the sketch starts
```

```
void setup() {  
  // initialize the IR digital pin as an output:  
  pinMode(IRledPin, OUTPUT);
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```

}

void loop()
{
  Serial.println("Sending IR signal");

  generalelectricCode();

  delay(4000); // wait one minute (60 seconds * 1000 milliseconds)
}

// This procedure sends a 38KHz pulse to the IRledPin
// for a certain # of microseconds. We'll use this whenever we need to send codes
void pulseIR(long microsecs) {
  // we'll count down from the number of microseconds we are told to wait

  cli(); // this turns off any background interrupts

  while (microsecs > 0) {
    // 38 kHz is about 13 microseconds high and 13 microseconds low
    digitalWrite(IRledPin, HIGH); // this takes about 3 microseconds to happen
    delayMicroseconds(10); // hang out for 10 microseconds, you can also change
this to 9 if its not working
    digitalWrite(IRledPin, LOW); // this also takes about 3 microseconds
    delayMicroseconds(10); // hang out for 10 microseconds, you can also change
this to 9 if its not working

    // so 26 microseconds altogether
    microsecs -= 26;
  }

  sei(); // this turns them back on
}

void generalelectricCode() {
  // This is the code for my particular Air conditioning

  pulseIR(3152); delayMicroseconds(2988); pulseIR(3148); delayMicroseconds(4368);
  pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 1588 ); pulseIR( 636); delayMicroseconds( 472
);
  pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 1588 ); pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 472
);
  pulseIR( 632 ); delayMicroseconds( 476 ); pulseIR( 640 ); delayMicroseconds( 1584
);
  pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 1588 ); pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 472
);
  pulseIR( 632 ); delayMicroseconds( 476 ); pulseIR( 632 ); delayMicroseconds( 480 );
  pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 472 ); pulseIR( 632 ); delayMicroseconds( 1588
); pulseIR( 640 ); delayMicroseconds( 472 ); pulseIR( 632 ); delayMicroseconds( 476

```





```

pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 472 ); pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 472 );
pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 472 ); pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 472 );
pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 476 ); pulseIR( 632 ); delayMicroseconds( 476 );
pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 472 ); pulseIR( 640 ); delayMicroseconds( 1584
);
pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 472 ); pulseIR( 640 ); delayMicroseconds( 1584
);
pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 1588 ); pulseIR( 632 ); delayMicroseconds( 476
);
pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 1588 ); pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 472
);
pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 1588 ); pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 472
);
pulseIR( 636 ); delayMicroseconds( 1588 ); pulseIR( 636
);delayMicroseconds(1584);
pulseIR( 640 );

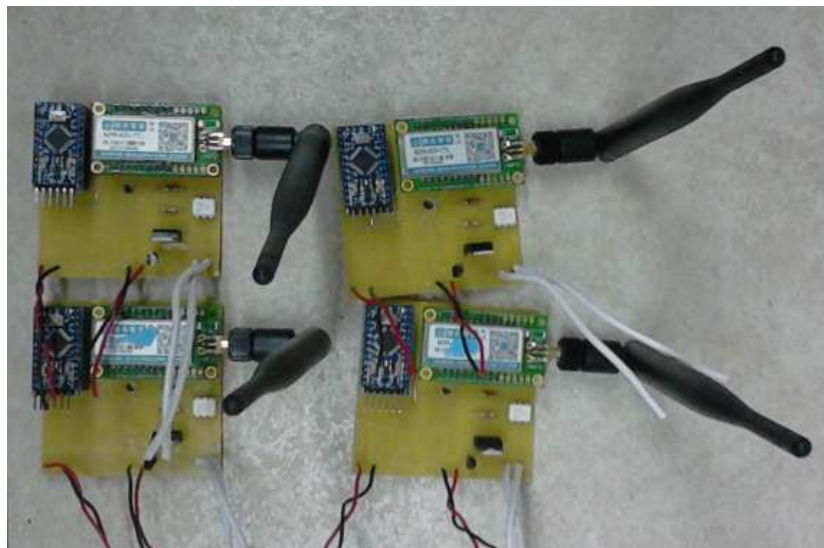
}

```

---

En la imagen 4.3.6 se muestra el diagrama del circuito utilizado. En esa figura podemos ver los componentes que junto con el sistema central de control (ARDUINO MINI) realizan las órdenes de control en cada espacio educativo, oficina o laboratorio.

El dispositivo terminado se muestra en la imagen 4.3.9. Cada placa terminada cuenta con un dispositivo arduino y un dispositivo zig bee con antena el cual servirá para transmisión de dato a futuro.



*Imagen 4.3.9* Dispositivo de control terminado instalado en los distintos espacios de trabajo del 3IER.

## 4.4 Evaluación del sistema de control

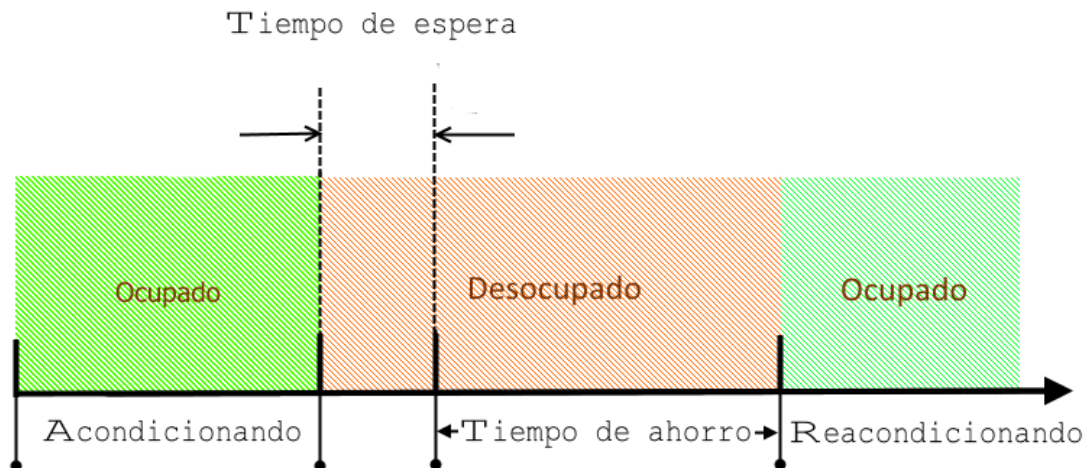
### 4.4.1 Introducción

Esta evaluación describe el comportamiento de los sistemas de iluminación y aire acondicionado con el objetivo de demostrar el desempeño del sistema de ahorro instalado en el 3IER. Existen dos enfoques importantes en esta evaluación, el comportamiento de los sistemas sin el sistema de ahorro y el comportamiento después de la implementación.

Algunos de los parámetros medidos fueron potencia activa, potencia aparente, factor de potencia y energía consumida. Para entender el consumo de energía únicamente hace falta tener datos de potencia demandada y energía consumida.

Como se muestra en la imagen 4.4.1, el sistema de control implementado actúa sobre los sistemas de aire acondicionado e iluminación. Este interviene una vez que el espacio en el que ha sido instalado queda desocupado. El comportamiento común de los ocupantes de un espacio acondicionado e iluminado es de la siguiente forma:

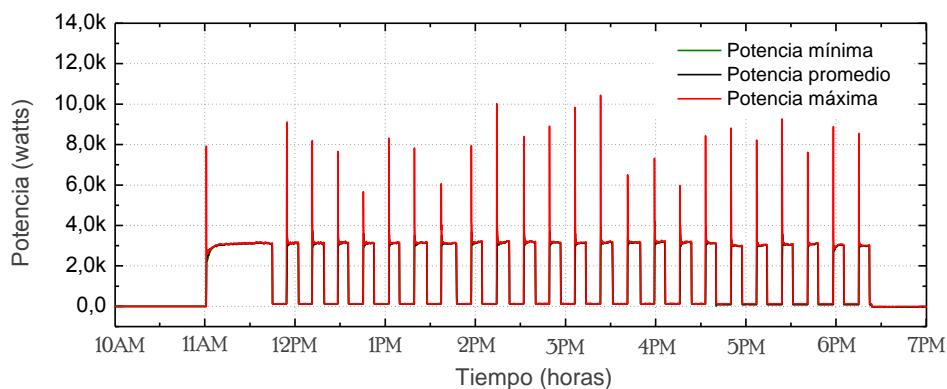
En un espacio que está siendo ocupado, el ocupante utiliza por lo general la luz y el aire acondicionado. Cuando el ocupante deja el espacio, este no apaga los equipos que utiliza. Esto se debe a varias razones como, comodidad, tiempo en el que piensa regresar, falta de conciencia de ahorro, etc.



*Imagen 4.4.1. Oportunidad de ahorro de energía* Toda vez que un ocupante deja su espacio de trabajo existe una oportunidad de ahorro. La cantidad de energía que puede ahorrarse depende del tiempo que el ocupante este fuera de su espacio de trabajo. Esta oportunidad es variable y depende de otros factores como el comportamiento y preferencias de cada usuario.

Los espacios de trabajo no son ocupados durante todo el día. Las actividades de los alumnos, investigadores y administrativos no siempre son en un solo lugar.

Sin embargo los sistemas de iluminación y aire acondicionado son usados por jornadas completas, pareciera que los ocupantes de estos lugares nunca se movieran de sus oficinas, cubículos o laboratorios. Las mediciones de demanda y consumo de energía muestran este comportamiento sin duda muy interesante. En la figura 4.4.2 se muestran datos de uno de los laboratorios del aula 24. Esta medición fue una de las tomadas, como muestra para evidenciar que a pesar de que los espacios de trabajo no son ocupados todo el tiempo por el personal, la energía consumida si se usa de manera constante. Como se observa, el ocupante de este espacio de trabajo enciende su aire acondicionado a las 11:00 A.M., y lo apaga aproximadamente a las 6:25 P.M. Los pulsos observados son los tiempos en los que el compresor del aire acondicionado se enciende automáticamente para mantener la temperatura deseada por el usuario. Estos pulsos pueden cambiar la frecuencia de encendido y apagado dependiendo de varios factores, siendo los más importantes la temperatura, la cantidad de ocupantes y el comportamiento de estos. En el primer pulso (justo después de las 11 AM) podemos ver una muestra de esto. Cuando el ocupante llega a su espacio de trabajo, el lugar ya se encuentra a una temperatura considerablemente alta, por lo tanto el primer pulso de encendido dura por un lapso de tiempo amplio para que el sistema de enfriamiento logre alcanzar la temperatura deseada. Cabe mencionar que este comportamiento es similar en la mayoría de los ocupantes de un edificio, es decir, las personas que laboran en los edificios normalmente usan los sistemas de climatización e iluminación durante todo el día a pesar de que ocupan los espacios únicamente entre un 60 y un 70% del tiempo laboral.



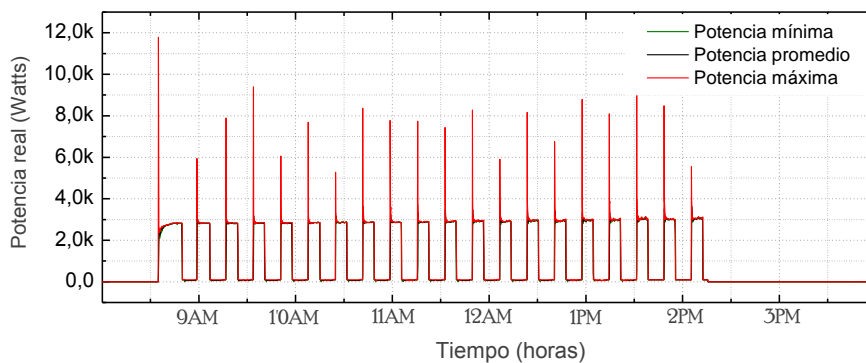
**Imagen 4.4.2 Lectura de consumo de aire acondicionado** A pesar de que el ocupante de este espacio monitoreado de trabajo no se encuentra más del 70% del tiempo en el lugar, esta lectura de potencia demandada nos muestra que los pulsos de consumo de energía están presentes de forma constante durante toda una jornada laboral.

Una encuesta realizada al personal docente y administrativo sugiere que este comportamiento – el de utilizar energía constantemente sin hacer uso de los sistemas de enfriamiento e iluminación al 100% del tiempo – es un comportamiento considerado común. Esto nos da una oportunidad grande de ahorro en los lapsos en el que los ocupantes dejan los espacios de trabajo para realizar otras actividades.

## 4.4.2 Demanda de potencia y consumo de energía sin sistema de control

A continuación se presentan las lecturas de potencia demandada de tres aires acondicionados evaluados con el objetivo de ver su comportamiento. Estas lecturas de potencia y energía se hacen sin un sistema de ahorro instalado. Como observación, notar que los ocupantes de estos lugares donde se realizaron las evaluaciones, muestran similitudes en sus comportamientos. Cada vez que un ocupante llega a su espacio de trabajo los equipos son encendidos. No importando la hora, una vez que los equipos se encienden, estos no se apagan hasta el final del día, incluso cuando los ocupantes salen a comer, a una reunión, al baño, etc.

Se encontró que este comportamiento tiene varias razones. Una de ellas es que si el ocupante sale por alguna razón y apaga su aire acondicionado, al momento de regresar el espacio de trabajo ya se encuentra a una temperatura incómoda para el usuario. Otra razón es que el usuario normalmente no piensa tardar por mucho tiempo fuera, lo cual lo hace pensar que no es necesario apagar su equipo de enfriamiento o su luz. Y una tercera razón es por olvido. En esta tercera razón incluso se encontró que algunos ocupantes dejan sus aires acondicionados prendidos durante toda la noche.

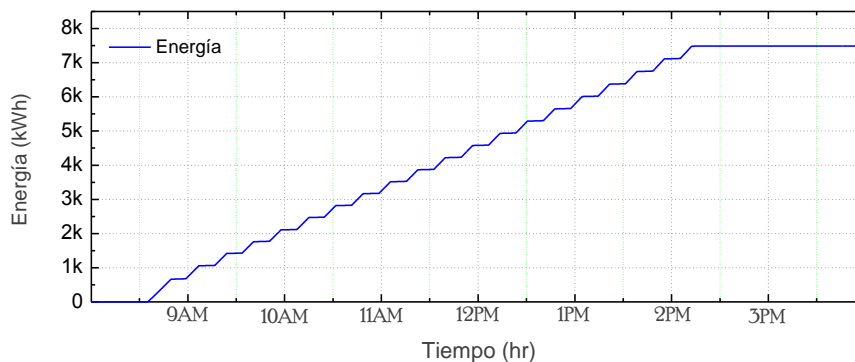


*Imagen 4.4.3 Potencia demandada aire acondicionado lab 1* El aire acondicionado del laboratorio 1 en el edificio 23 del CIDTER presenta consumos de potencia máxima al momento de encender el compresor de hasta casi 12 kW, con una potencia nominal de cerca de los 3 kW. Estas son lecturas tomadas de una jornada común en el laboratorio.

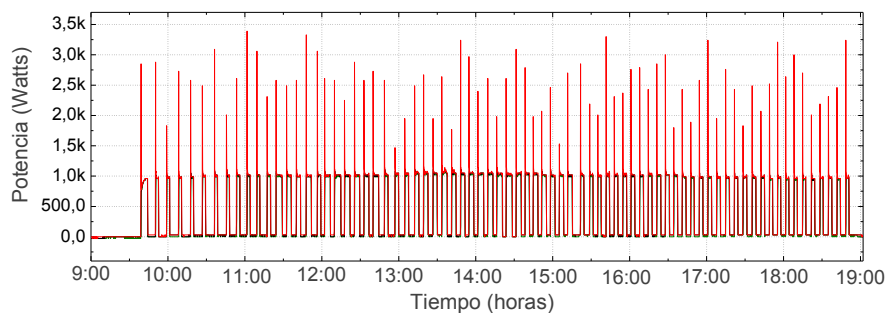
La imagen 4.4.3 muestra la medición de potencia demandada de la jornada de trabajo en el laboratorio 1 de edificio 24. El lapso de uso del aire acondicionado va desde las 8:00 A.M. hasta las 2:30 P.M. aproximadamente. A pesar de que este laboratorio no estuvo ocupado durante todo este tiempo, las mediciones indican que el consumo de energía ocurre todo el día.

Los picos de demanda de potencia implican un trabajo extra a la red eléctrica, lo cual es penalizado por la compañía que suministra el servicio, entre más de estos hallan más será la potencia promedio demandada. La potencia nominal de este equipo de aire acondicionado es de aproximadamente 3 kW, mientras que la potencia demandada durante el arranque del compresor llega a valores de casi 12 kW (4 veces más que la potencia nominal). La amplitud o duración de cada pulso depende mucho de factores como la temperatura exterior, la temperatura deseada en el interior, o la cantidad de ocupantes que usan el espacio.

La energía consumida durante este día fue de 7.5 kWh. La imagen 4.4.4 nos muestra este consumo.



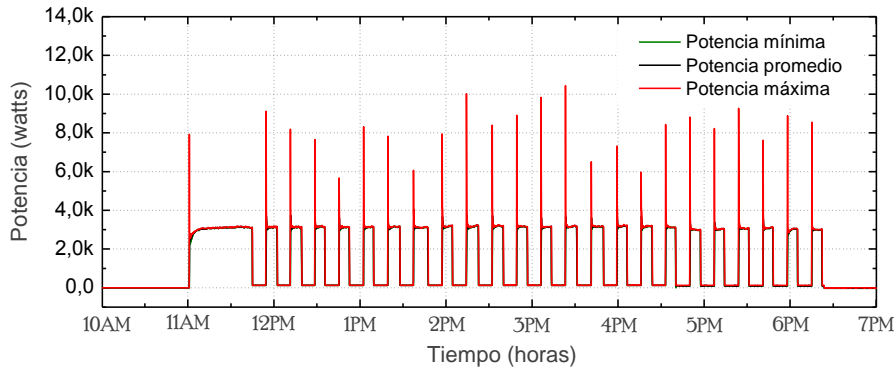
*Imagen 4.4.4 Consumo de energía durante un día laboral en el laboratorio 1 del edificio 24 del CIDTER.*



*Imagen 4.4.5 Potencia demandada en aire acondicionado en oficina La potencia que demanda por el cubículo de uno de los investigadores se muestra en esta imagen. El día de esta medición el ocupante utilizó el aire de las 9:30 A.M. a casi 7:00 P.M. sin apagar ni un momento su sistema de enfriamiento.*

La imagen 4.4.5 muestra la medición hecha a un sistema de aire acondicionado del cubículo de un investigador del instituto. En esta imagen podemos observar el mismo comportamiento observado en la demanda de potencia del laboratorio uno (Imagen 4.4.4). El ocupante enciende su aire acondicionado alrededor de las 9:45, lo usa durante todo el día y lo apaga cerca de las 19:00 horas. No está demás mencionar que este ocupante no estuvo todo este tiempo encerrado en su cubículo lo cual indica que existe un gran potencial de ahorro que está desperdiciándose.

En



*Imagen 4.4.6 Medición de aire acondicionado edif 24 lab 2* En un día común el laboratorio es ocupado durante casi todo el día por estudiantes. Sin embargo en esta imagen podemos apreciar que a pesar de que los ocupantes tuvieron momentos fuera del laboratorio, especialmente en la hora de comida, el gasto de energía no tuvo interrupciones en su uso.

De acuerdo en lo que se muestra en las imágenes 4.4.3, 4.4.5 y 4.4.6, podemos ver que los pulsos de demanda de potencia son constantes durante todo el día, en los tres sistemas evaluados. Este comportamiento es similar para todos los otros espacios de trabajo. Además, se realizó una encuesta, en donde más del 90% de los usuarios manifestó que este comportamiento es común en cuanto el uso de estos dispositivos. Esto sugiere que los sistemas son utilizados de forma ineficiente y sin conciencia.

### 4.4.3 Demanda de potencia y consumo de energía con sistema de control

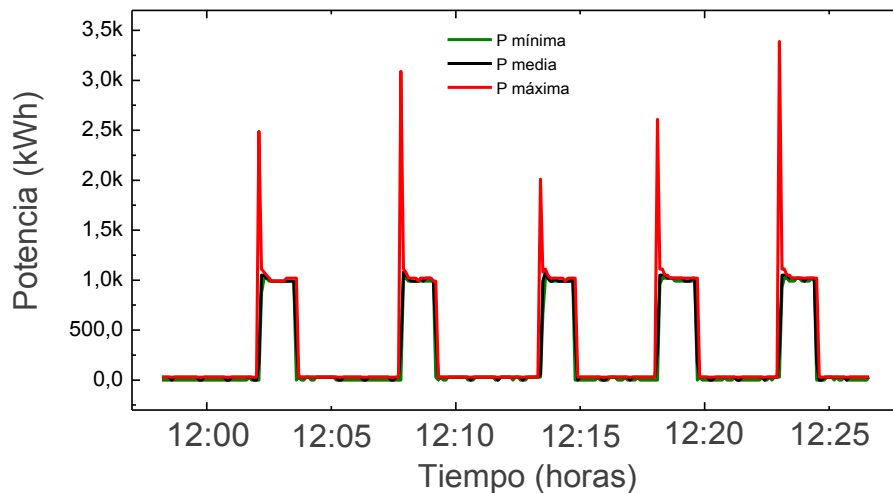
Una vez instalados los sistemas de control en cada espacio de trabajo. Se procedió a monitorear el comportamiento de estos. Cabe decir que aquí se presenta el monitoreo únicamente de los aires acondicionados. Para el caso de los sistemas de iluminación este monitoreo no fue posible realizarlo debido a que este sistema no tiene conexiones eléctricas individuales como lo tiene el sistema de Aire Acondicionado, lo cual no permite hacer un monitoreo por cada espacio de trabajo. Sin embargo, se propone que este monitoreo sea ampliado para un trabajo futuro.

#### 4.4.3.1 Consideraciones preliminares

Las principales características de consumo de energía que presentan los aires acondicionados son dos: demanda de potencia (en *kW*) y consumo de energía (en *kWh*).

La demanda de potencia tiene dos atributos que la distinguen. Una es, al arrancar el compresor del sistema, debido a que esta usa un motor para efectuar tal trabajo, la demanda de potencia llega a ser hasta 4 veces más grande que la potencia nominal. La otra es la potencia nominal del equipo cuando este está en funcionamiento. La imagen 4.4.7 muestra este comportamiento. Como se

observa la potencia nominal es de aproximadamente 1 kW, a la vez vemos que esta potencia alcanza puntos máximos de más de 3 kW. Este comportamiento es común en todos los sistemas de aire acondicionado de los edificios estudiados. Esto es debido a que el compresor de cada aire acondicionado enciende o apaga los equipos según se requiera, o más bien, según la temperatura que el usuario desee. Estos pulsos aparecerán con más o menos frecuencia dependiendo de varios factores, la temperatura deseada por el usuario, como ya se dijo, la temperatura exterior, la humedad, pero también de otros elementos de comportamiento humano que aparentemente tienen poco que ver con los factores tecnológicos.



*Imagen 4.4.7 Comportamiento de demanda de potencia de un sistema de aire acondicionado.*

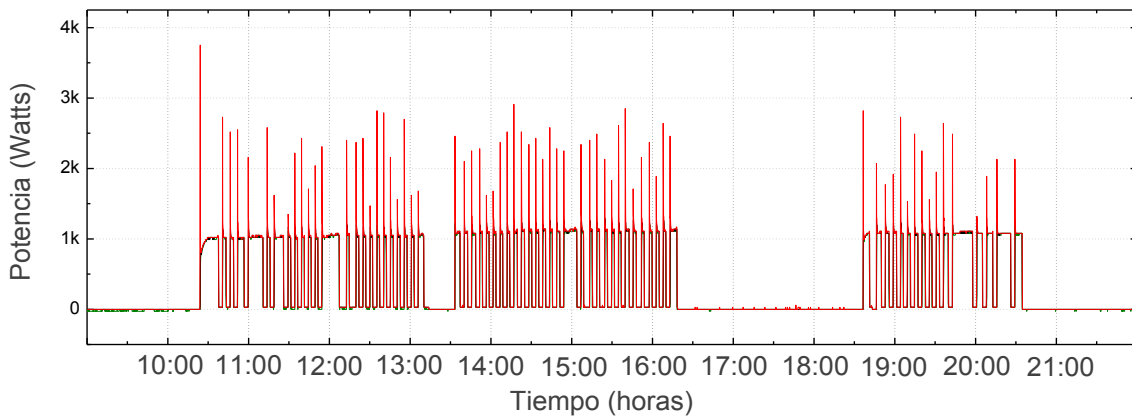
#### 4.4.3.2 Evaluación de cubículo

Para este espacio de trabajo se hicieron dos evaluaciones, evaluación A y evaluación B, de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

##### *Evaluación A*

En imagen 4.4.8 se muestra las lecturas de potencia demandada del cubículo analizado después de implementar el sistema de ahorro. Notar la diferencia que hay en el comportamiento de los pulsos con respecto al sistema evaluado donde todavía no se instalaba el sistema de ahorro. Recordar que el comportamiento normal de gasto de energía de este espacio de trabajo es que una vez encendido el aire acondicionado, este permanecerá así hasta el momento en el que el usuario deja el edificio (aproximadamente a las 20:30 horas). El sistema de control actúa en dos ocasiones la primera vez es entre las 13:00 y 14:00 horas, por un tiempo de aproximadamente 20 minutos, y la segunda vez por un lapso de más de dos horas, entre las 16:00 y 19:00 horas. En las dos ocasiones que el sistema de ahorro actuó se logró un ahorro de 26.81% de energía. Además,

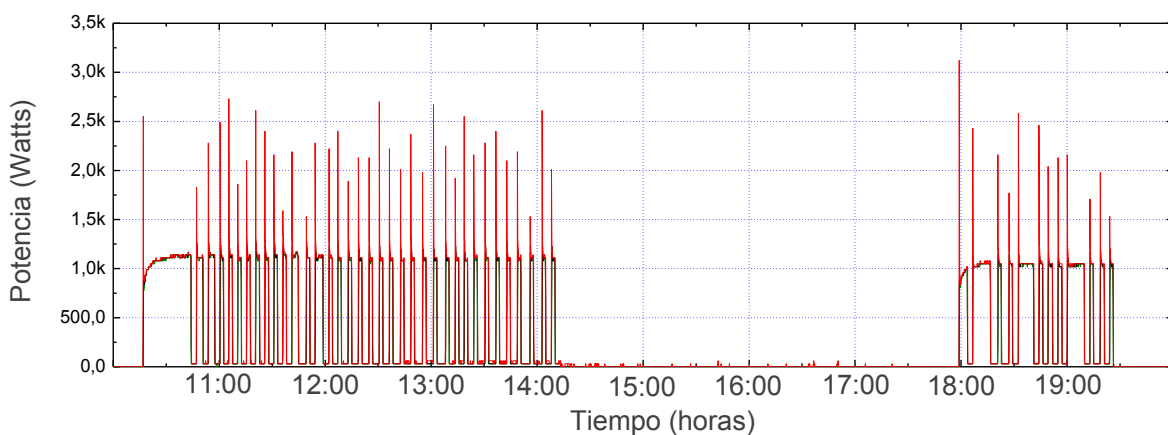
se eliminaron varios picos de arranque del compresor, lo cual contribuye a ahorro por demanda de potencia.



*Imagen 4.4.8 El ahorro de energía se lleva a cabo entre las 13 y 14 horas y 16 y 19 horas. Lo cual representa un ahorro del 26.81 % del total que se hubiera gastado en esta jornada de trabajo.*

### Evaluación B

Se realizó una segunda evaluación para el mismo cubículo evaluado en la sección A. En esta se observó un comportamiento similar a la primera. Lo cual sugiere que el sistema se encuentra funcionando correctamente. Ver que en ambas evaluaciones el sistema de control para ahorro de energía interviene en los momentos en los que el lugar queda desocupado. La Imagen 4.4.9 nos muestra este comportamiento. Alrededor de las 14:00 horas el usuario desocupa el lugar, quedando vacío durante aproximadamente 4 horas para volver a ser ocupado poco más o menos a las 18:00 horas. El ahorro de energía obtenido en este día fue de 39.6 %.



*Imagen 4.4.9 EL sistema de ahorro actúa por casi 4 horas logrando un ahorro del 39.6 %.*



# CAPÍTULO V

---

## CONCLUSIONES

---

En conclusión, en este trabajo se exploró la manera de ahorrar energía en los edificios que conforman el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (3IER) de la UNICACH. Primeramente haciendo un análisis de cuánto, cómo y cuáles son los dispositivos que más consumen energía en el instituto de investigación. Segundo, se buscó la manera de disminuir el consumo eléctrico. Se propusieron varias maneras de ahorrar, sin embargo se decidió hacerlo con un sistema automático de ahorro que influye directamente a los sistemas de iluminación y aires acondicionados. Este dispositivo y sistema desarrollados fueron evaluados para ver los beneficios obtenidos después de su instalación.

Para lograr los objetivos de la tesis se indagó en varias áreas de las cuales se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Se encontró que los medidores de energía de la UNICACH únicamente ofrecen datos de forma mensual, dejando a un lado datos que nos indiquen patrones de gasto de forma horaria o periódica. Además, estos medidores ofrecen datos de toda la escuela lo cual no nos muestra detalles de los edificios que se estudiaron. Por lo tanto fue necesario, tanto el estudio de las facturas eléctricas para tener idea de que parámetros afectan al consumo, como también se estudió de forma detallada los 5 circuitos eléctricos trifásicos que alimentan a los distintos edificios del 3IER.
2. El estudio del gasto de energía se dividió en dos partes. En la primera se analizó la carga conectada de los edificios estudiados. Las cuales mostraron los siguientes porcentajes de carga:

Aire acondicionado 34.3 %

Equipo de laboratorio 25.76 %  
Equipo de taller 16.65 %  
Equipos de cómputo 9.32 %  
Iluminación 5.43%  
Refrigeración y cafetería 3.79 %  
Otras cargas 4.74 %

Aun cuando los resultados del análisis de carga conectada sugieren un comportamiento, en la segunda parte del análisis puede observarse que el gasto de energía mayormente es aportado por los sistemas de aire acondicionado e iluminación, con un gasto de energía del 78 % y 15 % respectivamente. Lo cual conlleva a que el dispositivo tecnológico desarrollado incidiera en los sistemas de aires acondicionados y sistemas de iluminación.

3. Se encontró que los principales componentes que afectan el cobro de energía son: la energía consumida, la potencia máxima demandada y el factor de potencia. De los cuales los mayores contribuyentes a estos factores son: los aires acondicionados que contribuyen al gasto de energía y valores máximos de demanda de potencia. Así también, los dispositivos de iluminación LED, contribuyen a un bajo factor de potencia, el cual se encontró entre los valores de 0.3 a 0.7, cuando el valor mínimo aceptado es de 0.9.
4. Se diseñó un dispositivo de control con el cual se atacaron los dos rubros que más consumen energía: Sistemas de aires acondicionados e iluminación.
5. El sistema de control diseñado se instaló en los diferentes espacios de trabajo, tales como salones de clases, cubículos y laboratorios.
6. El sistema de ahorro está preparado para hacer mejoras a futuro. Posee dispositivos que pueden ser modificados a nivel software lo cual ofrece la posibilidad de actualizaciones. Algunos de ellas son, monitoreo de ocupación, para ver el comportamiento de los ocupantes, así como los patrones de funcionamiento y conducta de los usuarios, logrando con esto la posibilidad de ampliar los estudios no solo en lo tecnológico sino también en el estudio del comportamiento humano.
7. Cada dispositivo instalado está diseñado para ser monitoreado a distancia a través de una red de comunicación utilizando tecnología ZigBee. Esto permite que en trabajos futuros se pueda añadir una modalidad de monitoreo de gasto de energía desde un sistema central.
8. Se evaluaron con éxito distintos dispositivos de aire acondicionado. Logrando ahorrar hasta un 39.6 % de energía en uno de los casos. Esto nos indica que el porcentaje de ahorro debido a la instalación de estos dispositivos puede llegar a niveles excelentes de desempeño.

9. El sistema de control implementado no incentiva la demanda de potencia debido a que las interrupciones que hace el sistema de ahorro a los ciclos del compresor de los aires acondicionados solo hace que hallan menos picos de arranque en una jornada de trabajo. Los pulsos de demanda de potencia de los compresores siempre están presentes de tal forma que al interrumpir los ciclos de enfriamiento de un espacio de trabajo lo único que se hace es disminuir la cantidad de picos de demanda, lo cual contribuye de una manera positiva al disminuir el rubro de demanda máxima del edificio. Así como también disminuir el desgaste de los equipos de enfriamiento. Estas acciones colaboran de manera favorable al medio ambiente al disminuir el gasto de energía.
10. En la instalación de equipo, cabe mencionar que el factor de humano con entrenamiento adecuado es uno de los puntos que podrían contribuir incluso en pérdidas por falta de capacitación adecuada.
11. Además del ahorro de energía logrado, un beneficio extra fue la disminución de picos de demanda de potencia debido al control ON-OFF de los compresores de los aires acondicionados.
12. En lo que se refiere a la programación realizada, esta ofrece la posibilidad de cambiar la forma de control a otras versiones modernas que se requerirán. Pudiéndosele agregar distintos parámetros de conteo para saber tiempos de ocupación y comportamiento de ocupantes.
13. Finalmente, se lograron cumplir todos los objetivos, general y particulares, de esta tesis. La cual implicaba el análisis, implementación y evaluación de un sistema de ahorro de energía en el 3IER, UNICACH.

## Productividad

- Participación en modalidad oral en el *International Material and Systems Congress for Renewable Energy Applications (IMSCREA)*, celebrado del 15 al 18 de Agosto de 2017 en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Con el tema “Energy consumption analysis and control system implementation at the CIDTER research center of the University of Sciences and Arts of Chiapas”.
- Participación en el concurso de prototipos en el *International Material and Systems Congress for Renewable Energy Applications (IMSCREA)*, celebrado del 15 al 18 de Agosto de 2017 en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Con el tema “Implementación de un sistema de control en los sistemas de aires acondicionados y de iluminación de los edificios del CIDTER”.
- Participación en el Cuarto Coloquio de Energías. Uso actual de la energía y energías renovables, celebrado del 23 al 26 de Octubre del 2018 en las instalaciones de la UNACH, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Con el tema “Energy consumption analysis and control system implementation at the CIDTER research center of the University of Sciences and Arts of Chiapas”.
- Desarrollo tecnológico de circuito de control implementado en las instalaciones del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables.
- Tesis de licenciatura con el tema “*Medición de consumo de energía eléctrica y propuesta de eficiencia energética en el sistema de iluminación del 3IER*”.

## Trabajos futuros

- Diseño de metodología de evaluación de los sistemas de aire acondicionado, tomando en cuenta el comportamiento de ocupantes y la influencia de estos en el gasto de energía de los edificios.
- Diseño y construcción de un sistema central de adquisición de datos para administración adecuada del sistema de control.
- Sistema de monitoreo de potencia y energía consumida por cada edificio.
- Acceso remoto para programar dispositivos Arduino vía Zig-bee.

## Referencias:

- [1] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, “A review on buildings energy consumption information,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, 2008.
- [2] A. K. Kvellheim, “The power of buildings in climate change mitigation: The case of Norway,” *Energy Policy*, vol. 110, no. 1, pp. 653–661, 2017.
- [3] S. D’Oca, T. Hong, and J. Langevin, “The human dimensions of energy use in buildings: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. August 2017, pp. 731–742, 2018.
- [4] X. Cao, X. Dai, and J. Liu, “Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade,” *Energy Build.*, vol. 128, pp. 198–213, 2016.
- [5] M. Jain, T. Hoppe, and H. Bressers, “Analyzing sectoral niche formation: The case of net-zero energy buildings in India,” *Environ. Innov. Soc. Transitions*, vol. 25, pp. 47–63, 2017.
- [6] H. Jang, L. Jones, and J. Kang, “Prioritisation of old apartment buildings for energy-efficient refurbishment based on the effects of building features on energy consumption in South Korea,” *Energy Build.*, vol. 96, pp. 319–328, 2015.
- [7] E. Commission, “Energy Efficiency,” 2017.
- [8] M. Dowling, “High Performance.,” *Aust. Orienteer*, no. 151, p. 15, 2008.
- [9] J. Petersen, “for Environmental Studies : A Low-Energy Academic Building,” no. July, 2004.
- [10] S. Wittkopf, “Tropical Net Zero,” no. 76 m, 2015.
- [11] F. Garde and M. Donn, “Solution Sets and Net Zero Energy Buildings A review of 30 Net ZEBs case studies worldwide. A report of Subtask C,” no. May, 2014.
- [12] P. Description and B. Details, “Ilet du Centre,” pp. 2–4.
- [13] P. Torcellini, S. Pless, M. Deru, and B. Griffith, “Lessons Learned from Case Studies of Six High-Performance Buildings,” *Energy*, no. June, 2006.
- [14] N. Development and P. By, “Introduction To,” pp. 1–26, 2014.
- [15] A. H. Bonnett and R. Boteler, “The impact that voltage variations have on AC Induction motor performance,” *Proc. ACEEE Summer Study Energy Effic. Ind.*, vol. 2, pp. 301–316, 2001.
- [16] Schneider, “AC motors starting and protection systems,” *Schneider Electr.*, pp. 60–91.
- [17] J. Ware, “Power Factor,” *IEE Wiring Matters*, pp. 22–24, 2006.
- [18] M. S. Witherden, R. Rayudu, and R. Rigo-mariani, “The Influence of Nonlinear Loads on the Power Quality of the New Zealand Low Voltage Electrical Power Distribution Network.”

