

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA EL
CONTROL DE AIRES ACONDICIONADOS EN EDIFICACIONES**

EDGAR DAVID VILLA PÉREZ

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
MAESTRÍA DE INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN SISTEMAS
CARTAGENA DE INDIAS, D. T. y C.
2017**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA EL
CONTROL DE AIRES ACONDICIONADOS EN EDIFICACIONES**

EDGAR DAVID VILLA PÉREZ

**Trabajo de tesis para optar por el título de Magíster en Ingeniería con énfasis
en Sistemas**

Ph.D. JOSÉ LUIS VILLA RAMÍREZ
Director

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
MAESTRÍA DE INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN SISTEMAS
CARTAGENA DE INDIAS, D. T. y C.
2017**

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

Cartagena de Indias, 25 de febrero de 2017

AGRADECIMIENTOS

Dios, gracias por guiarme en el desarrollo de este trabajo y permitirme la oportunidad de optar al título de Maestría con énfasis en sistemas.

Gracias al PhD. José Luis Villa, por su apoyo en la realización del mismo, el cual es el resultado de la perseverancia y de la investigación.

Gracias al Ministerio de las TIC por su apoyo con la beca, y al Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana por brindar sus instalaciones para implementar el proyecto.

Agradecimiento especial al proyecto FI1602T200 “Aplicación de Control Predictivo Estocástico al problema de control energético en edificaciones” de la Universidad Tecnológica de Bolívar y a la empresa Nissi Web Design por sus aportes financieros para el desarrollo de este proyecto.

De igual forma, agradezco a mis padres, amigos y familiares por apoyarme en este proceso.

EDGAR DAVID VILLA PÉREZ

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE GRÁFICAS.....	7
GLOSARIO	13
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
1. INTRODUCCIÓN	16
CONTEXTO Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	17
APORTES DE ESTE TRABAJO	22
METODOLOGÍA	23
RESUMEN DE LOS CAPÍTULOS.....	24
2. CONCEPTOS GENERALES DE AIRES ACONDICIONADOS Y EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	26
3. ARQUITECTURA DE HADWARE Y SOFTWARE.....	33
3.1 ARQUITECTURA DE HADWARE	33
3.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE.....	35
3.3 ARQUITECTURA DE SOFTWARE	45
3.4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE	46
4. DESPLIEGUE DE LA SOLUCIÓN: CASO DE ESTUDIO.....	56
4.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA INSTITUCIÓN	56
4.2 DATOS TOMADOS EN LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA FUNDACIÓN LUMBRERAS DEL MAÑANA	62
5. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES MEDIDAS Y CONFORT	68
6. MODELOS PARAMÉTRICOS A PATIR DE LOS DATOS REGISTRADOS...	74
6.1 MODELOS BASADOS EN PRINCIPIOS FÍSICOS.....	74
6.2 AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE LOS MODELOS	76
7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	86
BIBLIOGRAFÍA.....	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones del primer piso Establecimiento Educativo Fundación Lumberas del Mañana.	58
Tabla 2. Dimensiones del segundo piso Establecimiento Fundación Lumberas del Mañana.	59
Tabla 3. Número de personas por zonas primer piso establecimiento Fundación Lumberas del Mañana.	59
Tabla 4. Número de personas por zonas primer piso establecimiento Fundación Lumberas del Mañana.	59
Tabla 5. Listado de aires acondicionados Establecimiento Educativo Fundación Lumberas del Mañana.	60
Tabla 6. Se muestran los valores máximos y mínimos de la temperatura y humedad de la oficina Administrativa, Cuarto-quinto, Sala de informática y Primero.	63
Tabla 7. Código para identificar las zonas en el Establecimiento Educativo Fundación Lumberas del Mañana.	76
Tabla 8. Parámetros modelo aire acondicionado encendido.	77
Tabla 9. Parámetros modelo aire acondicionado apagado.	79

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Elementos de refrigeración por compresión.....	28
Gráfica 2. Modelo de entorno personal.	29
Gráfica 3. Lazo de control cerrado.	31
Gráfica 4. Diagrama de arquitectura de red Nissi Energy.....	34
Gráfica 5. Arquitectura hardware Nissi Energy Box.	34
Gráfica 6. Nissi Energy Box.....	35
Gráfica 7. Conexiones sujetas al Arduino Yun.....	36
Gráfica 8. Rectificador de onda completa seguido de un divisor de tensión.....	37
Gráfica 9. Transformador de 220Vac/12Vac.	37
Gráfica 10. Amplificador diferencial con AD620AR seguido de un rectificador de onda completa con amplificadores operacionales MC4558A.....	38
Gráfica 11. Sensores de corriente no invasivo SCT013.....	38
Gráfica 12. Circuito conexión de sensores de temperatura y humedad, CO2 y CO.	39
Gráfica 13. DHT22 Temperature & Humidity Sensores V2, CO2 Sensores V1.2 y MQ7Gas Sensores V2.....	39
Gráfica 14. Circuito para controlar los relees HJR-4102-L-05V.	40
Gráfica 15. Circuito para transmitir con el infrarrojo.	40
Gráfica 16. Circuito fuente lineal, especial para Nissi Energy Box.	40
Gráfica 17. Prácticas en laboratorios con protoboard y tarjetas universales.	41
Gráfica 18. Señal de ruido obtenida en laboratorio con el osciloscopio Tektronix TDS 2002C.....	41

Gráfica 19. Señal de ruido obtenida en las protoboard, se conectaron los demás circuitos, medida con el Arduino Yun.....	42
Gráfica 20. Señal sin ruido obtenida en las protoboard, solo se conectó para medir voltaje, medida con el Arduino.	42
Gráfica 21. Esquema eléctrico tarjeta interfaz Nissi Energy Box.....	43
Gráfica 22. Tarjeta de interfaz Nissi Energy V 1.0.....	43
Gráfica 23. Tarjeta interfaz Nissi Energy V. 1.0 conectada con el Arduino Yun.....	44
Gráfica 24. Esquema eléctrico de la fuente lineal regulada.....	44
Gráfica 25. Fuente lineal regulada.	45
Gráfica 26. Software principales Nissi Energy.	45
Gráfica 27. Diagrama de modelo de dominio.....	46
Gráfica 28. Diagrama de despliegue.....	46
Gráfica 29. Requisitos funcionales del sistema.....	47
Gráfica 30. Diagrama de interfaces de usuario.....	48
Gráfica 31. Interfaces de usuario.....	48
Gráfica 32. Diagrama caso de uso administrar plataforma.....	49
Gráfica 33. Diagrama caso de uso acciones de usuario recurrente.....	50
Gráfica 34. Diagrama caso de uso acciones de usuario temporal.....	50
Gráfica 35. Características del sistema.....	51
Gráfica 36. Modelo de Vista Controlador MVC.....	51
Gráfica 37. Diagrama modelo de clases.....	51
Gráfica 38. Clases principales del sistema y framework externos utilizados.....	52

Gráfica 39. Login.....	52
Gráfica 40. Menú.....	53
Gráfica 41. Monitoreo.....	53
Gráfica 42. Control.....	54
Gráfica 43. Diagrama de flujo proceso realizado en el “Timer del Arduino Yun” cada 20 segundos.....	55
Gráfica 44. Primer piso Establecimiento Fundación Lumberas del Mañana.	57
Gráfica 45. Segundo piso Establecimiento Fundación Lumberas del Mañana.	58
Gráfica 46. Nissi Energy-Box instalado en la oficina de administración.	61
Gráfica 47. Nissi Energy-Box instalado en el salón de primero.	61
Gráfica 48. Nissi Energy-Box instalado en el salón cuarto y quinto.	61
Gráfica 49. Nissi Energy-Box instalado en el salón de segundo (ahora es informática).....	62
Gráfica 50. Temperatura y humedad en la oficina Administrativa, Cuarto-quinto, Sala de informática y Primero de la institución Educativa Fundación Lumberas del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.	62
Gráfica 51. Confort en la oficina Administrativa, Cuarto-quinto, Sala de informática y Primero de la institución Educativa Fundación Lumberas del Mañana, dato simulado con una temperatura radiante para el día 10 de julio de 2016 de 32°C, metabolismo típico de 1.1 y nivel de ropa de 0.5 para verano.	64
Gráfica 52. Voltaje, Corriente y Potencia en la oficina Administrativa y en el salón Cuarto y Quinto de la institución Educativa Fundación Lumberas del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.....	65

Gráfica 53. CO ₂ en la oficina Administrativa, Cuarto-quinto, Sala de informática y Primero de la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.....	66
Gráfica 54. CO en la oficina Administrativa, Cuarto-quinto, Sala de informática y Primero de la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.....	67
Gráfica 55. Comportamiento de la temperatura y humedad en las oficinas administrativas de la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.....	69
Gráfica 56. Gráfica psicométrica para observar si hay confort térmico el día 9 de octubre de 2016 en la oficina de administración en la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana.....	70
Gráfica 57. Comportamiento de CO ₂ en las oficinas administrativas de la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.....	71
Gráfica 58. Comportamiento de CO en las oficinas administrativas de la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.....	72
Gráfica 59. Voltaje, corriente y potencia en las oficinas administrativas de la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.....	73
Gráfica 60. Modelo en OpenModelica ejemplo “SpaceCooling System1”.....	75

Gráfica 61. Simulación modelo en OpenModelica ejemplo “SpaceCooling System1”.	76
Gráfica 62. Simulación modelo aire acondicionado encendido de la zona 1z1 Administración.	77
Gráfica 63. Simulación modelo aire acondicionado encendido de la zona 1z5 Primero.	78
Gráfica 64. Simulación modelo aire acondicionado encendido de la zona 1z6 Cuarto y quinto.	78
Gráfica 65. Simulación modelo aire acondicionado encendido de la zona 1z7 Informática.	79
Gráfica 66. Simulación modelo aire acondicionado apagado de la zona 1z1 Administración.	79
Gráfica 67. Simulación modelo aire acondicionado apagado de la zona 1z5 Primero.	80
Gráfica 68. Simulación modelo aire acondicionado apagado de la zona 1z6 Cuarto y Quinto.	80
Gráfica 69. Simulación modelo aire acondicionado apagado de la zona 1z7 Informática.	80
Gráfica 70. Diagrama de flujo utilización de modelos.	81
Gráfica 71. Simulación zona 1z1 Administración apagando el aire 12 minutos cada 60 minutos.	82
Gráfica 72. Simulación zona 1z5 Primero apagando el aire 12 minutos cada 60 minutos.	82

Gráfica 73. Simulación zona 1z6 Cuarto y Quinto apagando el aire 12 minutos cada 60 minutos.....	83
Gráfica 74. Simulación zona 1z7 Informática apagando el aire 12 minutos cada 60 minutos.....	83
Gráfica 75. Simulación zona 1z1 Administración apagando el aire 6 minutos cada 30 minutos.....	84
Gráfica 76. Simulación zona 1z5 Primero apagando el aire 6 minutos cada 30 minutos.....	84
Gráfica 77. Simulación zona 1z6 Cuarto y Quinto apagando el aire 6 minutos cada 30 minutos.....	85

GLOSARIO

ARDUINO YUN: Es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega32u4 y el Atheros AR9331.

CONFORT: Condiciones materiales que producen bienestar y comodidad.

GRÁFICA PSICOMÉTRICA: Diagrama de doble entrada, en el que se relacionan múltiples parámetros referentes a una mezcla de aire húmedo.

HVAC: Se refiere a la climatización que enmarca calefacción, ventilación y aire acondicionado.

MATLAB (MATrix LABoratory): Software matemático con un lenguaje de programación propio llamado "M".

PLC: Controlador lógico programable; es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial.

PMV: Valor medio previsto, se encuentra entre los modelos de confort térmico más reconocidos.

PPD: Porcentaje previsto de insatisfecho; es un modelo que predice el porcentaje de ocupantes que estarán insatisfechos con las condiciones térmicas.

Software cloud: Software desarrollado para prestar sus servicios desde internet.

Software local o intranet: Software desarrollado para prestar sus servicios desde la intranet. No depende de internet.

System Identification Toolbox™: Herramienta de MATLAB aplicación para la construcción de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos de entrada-salida medidos.

RESUMEN

En una edificación con varios aires acondicionados en cada una de sus zonas es complejo mantener márgenes de confort, temperatura y humedad, al mismo tiempo que se quiere ahorrar energía o hacer el uso eficiente de la misma. Por lo general, esto conlleva a que las empresas o instituciones deban contar con al menos una persona encargada del encendido y apagado de dichos aires acondicionados; además, ésta persona debe observar que la temperatura sea la deseada por los usuarios de la edificación.

Por la anterior razón, se diseñó una plataforma de software y hardware a la que hemos llamado "Nissi Energy", donde se centralizan el monitoreo y control de aires acondicionados (Split y de ventana) ubicados en múltiples zonas en una edificación.

Con los datos obtenidos del monitoreo se realizó un ajuste paramétrico sobre modelos lineales de los sistemas de aire acondicionado en cada una de las zonas, apoyándose en el software MATLAB y utilizando la herramienta "System Identification Toolbox™", donde en cada uno de los modelos se relacionan las variables de temperatura y energía consumida.

A partir de estos modelos se estudió, a través de simulación, una estrategia de temporización, donde se conmuta el encendido y apagado del aire acondicionado, logrando así el objetivo propuesto: mantener el ahorro energético hasta del 20% de la energía consumida.

Palabras claves:

Aire acondicionado, Control de temperatura, Ahorro de energía, Sistema de monitoreo, Software de monitoreo, HVAC, Consumo de energía, Internet de las Cosas.

ABSTRACT

In a building with several air conditioners in each of its zones is complex to maintain margins of comfort of temperature and humidity, at the same time that you want to save energy or make efficient use of it. Generally, these are independently controlled and at least must have at least one person pending on and off at the appropriate time; In addition, you should note that the sea temperature is desired by the users of the building.

For the aforementioned reason, we designed a software and hardware platform called "Nissi Energy", where we centralize the monitoring and control of air conditioners (Split and window unit) located in multiple zones in the building.

With the data obtained from the monitoring of air conditioning, a parametric model is obtained by each of the zones. This model is adjusted using the software MATLAB and using the tool "System Identification Toolbox™".

Using these models a scheduling strategy by time is simulated, where the switch on and switch off of the air conditioner is scheduled. The obtained results show that the proposed objective is achieved: to maintain the saving of up to 20% of the energy consumption.

Keywords:

Air conditioning, Temperature control, Energy saving, Monitoring system, Monitoring software, HVAC, Energy consumption, Internet of Things.

1. INTRODUCCIÓN

Existe cada vez una mayor conciencia de la necesidad de hacer uso eficiente de la energía, esto como una de los principales requerimientos para llegar a una sostenibilidad ambiental y social. Esta premisa ha sido una de las principales motivaciones en relación con la utilización de los aires acondicionados en edificios con múltiples zonas que requieren climatización, como edificios comerciales, hoteles, oficinas, hospitales, instituciones educativas, zonas residenciales entre otros; en los que el promedio de consumo energético de los aires acondicionados o HVAC oscila desde el 40% al 50% del total de la energía consumida en el edificio [1].

Los sistemas de aires acondicionados son diseñados para asegurar ambientes de confort. Éstos se enfrentan al reto de controlar la temperatura y humedad relativa, principalmente en una zona específica, y en el caso más complejo, en múltiples zonas.

En la zona caribe colombiana es común la problemática de que los sistemas de aires acondicionados para múltiples zonas, no permiten mantener los márgenes de confort de temperatura y humedad al mismo tiempo que se haga uso eficiente de la energía, debido a que el sistema por tener varias zonas se sale del control del manejo humano; por ejemplo, al no tener sistemas centralizados o simplemente por descuido.

Esta investigación se focaliza en lograr un sistema de monitoreo que ayude a optimizar los márgenes de confort a medida que se hace uso eficiente de la energía en los sistemas de aires acondicionados individuales (split o de ventana).

El caso de estudio y despliegue de la solución es realizado en el “Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana”. En este lugar se encontró un caso típico para realizar la investigación, ya que dispone de varios aires acondicionados individuales (split o de ventana) ubicados en múltiples zonas.

El “Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana” se encuentra localizado en Cartagena (Colombia), ciudad caracterizada por un clima cálido en la que generalmente, las personas ajustan el setpoint al mínimo (16°C) en un horario de 7: am a 1:00pm, pero los aires acondicionados (inverter o no inverter) no son capaces de alcanzar dicha temperatura en las horas de mayor calor; por consiguiente, no realizan el proceso de control de temperatura deseado.

CONTEXTO Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La situación que se aborda en este trabajo corresponde a edificios en donde se han instalado aires acondicionados tipo mini-splits para cada zona. Cada aire acondicionado tiene un control independiente, se pretende diseñar una plataforma de software y hardware que monitoree y controle las unidades de aires de forma centralizada, con el objetivo de poder asegurar los márgenes de confort temperatura y humedad y hacer uso eficiente de la energía.

Se busca entonces dar una solución a la problemática planteada, al monitorear y controlar varios aires acondicionados splits o de ventana ubicados en múltiples zonas en una edificación, teniendo en cuenta que el objetivo es asegurar márgenes de confort estables que conlleven a reducir el consumo de energía de los mismos, con el apoyo del diseño de la plataforma de software y hardware.

Formulación del problema

¿Cómo diseñar e implementar un sistema de monitoreo para el control de aires acondicionados en edificaciones, orientado al control de temperatura y ahorro de energía o uso eficiente de la energía?

A partir de este problema se planteó como objetivo general el diseñar e implementar un sistema de monitoreo de aires acondicionados para múltiples zonas, orientado al control de temperatura y uso eficiente de la energía.

Para dar seguimiento a este objetivo general se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- Definir una arquitectura de monitoreo para edificios, orientada al control de aires acondicionados en múltiples zonas.
- Implementar la arquitectura de monitoreo para edificios orientado al control de aires acondicionados en múltiples zonas en el “Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana”.
- Obtener un modelo paramétrico de los sistemas de aires acondicionados para múltiples zonas con unidades condensadoras independientes, orientado a una estrategia de ahorro energético.
- Validar por simulación el modelo de un sistema de aires acondicionados para múltiples zonas con unidades condensadoras independientes, orientado al ahorro energético.

Trabajos previos

Debido al alto impacto que tienen los sistemas de Aires Acondicionados desde el punto de vista energético, existen una gran cantidad de trabajos que abordan esta temática.

En el tema de arquitecturas de hardware implementadas con sensores inalámbricos resulta de interés los siguientes artículos:

- Tao Zheng, Yajuan Qin, Deyun Gao, Junqi Duan, Hongke Zhang; A practical deployment of Intelligent Building Wireless Sensor Network for environmental monitoring and air-conditioning control. [2]

En éste, los autores afirman que es difícil asegurar el rendimiento de la red de sensores inalámbricos desplegada en los edificios, porque normalmente hay varias perturbaciones graves de los sistemas inalámbricos de coexistencia con las acciones humanas. La arquitectura de hardware para una red inalámbrica Zigbee que ellos describen consta de: nodo sensor, nodo de control, puerta de enlace (gateway) y servidor.

Las características del software utilizado o desarrollado son las siguientes:

1. Interfase de servidor bajo el sistema operativo Linux Debian v5.0 (El software es diseñado para un entorno de escritorio).
2. Visualización de información de datos en tiempo real incluyendo temperatura y humedad.
3. Muestra el estado de los nodos del sensor actualizados en tiempo real.
4. Gestionan la red que contiene la configuración del intervalo de transmisión, tiempo.
5. Controlar unidades de aire acondicionado basadas en los datos de temperatura promedio.
6. El servidor puede enviar automáticamente información a los clientes móviles con regularidad, y los clientes pueden solicitar información ambiental en el edificio o controlar unidades de aire acondicionado de forma remota mediante el envío de un mensaje de texto.

El método de control utilizado por los autores del artículo mencionado se basa en un umbral de temperatura preestablecido del aire acondicionado. Un módulo con sensores de temperatura y humedad es el responsable de recoger información de temperatura y humedad en tiempo real y compararlos con los umbrales de

temperatura y humedad preestablecidos. Los nodos del sensor supervisan la temperatura una vez por segundo. Cuando la temperatura alcanza el umbral, el nodo del sensor comienza a codificar una señal infrarroja y controla el estado del aire acondicionado.

Aunque el trabajo de los autores ofrece una arquitectura diferente, presenta dificultades en su red por las perturbaciones. Oportunidades de mejoras del mismo pueden estar relacionadas en utilizar la tecnología actual ya que el trabajo se desarrolló en el año 2010, tanto el sistema operativo como el lenguaje de programación basado o compatible con la web.

Otro trabajo que plantea una arquitectura de hardware alterna es:

- Prasit Nangtin, Pinit Kumhom, Kosin Chamnongthai; Adaptive actual load for energy saving in split type air conditioning. [3]

Cuyos autores centran el trabajo en la pérdida de energía en los aires acondicionados Split; controlan la temperatura considerando el número de personas y la posición de las mismas. El método de control es adaptando a la carga con un modelo "Takagi- Sugeno (T-S) fuzzy", donde regulan la velocidad del evaporador y el "encendido y apagado" del compresor.

Su arquitectura de hardware contiene: procesador de imagen, PLC, condensador y evaporador. Es conocido que el PLC es un instrumento robusto utilizado en la industria, su implementación es efectiva porque con él puede lograrse el tipo de control deseado, pero hay que dejar saber que su implementación tiene costos altos y más si se requiere para múltiples zonas.

Se puede considerar que los autores centran su atención directamente sobre el compresor y el evaporador alterando el circuito original del aire. En este diseño hay que mirar la efectividad del procesador de imagen.

Otro trabajo se basa en una arquitectura basada en la familia de componentes ADAM de la empresa Advantech que adquieren los datos de los sensores, para comunicárselo al PC donde se aloja la aplicación es:

- Feng Li. Hui-qing Lu. Hui Zhou; Design of intelligent monitoring system of air conditioning and ventilation system in distribution station with 10kV power. [4]

La Arquitectura de hardware utilizada es:

- PLC - ADAM5510 de Advantech
- Pantalla táctil - MCGS TPC7062K de Kunlun Winton
- Sensor de gas SF6

- Sensor de temperatura y humedad
- Control de aire acondicionado – (ADAM-5010)
- Control del ventilador de escape o extractor – (ADAM-5069)
- Fuente de alimentación

Es una estructura útil para el objetivo propuesto, implementar control de aires acondicionados en las Estaciones con 10kV de potencia. Su sistema de control considera la estación del año “verano” para configurar el modo de acción o configuración para que el aire acondicionado no desperdicie energía.

Algunos autores han estudiado los aportes de realizar control por conmutación ON-OFF:

- Karthik Chinnakani. Anunay Krishnamurthy. James Moyne. Ann Arbor. Fangming Gu; Comparison of energy consumption in HVAC systems using simple ON-OFF, intelligent ON-OFF and optimal controllers. [5]

En este artículo, aunque se está controlando un sistema de calefacción, es importante observar los métodos de control utilizados:

- Controlador ON / OFF tradicional con una región de banda muerta
- Controlador inteligente ON / OFF
- Controlador óptimo donde el confort térmico en un edificio se mantiene mediante el seguimiento de un PMV (valor medio previsto).

El control ON / OFF tradicional se activa hasta llegar al máximo nivel de temperatura y humedad ajustado y se desactiva hasta llegar al mínimo valor ajustado de temperatura y humedad, donde nuevamente se repite el ciclo.

Controlador inteligente ON / OFF cuando el controlador está en estado 'ON', la temperatura / humedad está aumentando hacia el valor de punto de ajuste superior. En lugar de cambiar el estado del controlador a 'OFF' cuando la temperatura / humedad alcanza el valor de punto de ajuste superior, el controlador cambia su estado a 'OFF' estimando el tiempo que tardaría el sistema en pasar del punto de ajuste inferior al punto superior al valor de punto de ajuste. La estimación se realiza determinando la pendiente de la curva temperatura-tiempo y suponiendo que la curva es lineal en la región entre el valor de punto de ajuste superior e inferior. Esto toma en cuenta los retrasos en el sistema. Por lo tanto, la conmutación de estados se determina ahora por el tiempo basado en la pendiente del gráfico de tiempo de temperatura.

El Controlador óptimo es donde el confort térmico en un edificio se mantiene mediante el seguimiento de un PMV (valor medio previsto), que es una función de los niveles aceptados de temperatura y humedad de un gráfico psicométrico.

Otros trabajos que abordan el control de aires acondicionados son:

- M. Mossolly A, K. Ghali B, N. Ghaddar A; Optimal control strategy for a multi-zone air conditioning system using a genetic algorithm. [6]
- Xinhua Xu, Shengwei Wang, Zhongwei Sun, Fu Xiao; A model-based optimal ventilation control strategy of multi-zone VAV air-conditioning systems. [7]

Estos artículos se basan en estrategias de control de sistemas de aires acondicionados de volumen de aire variable para múltiples zonas,

En [6] los autores presentan una estrategia de control óptima para la ventilación, basada en modelos para sistemas de aire acondicionado VAV para múltiples zonas, destinadas a optimizar el flujo de aire fresco total al comprometer el confort térmico, calidad del aire interior y el consumo total de energía. En éste se plantean dos esquemas, uno para corregir la tasa de flujo de aire fresco total y otro para optimizar el punto de ajuste de temperatura para el control de la temperatura de las zonas críticas (zonas con condiciones de temperatura desfavorables). Este último esquema se basa en una función de coste construida en relación confort térmico, calidad del aire interior y la energía total consumida, donde la función de coste se calcula basándose en la predicción de las respuestas del sistema utilizando modelos simplificados dinámicos. Sin embargo, los resultados mostrados no satisfacen condiciones de ahorros de energía, ya que los métodos convencionales mostraron mejores resultados. Esto puede deberse a los muchos modelos utilizados, ya que la configuración efectiva o certera de cada uno, conllevará a resultados más satisfactorios.

Por su parte, en [7] los autores plantean la utilización de estrategias de control limitadas o relacionadas al mismo sistema de VAV. Estas incluyen una estrategia de control de la base del punto de ajuste de temperatura fija y dos estrategias avanzadas para asegurar el confort y la calidad del aire interior (IAQ). La optimización problema para cada estrategia de control se formula basándose en el coste del consumo de energía y limitado por el sistema y los modelos espaciales transitorios térmicos. Para ello el problema de optimización se resuelve utilizando algoritmo genético, lo que satisfactoriamente muestra resultados del 30.4% y niveles de confort estables.

Por último, algunos autores han trabajado en experiencias de control predictivo, algunos trabajos son:

- Ferreira P.M., A.E. Ruan, S. Silva y E.Z.E. Conceição “Neural networks based predictive control for thermal comfort and energy savings in public buildings”. [8]

- M. Castilla, J.D. Álvarez “A comparison of thermal comfort predictive control strategies”. [9]

En el primero se aplica una metodología de control predictivo basado en modelos en tiempo discretos, los resultados experimentales obtenidos en diferentes habitaciones en un edificio de la Universidad de Algarve, demostraron viabilidad y rendimiento. Los ahorros de energía resultantes de la aplicación del método se estimaron en mayores al 50%.

En el segundo artículo se presenta una comparación entre varios enfoques de control predictivo, que permiten obtener un alto nivel de confort térmico, optimizar el uso de un sistema de HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) a través de diferentes funciones de coste.

APORTES DE ESTE TRABAJO

Los principales aportes de este proyecto se describen a continuación:

1. Se ha desarrollado una arquitectura de software y hardware completa. Si bien el monitoreo de variables en edificaciones ha sido tratado en trabajos previos como se muestra en esta sección, en ninguno de los trabajos consultados se aborda en forma completa una solución desde la medición hasta la interacción con el usuario sin depender de soluciones en la nube de terceros.
2. La arquitectura utilizada se basa en herramientas de Internet de las Cosas. Existen muchas propuestas de monitoreo que utilizan Internet y servicios en la nube, sin embargo, en este trabajo hacemos énfasis en un desarrollo que toma en cuenta las metodologías de Internet de las Cosas.
3. La plataforma implementada es probada por un caso de aplicación real. En ninguno de los trabajos que hemos citado se ha encontrado resultados de pruebas extensivas en un caso real, por el contrario, en este trabajo se desarrollaron pruebas en sitio por un tiempo de seis meses.
4. Uso de los datos analizados para probar una estrategia de ahorro energético utilizando modelos paramétricos. En este trabajo los datos obtenidos de las pruebas reales se utilizaron para simular una estrategia de ahorro energético que permite medir el impacto de la estrategia antes de ponerla en práctica, cuidando de no perjudicar el confort de los usuarios.

METODOLOGÍA

Para el logro del objetivo propuesto, en el presente trabajo se aplicó la metodología tecnológica (Adicionar referencia), ya que el problema que se pretende solucionar es utilizar un sistema de monitoreo y control de aires acondicionados en edificaciones, orientado al control de temperatura y ahorro de energía o uso eficiente de la energía. En forma más general, se pretende estudiar el aporte de un desarrollo tecnológico para aportar a la solución de un problema que es el alto uso de energía en edificaciones que cuentan con aires acondicionados.

La hipótesis que sustenta este trabajo es: si se utiliza un sistema de control y monitoreo para sistemas de aire tipo mini-split y de ventana, entonces puede haber un ahorro energético que permita cubrir los costos de implementación y tener un ahorro durante la vida del equipo de aire acondicionado.

Para el llevar a cabo el estudio se realizan las siguientes etapas en el diseño metodológico de la investigación:

1. Definición de las condiciones de confort en zonas con aires acondicionados
2. Requerimientos de monitoreo y control del sistema de aire acondicionado
3. Diseño y desarrollo de la solución tecnológica
4. Pruebas de validación en un caso real
5. Retroalimentación del diseño y análisis final

Para la etapa de Diseño y Desarrollo de la solución tecnológica se siguieron las siguientes fases:

FASES DE DISEÑO Y DESARROLLO

Para el diseño y desarrollo del sistema desde el punto de vista de hardware y software tomamos las técnicas o metodologías de “Plan de Desarrollo de Software”, donde plantean las siguientes fases:

- Requisitos
- Diseño
- Desarrollo o codificación
- Pruebas
- Implementación
- Mantenimiento

Partiendo de los requerimientos, se tuvo en cuenta las variables a medir o monitorear: temperatura, humedad, CO₂, CO, voltaje, corriente, potencia, y tres entradas digitales que se pueden aplicar para saber si una ventana está abierta o una puerta.

Igualmente, se consideró lo que se iba a controlar: el prendido y apagado de los aires acondicionados desde el infrarrojo, control o activación desde la fuente con relés. Así mismo, se habían requerimientos como: almacenar la información, tipo

de comunicación o transmisión de datos, entre otros más que hacen parte de “Plan de desarrollo de software” donde ya se tiene en detalle los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema.

Para el diseño tomamos todos los requerimientos del sistema y se propuso la mejor arquitectura o soluciones para el software y hardware. Claro, como en este punto consideramos varios circuitos, se hace la construcción de cada uno de ellos simulando, luego en protoboard y finalmente el PCB. Es valioso decir, que es un proceso iterativo hasta obtener los resultados deseados, ya que conceptualmente a menudo no se tiene en cuenta los factores externos que hacen que el diseño de circuitos sea totalmente funcional, por ejemplo, un factor que afecta son los ruidos electrónicos del sistema.

En el tema de desarrollo y codificación, es muy importante tener en cuenta las limitaciones que da el dispositivo a programar, como por ejemplo la memoria RAM del sistema. Desde luego, la codificación tiene que optimizarse para cumplir con todas las tareas demandadas, en nuestro caso consideramos realizar programación lineal para algunos métodos y en otra programación orientada a objetos.

Las pruebas del sistema de hardware en su proceso de construcción siempre se realizaron en los laboratorios de la Universidad Tecnológica de Bolívar, pero la prueba funcional de todo el sistema fue llevada a cabo en el “Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana”. En ambos casos se realizaron correcciones y mejoras.

En la implantación total del sistema se dejó funcionando el sistema de hardware y software en buen estado.

El mantenimiento en esta construcción de hardware y software es fundamental, ya que como prototipo experimental necesita de una atención constante para prevención de errores en el sistema.

Concluyendo, en este capítulo es necesaria la buena planeación para minimizar errores y garantizar su buen funcionamiento.

RESUMEN DE LOS CAPÍTULOS

El segundo capítulo resume algunos conceptos básicos de aires acondicionados y eficiencia energética.

En el tercer capítulo se describe la forma como está compuesta la arquitectura de hardware y software en su proceso de diseño, y en el cuarto capítulo se describe la implementación de la arquitectura desarrollada de monitoreo para edificios orientado al control de aires acondicionados en múltiples zonas en el caso de estudio “Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana”. A partir de esta información, en el quinto capítulo se trata sobre las variables medidas o utilizadas, las cuales fueron obtenidas desde la plataforma implementada y que denominamos “Nissi Energy”.

En el sexto capítulo se modela el sistema de temperatura relacionado con la energía, utilizando la herramienta de Matlab “System Identification Toolbox™”. Y, por último, en el capítulo siete se describe las conclusiones de la presente investigación.

2. CONCEPTOS GENERALES DE AIRES ACONDICIONADOS Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

En este capítulo se describen algunos de los conceptos de aires acondicionados y eficiencia energética.

El campo de los sistemas de climatización (Heating, Ventilating, and Air Conditioning (HVAC)) es muy amplio, se pueden encontrar sistemas sencillos en el hogar para la calefacción, sistemas muy sofisticados para la industria, o muy especiales como para las naves espaciales. Desde este punto de vista, son muchos los contextos donde pueden ser aplicados y cada uno demanda propiamente una serie de requisitos según la necesidad, por ejemplo:

- animales de granja
- quirófano de un hospital
- almacenamiento de alimentos congelados
- conservación de las obras de arte en madera y fibra
- aulas educativas, entre otros.

2.1 SISTEMAS DE AIRES ACONDICIONADOS

Tecnológicamente el término “aire acondicionado” va relacionado a varios ítems o variables [10, p. 2]:

- Temperatura
- Humedad en el aire (humedad)
- Suministro de aire exterior para ventilación
- Filtración de partículas en el aire
- Movimiento del aire en el espacio ocupado

No obstante, es importante conocer los siete principales procesos que se requieren para lograr aire acondicionado, de acuerdo a los requerimientos del contexto [10, p. 3]:

1. Calefacción
2. Enfriamiento
3. Humidificación
4. Deshumidificación
5. Limpieza
6. Ventilación
7. Movimiento del aire.

Es por ello, que es necesario tener en cuenta el área geográfica donde se aplique o conocer cuál es el objetivo que se quiere con el mismo, ya que en algunos casos

puede no ser necesario algún proceso de ellos. Por ejemplo: en Cartagena (Colombia), ciudad costera con clima cálido no se necesita la calefacción.

Es importante considerar que en el interior de muchos edificios se pueden encontrar cargas térmicas variables, dichas cargas pueden deberse a diferentes usos en el interior de los espacios o simplemente a la posición relativa con respecto al sol. Para esto existen sistemas diseñados que controlan cada uno de estos espacios llamados “**zonas**”. Las zonas pueden ser habitaciones independientes o pueden ser parte de un gran espacio.

De igual forma es oportuno tener presente que para la implementación de sistemas de aires acondicionados, éstos se agrupan en cuatro (4) categorías [10, p. 23]:

1. Sistema todo-aire
2. Sistemas de aire y agua
3. Sistemas todo-agua
4. Sistemas unitarios, basado en refrigerantes

De acuerdo a estas categorías, el presente estudio de basa en los “Sistemas unitarios, basado en refrigerantes”, dado que los equipos de refrigeración que entran en la edificación en estudio son:

- Aires acondicionados de ventana
- Aires acondicionados Split

Estos sistemas de refrigeración utilizan la compresión del gas refrigerante para generar frío al someterlo a alta y baja presión.

Este método de compresión consta de cuatro (4) elementos o componentes, ver Gráfica 1:

- Compresor
- Válvula de expansión
- Condensador
- Evaporador.

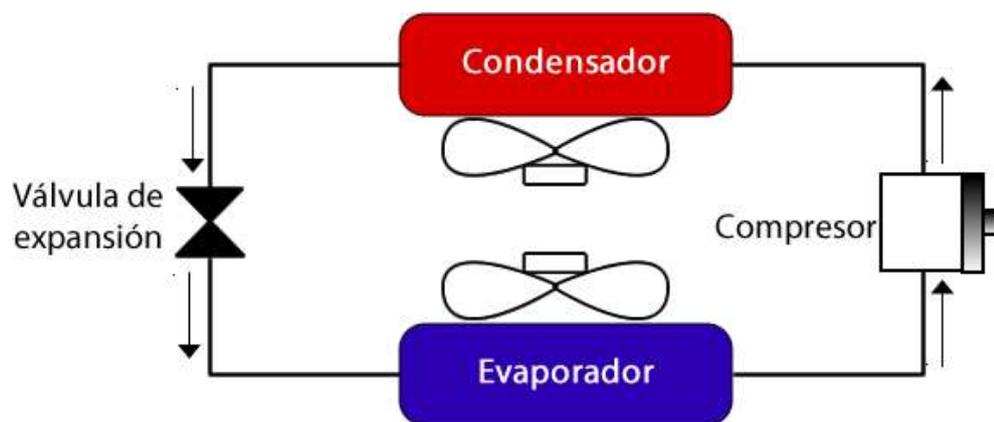
Compresor: comprime el vapor refrigerante a una alta presión, elevando su temperatura en el proceso.

Condensador: en el que el aire o el enfriamiento con agua reducen la temperatura del refrigerante lo suficiente como para que se condense en refrigerante líquido y abandone su calor latente de evaporación. El calor latente de evaporación es el calor requerido para convertir un líquido en vapor a una temperatura y presión

particulares y es el calor liberado cuando un vapor se condensa a una temperatura y presión particulares.

Válvula de expansión: que permite que una cantidad controlada del refrigerante líquido fluya a través de la sección de baja presión del circuito.

Evaporador: en el que el aire o el agua calienta el refrigerante líquido para que se evapore (ebullición) de nuevo en un vapor, ya que absorbe su calor latente de evaporación.” [10, pp. 75-76]



Gráfica 1. Elementos de refrigeración por compresión.

Los aires acondicionados split y de ventana según el control que se le haga al compresor se pueden clasificar en:

- Inverter
- No inverter

En los aires acondicionados “no inverter” el compresor funciona a su máxima potencia mientras no se haya alcanzado la temperatura deseada, cuando se logra la temperatura deseada el compresor se apaga, y nuevamente cuando la temperatura baja del nivel deseado el compresor se enciende nuevamente.

En los aires acondicionados “inverter” al compresor se le regula la potencia mediante un regulador de frecuencia, el compresor es regulado de tal forma que siempre se mantenga la temperatura sin necesidad de estar apagando y prendiendo el compresor, lo cual conlleva a gastos de energía.

En el mercado se pueden encontrar variadas marcas de aires acondicionados, por ejemplo:

- LG
- Samsung
- ComfortStart

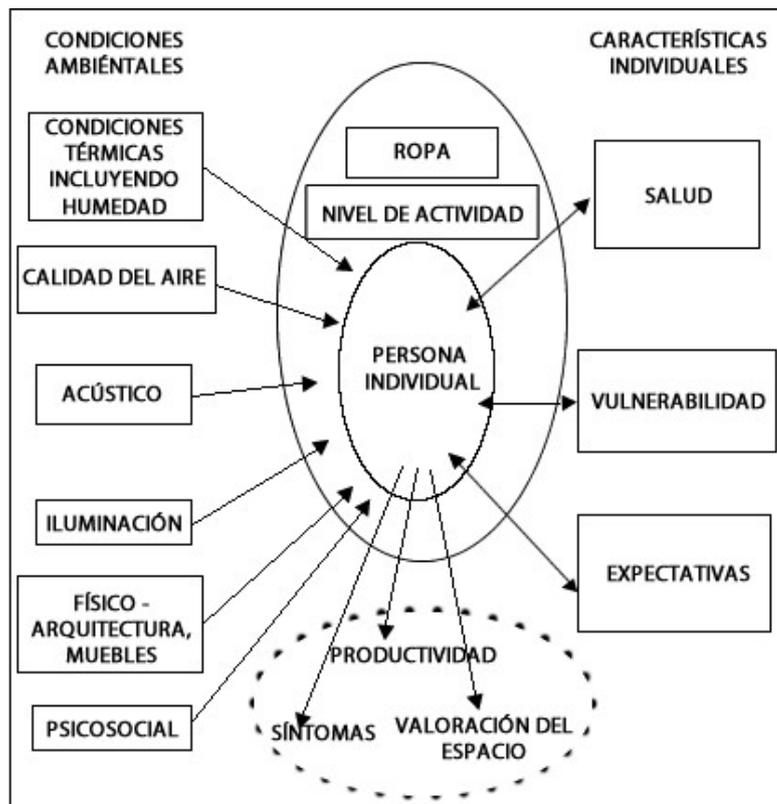
- Carrier
- Panasonic
- York

Donde cada marca implementa su propia tecnología en su control electrónico. Normalmente los sistemas de aires acondicionados Split y de ventana tienen un “control remoto” para encender, apagar y configurar el aire acondicionado. El control remoto a través de señales infrarrojas envía los comandos al receptor del aire.

Los comandos que se envían a través de la señal infrarroja van codificados y cada empresa o cada marca eligen su codificación. Por ejemplo, pueden usar codificación NEC, RC5, RC6 o propia del fabricante.

2.2 CONFORT

Existe una variedad de factores que influyen en la comodidad de un individuo para sentirse cómodamente en un lugar o zona con o sin climatización. Ver Gráfica 2, donde se observan simplificada los tres grupos principales de factores que afectan a la comodidad.



Gráfica 2. Modelo de entorno personal. Fuente: Fundamentals of HVAC [10, p. 3]

En el anterior diagrama se identifican [10, p. 6]:

- Atributos del espacio - a la izquierda
- Características de la persona - a la derecha
- Prendas de vestir y la actividad del individuo - alto centro

Para predecir o saber si hay confort térmico en la edificación en estudio se utilizó la herramienta de “Confort Térmico CBE por ASHRAE 55” [11].

Donde se ingresan los parámetros:

- Seleccionar el modelo de confort térmico a utilizar El modelo estático (PMV / PPD) y el modelo adaptativo.
- Se puede escoger en utilizar la temperatura operativa (es igual a la media aritmética entre la temperatura radiante media y la temperatura seca) o ingresar la temperatura del aire y la temperatura media radiante.
- Velocidad del aire
- Humedad
- Tasa metabólica
- Nivel de ropa

2.3 USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

Es la utilización de la energía, de tal manera que se obtenga la mayor eficiencia energética, bien sea de una forma original de la energía y/o durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución y consumo de las diferentes formas de la misma, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad, vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables. (Ley 697 DE 2001, Artículo 3, definición Uso eficiente de la energía)

$$\eta = \frac{P_{out}[W]}{P_{in}[W]}$$

Para lograr un máximo de eficiencia energética se debe tener en cuenta:

- Energía consumida realmente (entrada)
- La energía que se desperdicia (perdidas)
- La energía útil (Salida)

Teniendo en cuenta lo anterior se puede:

- Consumir la energía que se necesita realmente en los tiempos requeridos.

- Disminuir las pérdidas por tiempo de los aparatos electrónicos, la forma en que se utilizan y aumentar la eficiencia de cada uno de ellos. En caso más crítico, cambiar de tecnología.
- Y caracterizar el sistema teóricamente, para analizar la forma óptima en que se pueden hacer las mismas funciones con lo que se tiene.

La energía eléctrica consumida se calcula de la siguiente forma:

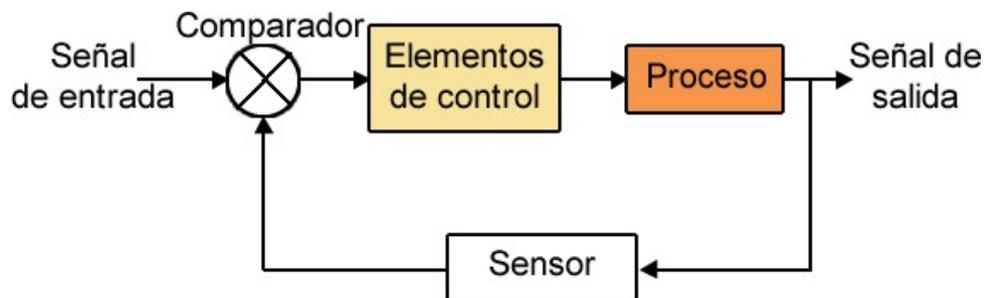
(CONSUMO en kWh) = (Potencia eléctrica en kW) X (Tiempo de utilización en horas)

2.4 CONTROL

Normalmente para describir un problema de automatización industrial se utilizan bloques, donde se representa de forma abstracta elementos del sistema físico, con sus señales de entrada salidas y perturbaciones.

Un sistema de control consta de los siguientes elementos:

- Planta o proceso (sistema a controlar).
- Actuador (dispositivo físico que efectúa la acción de control).
- Sensor (utilizados para medir la señal a controlar)
- Controlador (dispositivo que efectúa el cálculo o proceso para que la salida sea la deseada.).
- Señales de entrada, salida y perturbaciones.



Gráfica 3. Lazo de control cerrado.

La representación del sistema en bloques puede obedecer a las siguientes configuraciones: sistema en lazo cerrado o sistema en lazo abierto.

“Sistemas de control en lazo cerrado (Ver Gráfica 3). Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la

señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

Sistemas de control en lazo abierto. Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada” [12].

3. ARQUITECTURA DE HADWARE Y SOFTWARE

Nissi Energy es el nombre de la plataforma de Hardware y Software diseñada para alcanzar el objetivo de la presente tesis. La plataforma es para monitorear y controlar la energía consumida por los aires acondicionados mini Split o de ventana que han sido instalados a medida que la edificación va demandando más zonas de confort.

En general hay tres puntos principales que gobiernan la plataforma Nissi Energy:

- Red y protocolos de comunicación entre los dispositivos.
- Hardware para el monitoreo y control
- Software para el monitoreo y control

Cada uno de estos puntos van relacionados y son cruciales para definir la arquitectura, es decir, el hardware puede limitar y condicionar la forma de programación, tanto como el software puede demandar del hardware mucho más rendimiento, y la comunicación le exigirá al hardware y al software estabilidad y rendimiento.

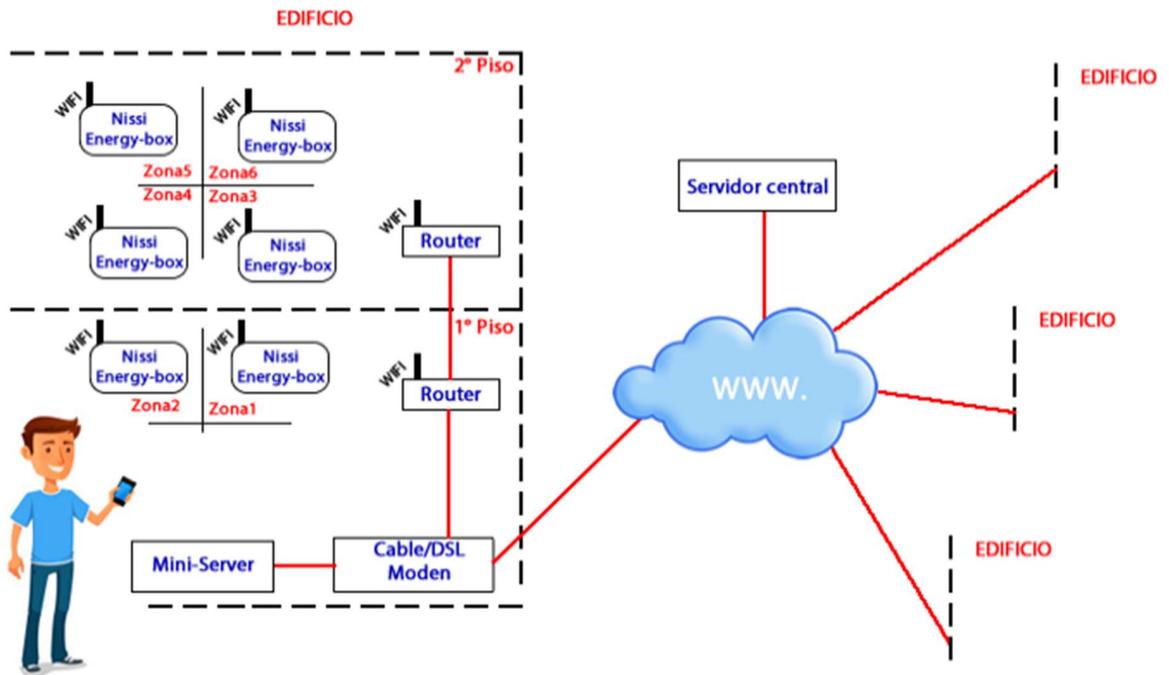
3.1 ARQUITECTURA DE HADWARE

La arquitectura de Hardware conforma una red de dispositivos que se interconectan a través de una red Ethernet para brindar los servicios de monitoreo y control.

Los dispositivos de hardware son:

- Servidor central
- Mini server
- Cable/DSL modem
- Router
- Nissi energy – box
- Dispositivos móviles o computadores de acceso.

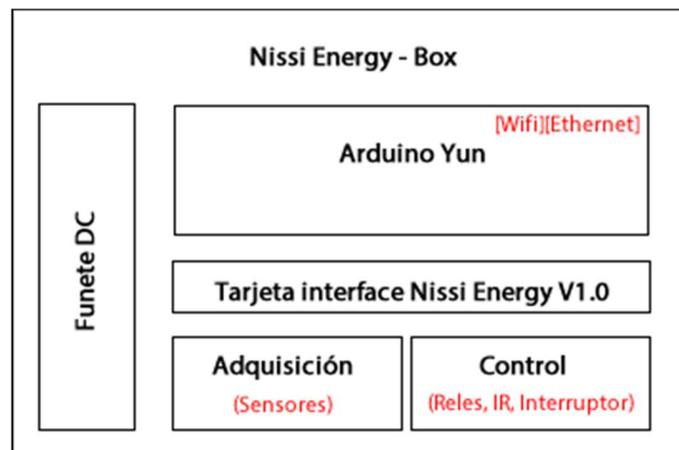
En la Gráfica 4 se observa que hay un “servidor central”, el cual es el que proporciona los servicios en la “nube”, para tener acceso desde Internet. El miniserver proporciona servicios o funciones locales (Intranet), el módem es el elemento de comunicación principal que da acceso a Internet, el router se utiliza para expandir la red inalámbrica a aquellas zonas de difícil conexión, el dispositivo “Nissi Energy-Box” es quien hace las funciones de captura de datos y control por lo que cabe resaltar que su comunicación puede ser cableada o inalámbrica, y por último los dispositivos móviles o computadores de acceso son los que están de lado del cliente, ellos se conectan al software y disfrutan de las prestaciones de la plataforma.



Gráfica 4. Diagrama de arquitectura de red Nissi Energy.

Nissi Energy – Box es el dispositivo principal de captura de datos y control. El cual está conformado como se muestra en la Gráfica 5, por los siguientes componentes:

- Arduino Yun.
- Fuente DC.
- Tarjeta interface Nisi Energy V1.0
- Adquisición (Sensores).
- Control (Reles, IR, Interruptor).



Gráfica 5. Arquitectura hardware Nissi Energy Box.

3.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE

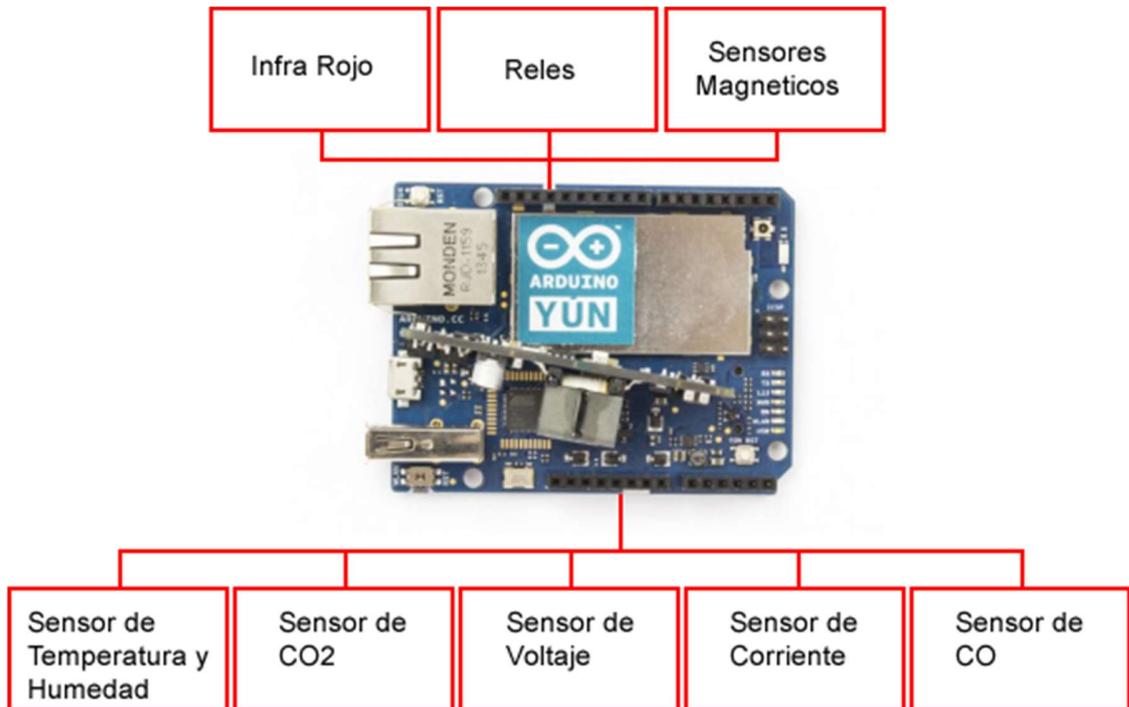
En la implementación del hardware se describe el dispositivo principal “Nissi Energy -box” (Ver Gráfica 6) en detalle, como se mencionó anteriormente, el cual consta de:

- Arduino Yun.
- Fuente DC.
- Tarjeta interface Nisi Energy V1.0
- Adquisición (Sensoreses).
- Control (Reles, IR, Interruptor).



Gráfica 6. Nissi Energy Box.

EL Arduino Yun es una board basada en los microcontroladores ATmega32u4 y el Atheros AR933. El procesador Atheros compatible con una distribución Linux basada en OpenWrt llamado OpenWrt-Yun. Las características más relevantes por las que fue escogida la board dentro del proyecto fueron, por su conectividad WiFi y las prestaciones que ofrece su sistema operativo para conectarse a la red Ethernet. Además, sus puertos de entrada y salida son suficientes para las conexiones de los sensores y señales de control.



Gráfica 7. Conexiones sujetas al Arduino Yun.

Los requerimientos del sistema para el monitoreo y control son:

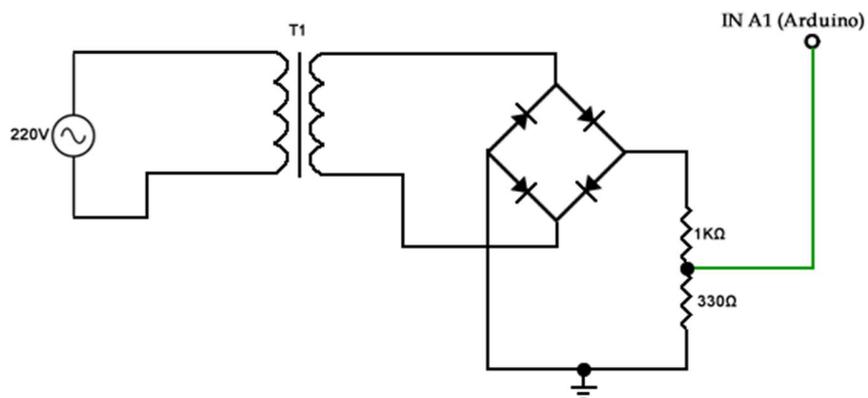
- Medir temperatura
- Medir humedad
- Medir CO₂
- Medir CO
- Medir voltaje
- Medir corriente
- Medir potencia
- Controlar tres relés de 5Vdc a 120Vac
- Controlar Infrarrojo para el control de aires
- Medir estado de los sensores magnéticos
- Almacenar el histórico de las mediciones tomando en cuenta el tiempo
- Permitir comunicación para acceder al histórico remotamente
- Permitir comunicación para que a través de comandos se ejecuten las funciones de control.

Para cumplir con los requerimientos de medición y control se diseñaron los siguientes circuitos:

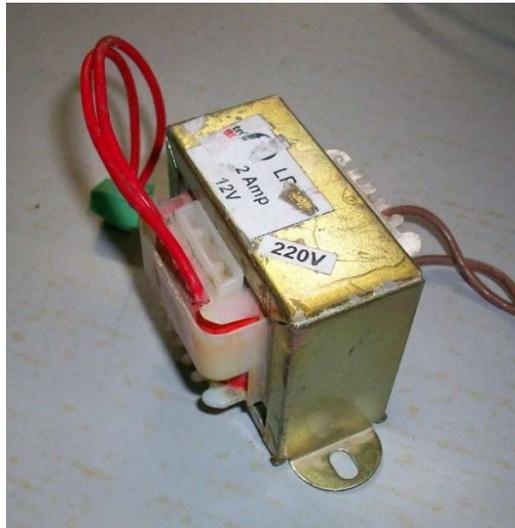
- Circuito para medir voltaje
- Circuito para medir corriente
- Circuito para conectar los sensores de temperatura y humedad, CO₂ y CO.

- Circuito para controlar los relés
- Circuito para el Infrarrojo
- Circuito para medir los sensores magnéticos.
- Circuito de la fuente DC

El circuito para medir voltaje, es un rectificador de onda completa (utilizado para facilitar el ajuste del offset) ver Gráfica 8, con un divisor de tensión para ajustar la señal a la entrada del Arduino Yun. La onda rectificada es la salida o secundario del transformador de 220 Vac a 12 Vac.



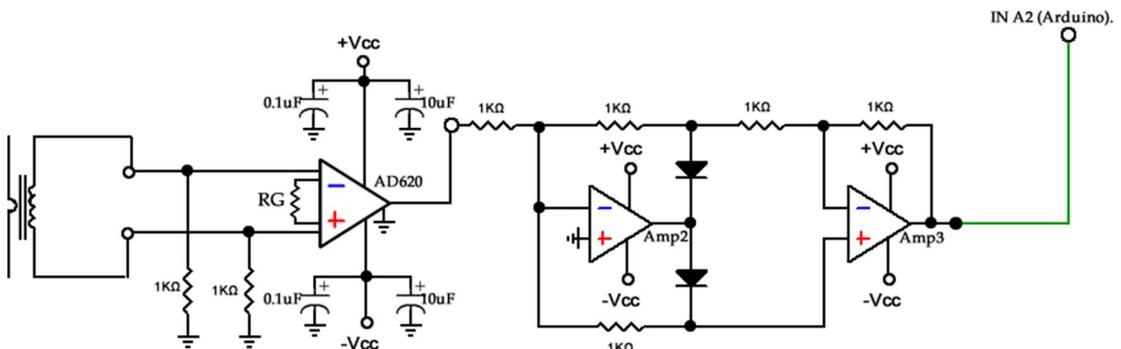
Gráfica 8. Rectificador de onda completa seguido de un divisor de tensión.



Gráfica 9. Transformador de 220Vac/12Vac.

Las razones para utilizar el transformador de 220Vac/12Vac (Ver Gráfica 9) son: primero, porque los aires acondicionados que se están midiendo, la mayoría son a 220 Vac; y segundo, porque se aisló eléctricamente el circuito.

El circuito para medir corriente es un amplificador diferencial con un amplificador de instrumentación AD620AR (Ver Gráfica 10), ajustado para amplificar la señal del sensor de corriente no invasivo SCT013 30A/1V, (Ver Gráfica 11), seguido de un rectificador de onda completa con amplificadores operacionales o de precisión, utilizado para pequeñas señales.



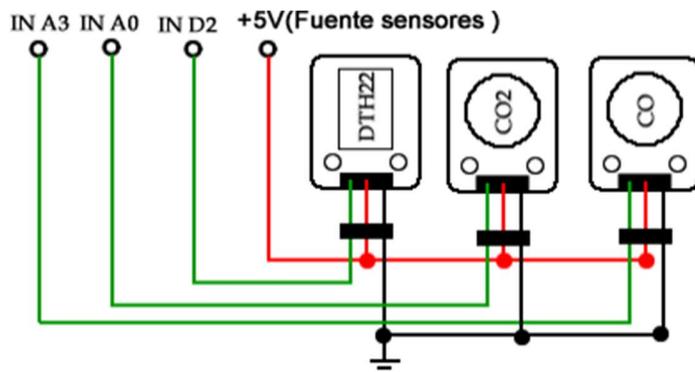
Gráfica 10. Amplificador diferencial con AD620AR seguido de un rectificador de onda completa con amplificadores operacionales MC45588A.



Gráfica 11. Sensores de corriente no invasivo SCT013.

El circuito para conectar los sensores de temperatura y humedad, CO2 y CO, ver Gráfica 12. Es muy importante resaltar que su alimentación proviene de un regulador independiente de la fuente DC.

En las primeras pruebas que se realizaron la alimentación de los sensores no era muy estable, porque con una sola fuente se alimentaban todos los componentes y hubo problemas con la medición (El sensor de CO2 no lograba encender y al Arduino Yun también tenía problemas, se quedaba sin iniciar).



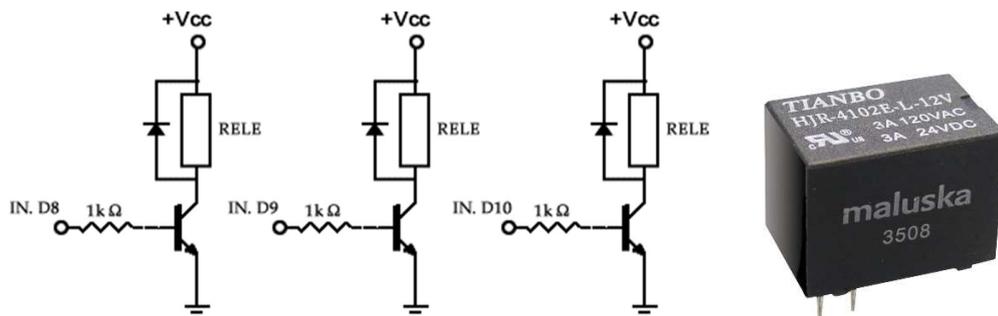
Gráfica 12. Circuito conexión de sensores de temperatura y humedad, CO2 y CO.

Nota: los sensores de “temperatura y humedad”, CO2 y CO fueron escogidos de la empresa DFRobot.com, ver Gráfica 13.



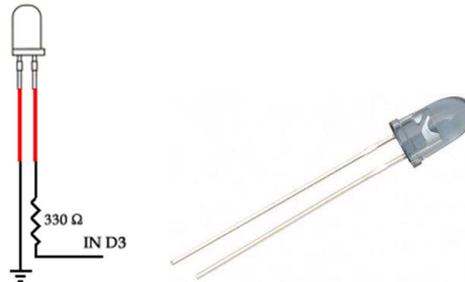
Gráfica 13. DHT22 Temperature & Humidity Sensores V2, CO2 Sensores V1.2 y MQ7Gas Sensores V2.

El circuito para controlar los relés HJR-4102-L-05V, soporta 3A a 120 Vac (ver la Gráfica 14), que son los que van hacer control on/off de los focos y abanicos o dispositivos eléctricos, en él se encuentra un diodo de protección o anti-retorno para proteger el transistor. El transistor es para la activación, el cual trabaja en conmutación (puede pasar de corte a saturación, dependiendo de la corriente de base).



Gráfica 14. Circuito para controlar los relees HJR-4102-L-05V.

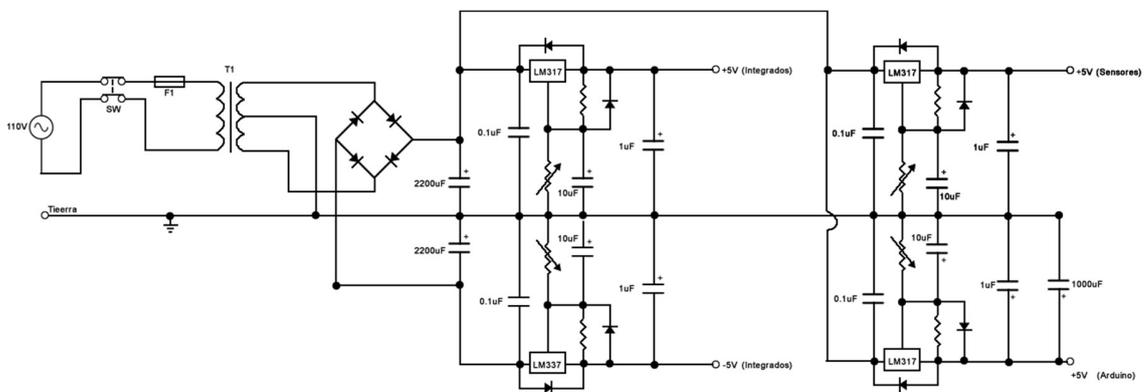
El circuito para el Infrarrojo consta de LED emisor y una resistencia para disminuir la tensión o potencia al led, ver Gráfica 15. El objetivo de éste es reenviar la señal infrarrojo a los aires acondicionados. En tal caso, la salida del Arduino Yun es configurada como PWM y a través de programación se le envía el código correspondiente.



Gráfica 15. Circuito para transmitir con el infrarrojo.

El circuito para medir los sensores magnéticos, tienen el objetivo de detectar ventanas abiertas y puertas.

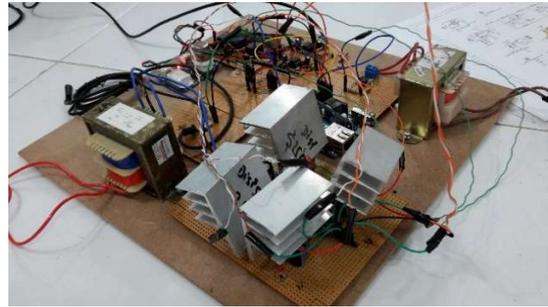
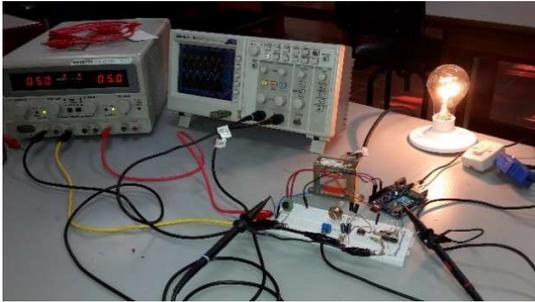
El circuito de la fuente DC lineal regulada, consta de 4 reguladores, dos de ellos para los integrados que manejan voltajes de entrada de 5Vdc y -5Vdc; uno para los sensores y el otro para el Arduino Yun, ver Gráfica 16.



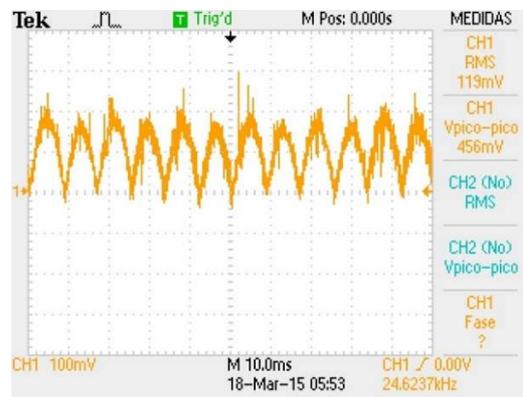
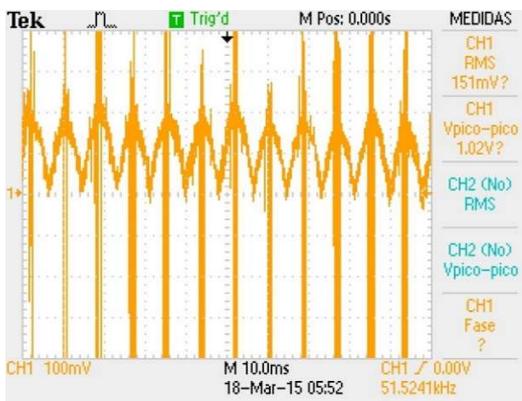
Gráfica 16. Circuito fuente lineal, especial para Nissi Energy Box.

Con el objetivo de disminuir las señales de ruidos se creó una tarjeta de interface "Nissi Energy V1.0" y una fuente DC (Lineal regulada).

Las primeras prácticas fueron realizadas en protoboards y luego en placas universales (ver Gráfica 17). En estas pruebas se encontraron señales con ruido, ver Gráfica 18.

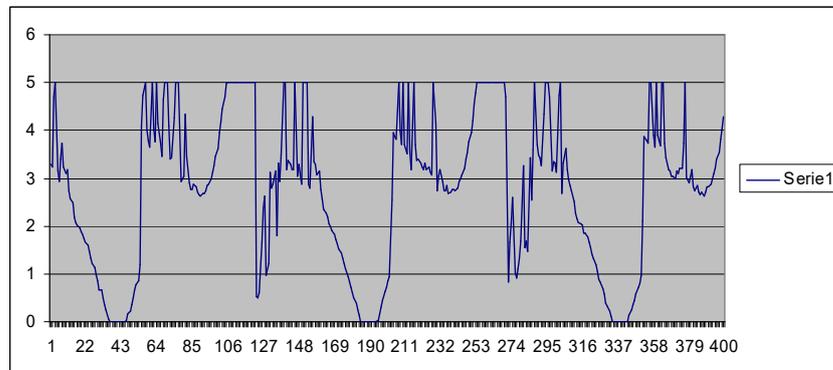


Gráfica 17. Prácticas en laboratorios con protoboard y tarjetas universales.

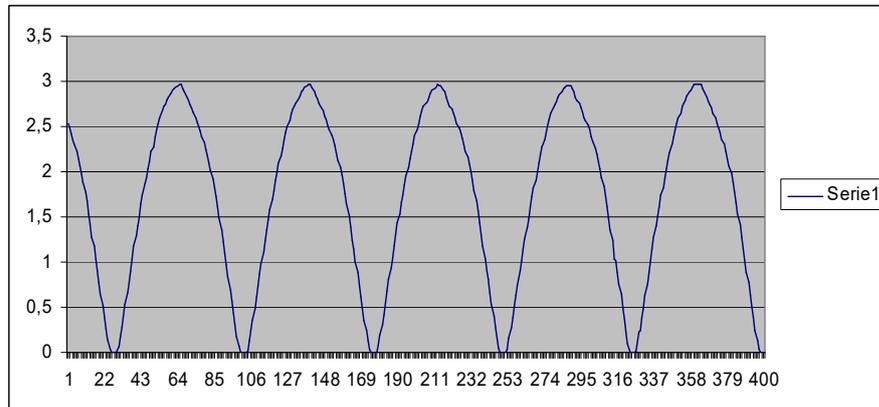


Gráfica 18. Señal de ruido obtenida en laboratorio con el osciloscopio Tektronix TDS 2002C.

La Gráfica 19 muestra cómo el Arduino Yun lee la señal con ruido cuando intervienen varios circuitos conectados en la misma protoboard, dejando notar que con el ruido no se pueden hacer buenas medidas. La Gráfica 20 muestra cómo el Arduino Yun lee una señal sin ruidos desde la protoboard, activando solo el circuito para medir voltaje.



Gráfica 19. Señal de ruido obtenida en las protoboard, se conectaron los demás circuitos, medida con el Arduino Yun.



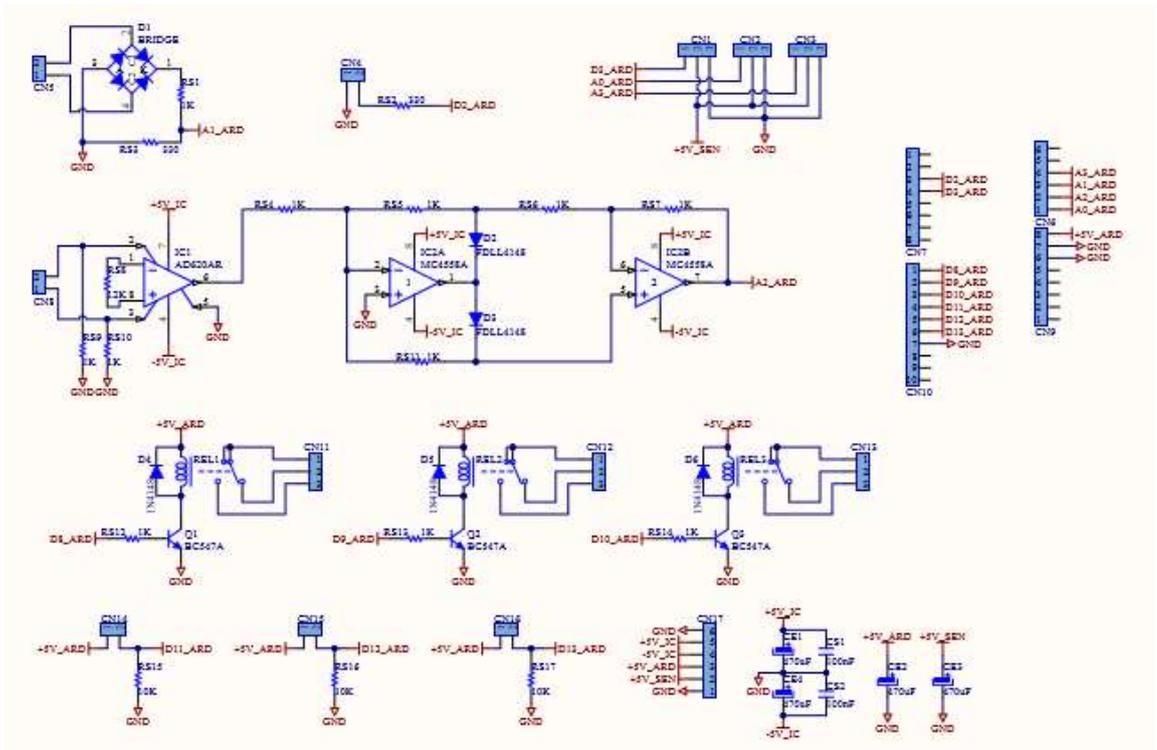
Gráfica 20. Señal sin ruido obtenida en las protoboard, solo se conectó para medir voltaje, medida con el Arduino.

La implementación final se llevó acabo en PCB:

- Tarjeta de interface “Nissi Energy v 1.0”, diseñada en doble capa y componentes superficiales.
- Fuente DC lineal regulada, diseñada en una capa con componentes normales.

La Tarjeta de interface “Nissi Energy v 1.0” consta de los siguientes circuitos, Gráfica 21:

- Circuito rectificador y divisor de tención para medir voltaje
- Circuito diferencial y rectificador de onda completa
- Circuito para los relés
- Circuito para los sensores
- Circuito para los sensores magnéticos
- Circuito para el trasmisor infrarrojo



Gráfica 21. Esquema eléctrico tarjeta interfaz Nissi Energy Box.



Gráfica 22. Tarjeta de interfaz Nissi Energy V 1.0

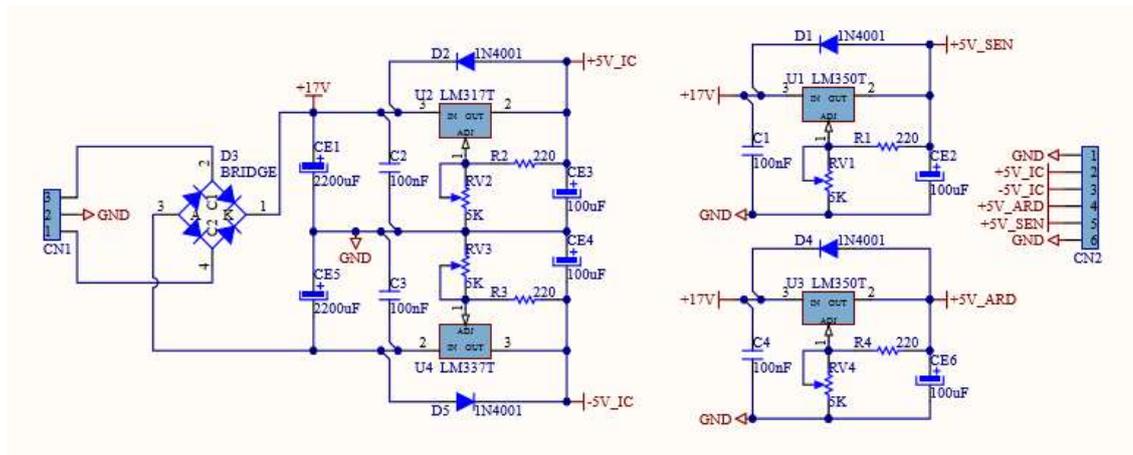
Una de las características de la tarjeta interface de Nissi Energy es que fue diseñada para que encaje justamente con el Arduino Yun, ver Gráfica 22 y Gráfica 23.



Gráfica 23. Tarjeta interfaz Nissi Energy V. 1.0 conectada con el Arduino Yun.

Fuente DC regulada consta de (Gráfica 24 y Gráfica 25):

- Dos reguladores para la alimentación de los integrados 5 y -5
- Un regulador para los sensores.
- Un regulador para el Arduino Yun



Gráfica 24. Esquema eléctrico de la fuente lineal regulada.

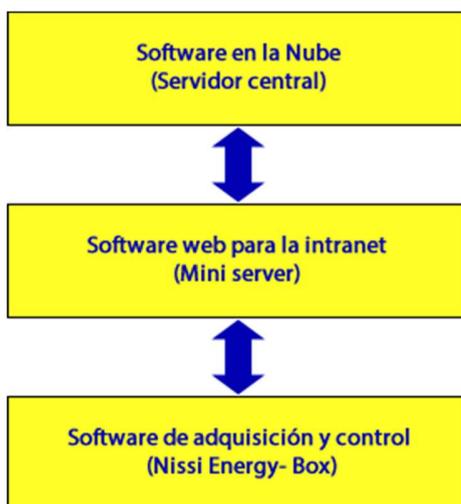


Gráfica 25. Fuente lineal regulada.

3.3 ARQUITECTURA DE SOFTWARE

La arquitectura de software consta de tres aplicaciones principalmente

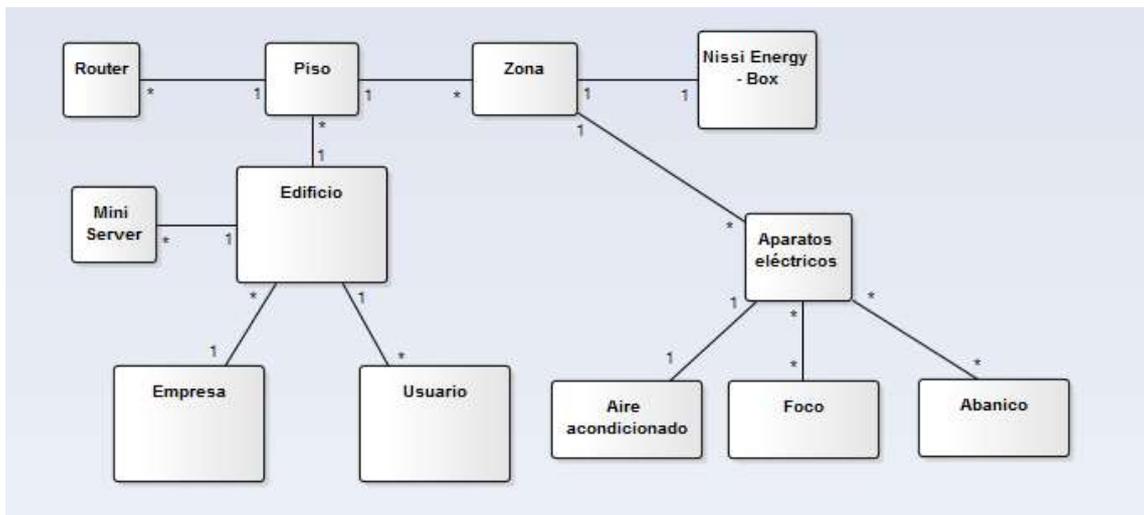
1. Software en la nube
2. Software web para la intranet
3. Software de adquisición y control “Nissi Energy- Box” indispensable para el procesamiento de los datos y el control.



Gráfica 26. Softwares principales Nissi Energy.

3.4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE

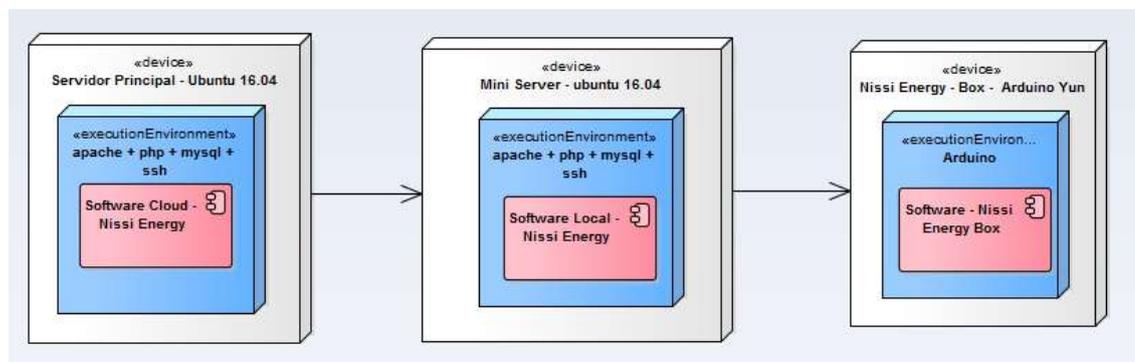
Iniciando con el modelo de dominio o conceptual, se observa que por cada empresa registrada al software Nissi Energy, hay varios edificios asociados a ella y cada edificio tiene asociado varios usuarios, que en el programa se le asignan roles. Por cada edificio se tiene asociado un dispositivo Mini Server. Los Router son asignados a cada piso y dependen del alcance de la conectividad que se necesite. Cada zona tiene asociada un dispositivo Nissi Energy-Box. Y el dispositivo Nissi Energy – Box monitorea controla los aparatos eléctricos asociados a cada zona ver Gráfica 27.



Gráfica 27. Diagrama de modelo de dominio.

En general, son tres programas que se desarrollan para hacer efectiva las funciones de monitoreo y control (ver Gráfica 28):

- Software Cloud – Nissi Energy.
- Software local o intranet – Nissi Energy.
- Software Nissi Energy Box (Arduino)



Gráfica 28. Diagrama de despliegue.

En el diagrama de despliegue se muestra que en los dispositivos Servidor Principal y Mini Server están ejecutándose bajo el sistema Operativo Ubuntu 16.04, y su entorno de ejecución es un servidor Apache + PHP + MySQL + SSH.

En el servidor central “Software cloud- Nissi Energy” y Mini Server los requisitos funcionales se muestran en la Gráfica 29.



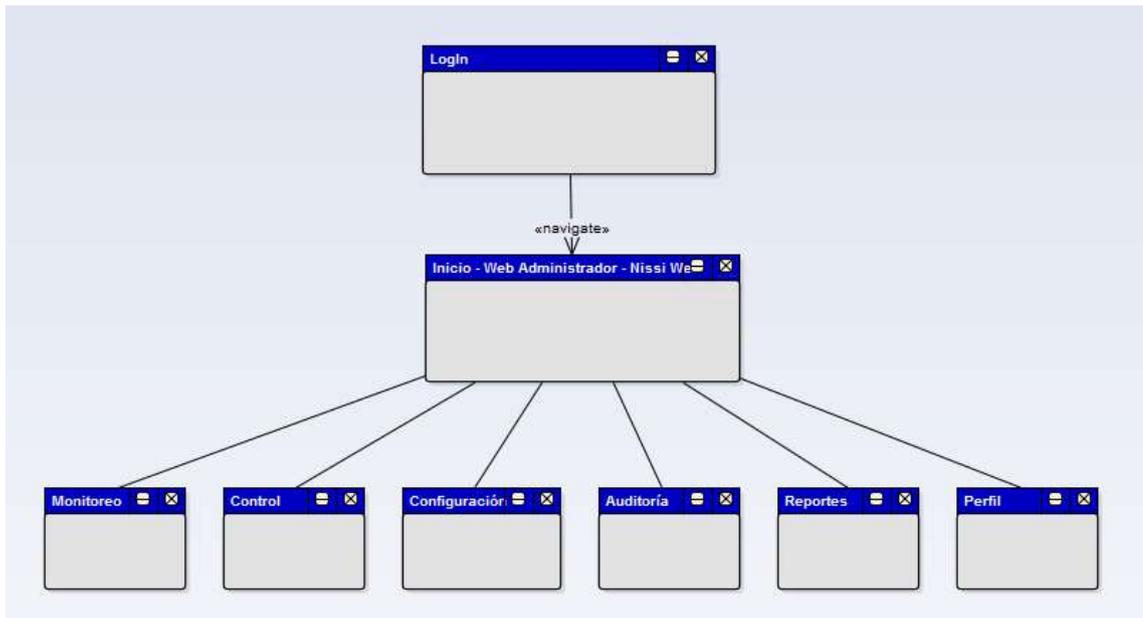
Gráfica 29. Requisitos funcionales del sistema.

Requisitos funcionales del sistema:

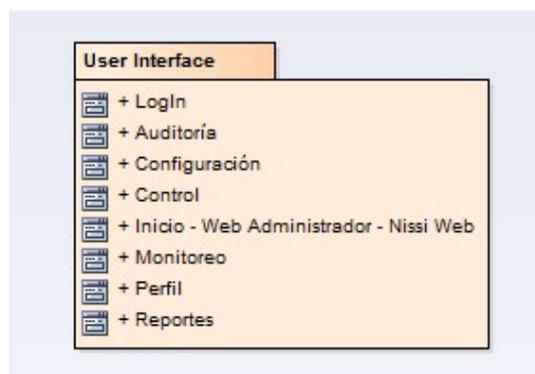
- Interface web y control de acceso
 - Inicio
 - Empresa
 - Contacto
 - Inicio de sesión
- Configuración del sistema
 - Administrar usuario.
 - Registro de edificio.
 - Configuración de zonas.
 - Configuración de red.
- Monitoreo
 - Potencia consumida.
 - Voltaje
 - Corriente
 - Humedad
 - Temperatura
 - CO2
 - CO
- Control
 - Aires acondicionados
 - Luces

- Abanicos
- Otros

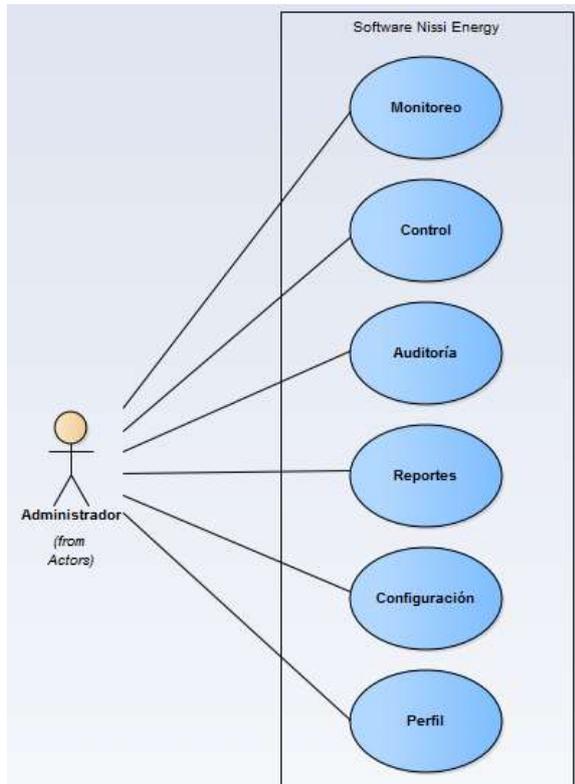
La interface de usuarios es controlada dependiendo del rol del usuario, ver Gráfica 30 y Gráfica 31, interfaces de usuarios, y lo casos de usos ver Gráfica 32, Gráfica 33 y Gráfica 34.



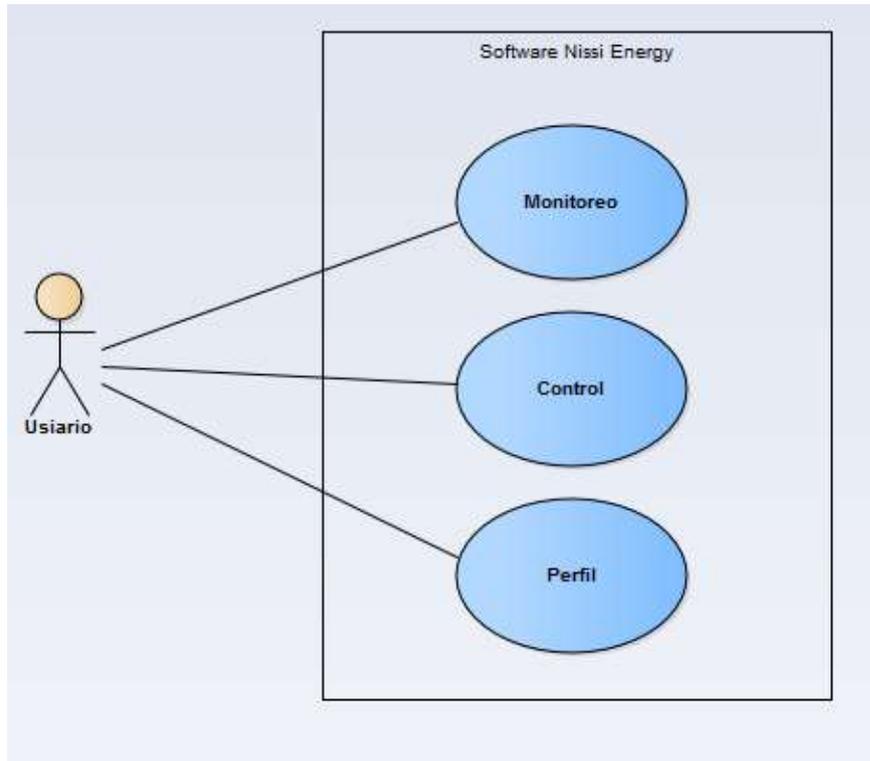
Gráfica 30. Diagrama de interfaces de usuario.



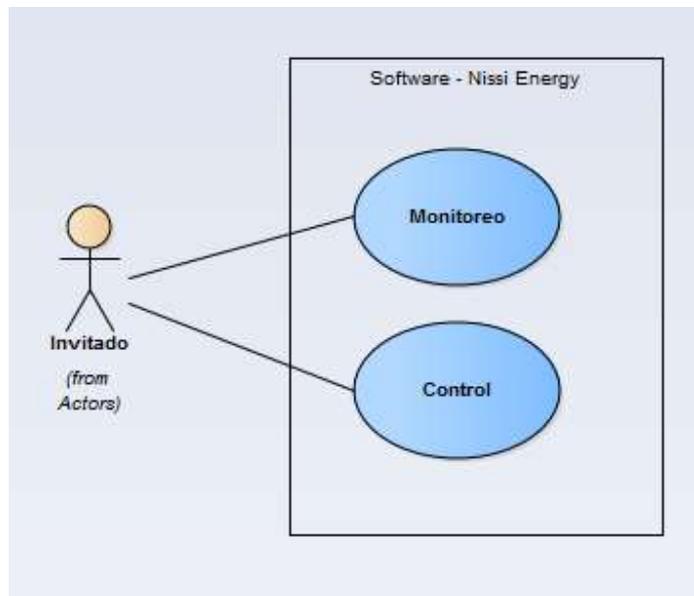
Gráfica 31. Interfaces de usuario.



Gráfica 32. Diagrama caso de uso administrar plataforma.

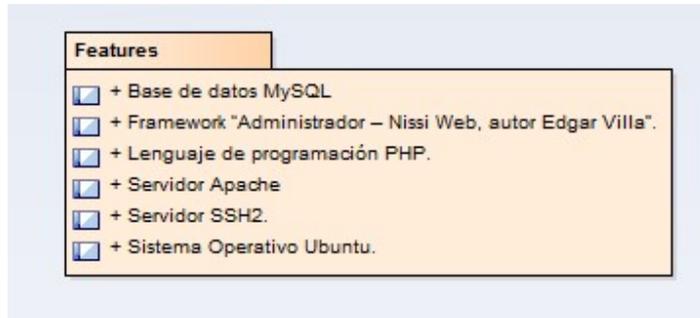


Gráfica 33. Diagrama caso de uso acciones de usuario recurrente.



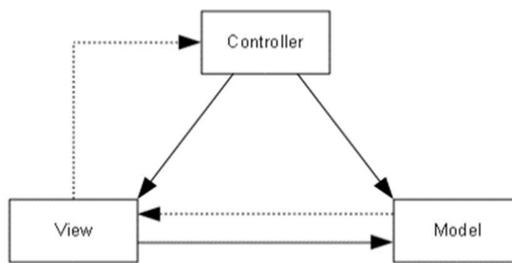
Gráfica 34. Diagrama caso de uso acciones de usuario temporal.

En las características del sistema (Gráfica 35), se resalta la utilización del framework “Administrador - Nissi Web”, autor Edgar Villa.



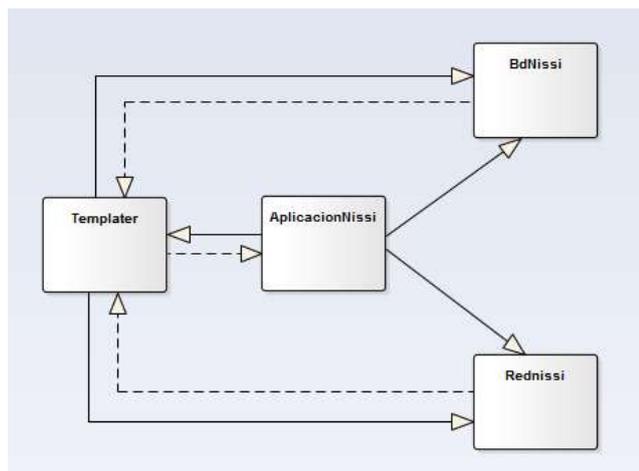
Gráfica 35. Características del sistema.

El framework “Administrador - Nissi Web” en su diagrama de clases normalmente se utiliza el modelo MVC (Ver Gráfica 36).

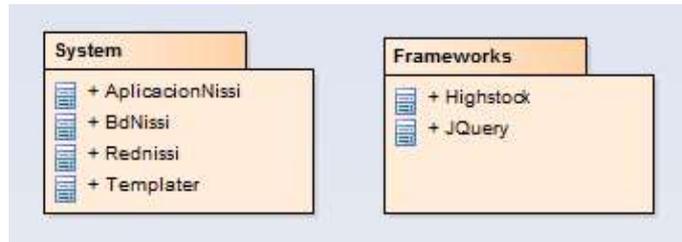


Gráfica 36. Modelo de Vista Controlador MVC.

La clase controlador, se tiene con el nombre “aplicacionnissi”, la clase modelo se llama “bdnissi”, y la clase vista “Templater”. Solo hay una pequeña diferencia y es que es necesario implementar una clase para la comunicación que se encargará de la adquisición de datos y control del sistema que denominamos “rednissi” (ver Gráfica 37).



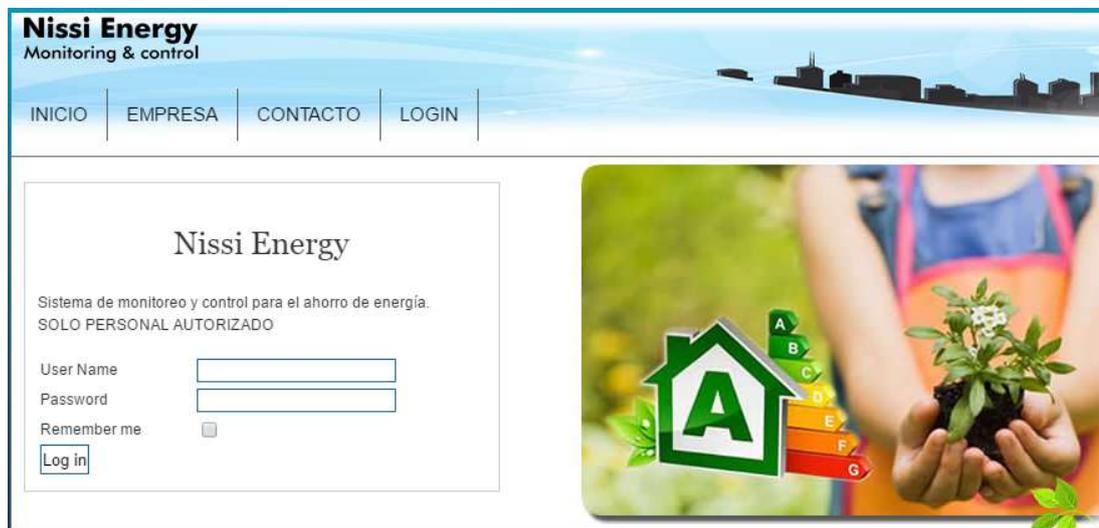
Gráfica 37. Diagrama modelo de clases.



Gráfica 38. Clases principales del sistema y framework externos utilizados.

INTERFACES IMPLEMENTADAS

La interface de usuario Login (Gráfica 39) en ella se controla el acceso de los usuarios.



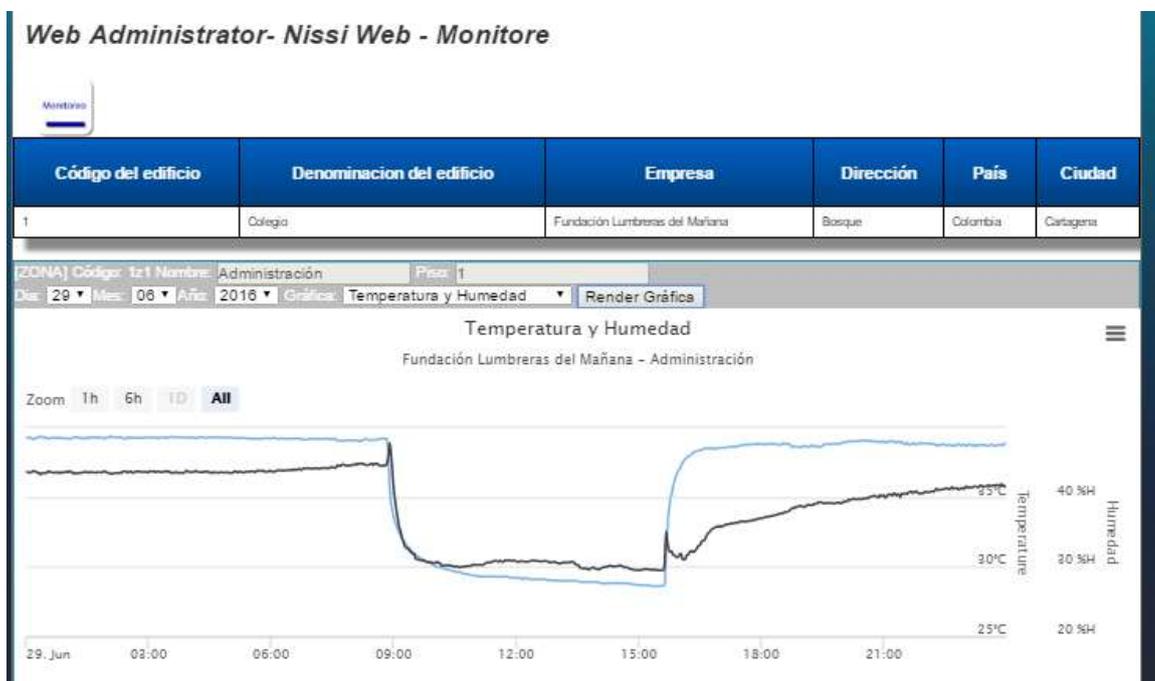
Gráfica 39. Login.

Según el tipo de usuario se muestra en el menú las acciones o vínculos a los que se tiene permiso.



Gráfica 40. Menú.

La interface de monitoreo permite escoger la variable a monitorear según la zona. (ver Gráfica 41).



Gráfica 41. Monitoreo.

La interface de control permite apagar y encender el electrodoméstico según la zona (Ver Gráfica 42).

Web Administrator- Nissi Web - Control

INICIO

Código del edificio	Denominación del edificio	Empresa	Dirección	País	Ciudad
2	Casa	Edgar Villa	Urb. Gol Mz. 6 Lt. 7	Colombia	Cartagena

[ZONA] Código: 2z11 Nombre: Comedor y Sala Piso: 1

Código Artefacto eléctrico	Marca	Modelo	Descripción	On/Off
2z11e1	Lampara	Generica	Lampara comedor	<input checked="" type="checkbox"/>
2z11e2	Filamento	Generica	Filamento comedor y sala	<input checked="" type="checkbox"/>
2z11e3	Lampara	Generica	Lampara sala	<input type="checkbox"/>

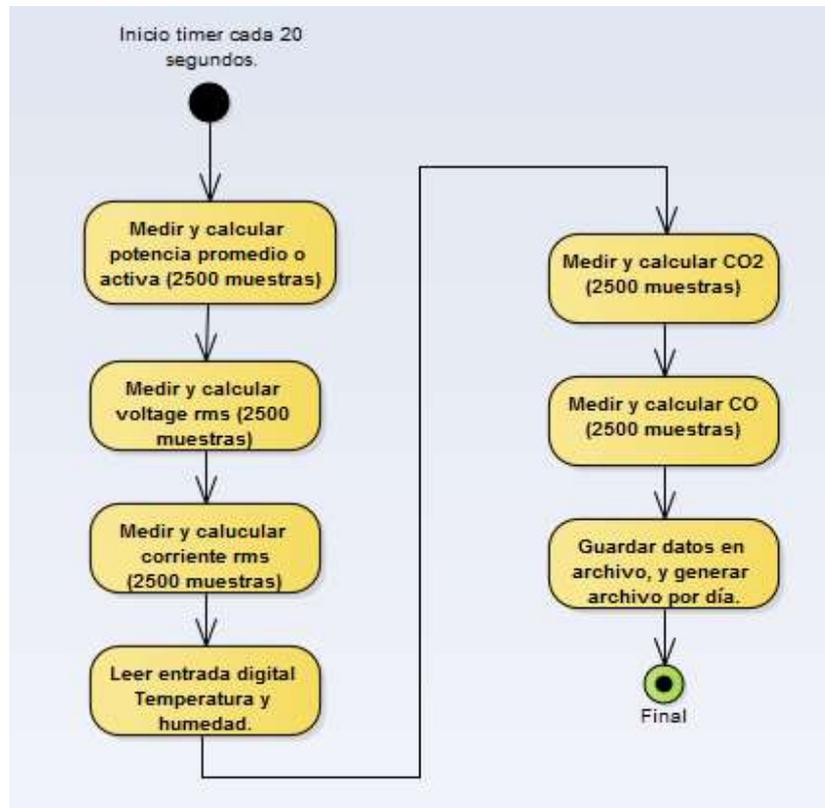
Gráfica 42. Control.

NISSI ENERGY – BOX

Contiene la interface de software que interactúa con los sensores y también la interface de control.

- Algoritmos de medición
- Algoritmos de comunicación
- Algoritmos de procesamiento y almacenamiento
- Algoritmos de control (Local y remota)

La ejecución de la captura de datos se realiza cada 20 segundos a través de una función “timer” función incluida en el Arduino Yun.



Gráfica 43. Diagrama de flujo proceso realizado en el “Timer del Arduino Yun” cada 20 segundos.

4. DESPLIEGUE DE LA SOLUCIÓN: CASO DE ESTUDIO

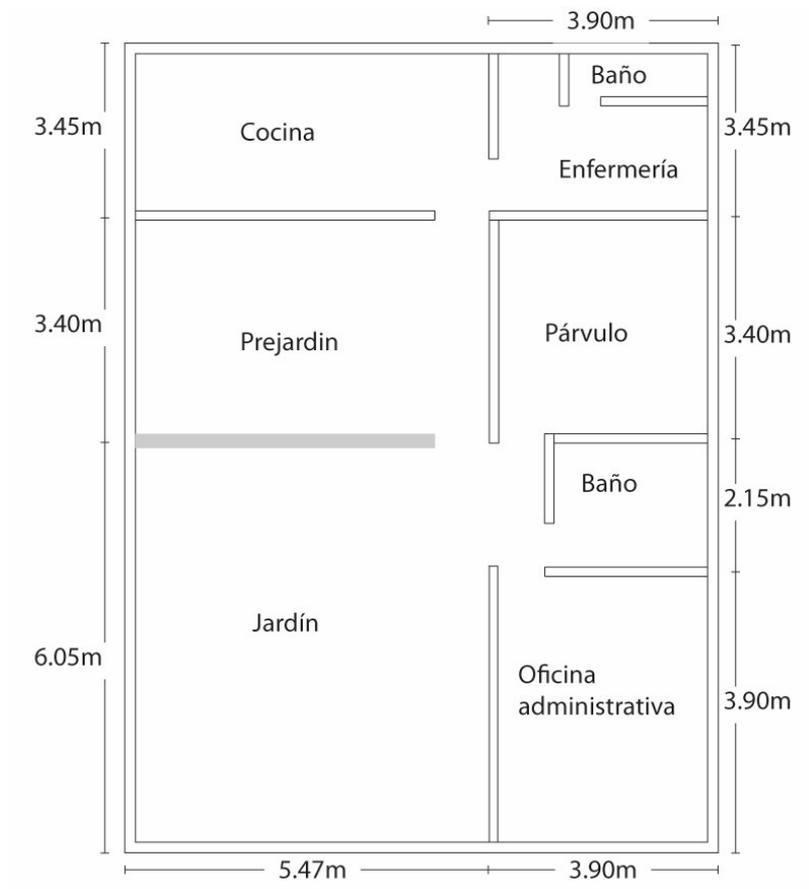
En la implementación como prototipo experimental se tiene el siguiente escenario:

- “Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana” donde se monitorearon 4 zonas, se tiene un router principal en el cual no se tiene acceso a su configuración, y se colocó un router para amplificar la red wifi en el segundo piso. En tal caso, se colocó 1 dispositivo “Nissi Energy box” en el primer piso conectado al router principal, 3 dispositivos “Nissi Energy box” en el segundo piso. Un servidor local o intranet conectado a la red principal.
- Centro de control centralizado compuesto por un servidor principal para control de acceso desde la Web con un router donde se pueda entrar a su configuración.

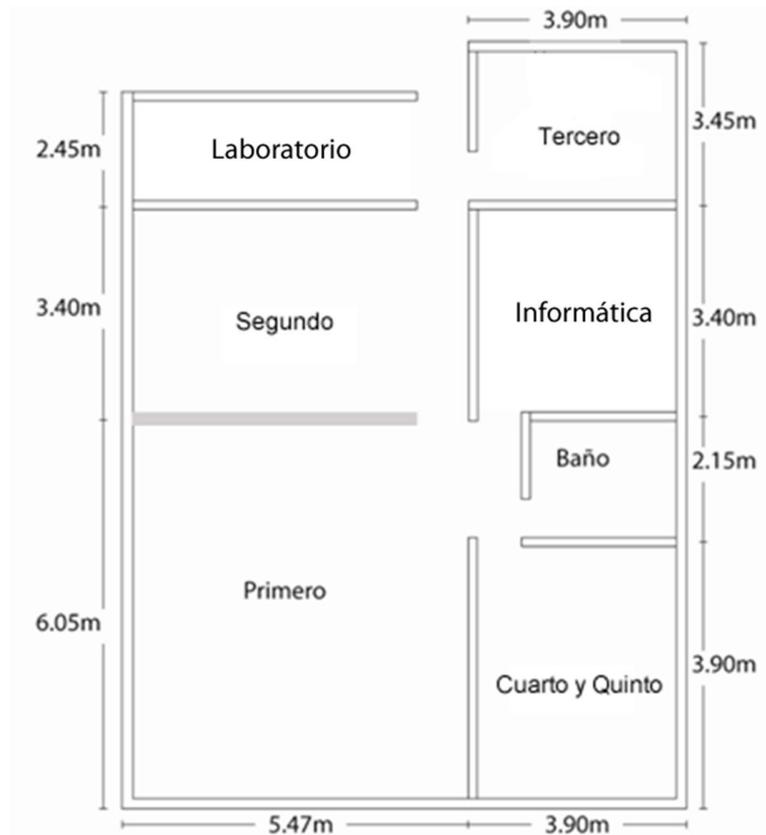
El caso de estudio donde se identifica la problemática es el “Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana”, ubicado en Cartagena – Colombia. Entidad del sector no oficial con licencia para funcionamiento del Ministerio de Educación Nacional, para preescolar y básica primaria, jornada mañana, actualmente con una población estudiantil de 190 estudiantes distribuidos en ocho salones.

4.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA INSTITUCIÓN

La necesidad existente en el “Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana” es ahorrar energía en los sistemas de aires acondicionados y mantener el confort para los estudiantes. A continuación, se muestra la distribución de dos pisos principales ver Gráfica 44 y Gráfica 45.



Gráfica 44. Primer piso Establecimiento Fundación Lumbreras del Mañana.



Gráfica 45. Segundo piso Establecimiento Fundación Lumbreras del Mañana.

Y el espacio volumétrico lo describimos en las Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Dimensiones del primer piso Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana.

Zona	Ancho (m)	Largo (m)	Alto (m)	Volumen (m ³)
Cocina	5,47	3,45	2,47	46,61
Enfermería	3,90	3,45	2,47	33,23
Prejardin	5,47	3,40	2,47	45,94
Párvulo	3,90	3,40	2,47	32,75
Jardín	5,47	6,05	2,47	81,74
Oficina administrativa	3,90	3,90	2,47	37,57

Fuente: Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana 2016 – 2017

Tabla 2. Dimensiones del segundo piso Establecimiento Fundación Lumberas del Mañana.

Zona	Ancho (m)	Largo (m)	Alto (m)	Volumen (m³)
Laboratorio	5,47	2,25	2,47	30,40
Tercero	3,90	3,45	2,47	33,23
Segundo	5,47	3,40	2,47	45,94
Primero	5,47	6,05	2,47	81,74
Cuarto y quinto	3,90	3,90	2,47	37,57
Informática	3,90	3,40	2,47	32,75

Fuente: Establecimiento Educativo Fundación Lumberas del Mañana 2016 - 2017

La población estudiantil está distribuida como se muestran en las Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 3. Número de personas por zonas primer piso establecimiento Fundación Lumberas del Mañana.

Zona	Número de personas
Cocina	1 adulto
Enfermería	2 (1 adulto y 1 niño)
Prejardín	30 niños. 2 adultos
Párvulo	20 niños. 2 adultos
Jardín	30 niños. 2 adultos
Oficina administrativa	4 adultos

Fuente: Establecimiento Educativo Fundación Lumberas del Mañana 2016 - 2017

Tabla 4. Número de personas por zonas primer piso establecimiento Fundación Lumberas del Mañana.

Zona	Número de personas
Informática	4 niños
Biblioteca	8 niños
Transición	25 niños. 1 adulto
Primero	20 niños. 1 adulto
Segundo	20 niños. 1 adulto
Tercero	20 niños. 1 adulto

Fuente: Establecimiento Educativo Fundación Lumberas del Mañana 2016 - 2017

Los aires acondicionados presentes en la institución se describen en la Tabla 5

Tabla 5. Listado de aires acondicionados Establecimiento Educativo Fundación Lumberas del Mañana.

Marca	Modelo	Zona	BTU/h	A	kW	Fuente de alimentación	kWh
YORK	YSEA12FS-ADA / YSDA12FS-ADA	Oficina Administrativa	12000	5.05	1.09	220Vac-60Hz-1Ph	1.09
YORK	YSEA24FS-ADA / YSDA24FS-ADA	Jardín	24000	11.5	2.5	220Vac-60Hz-1Ph	2.5
ConfortStar	CCH012CD(I) / CCH012CD-A	Párvulo	12000	5.8	1.26	208-230Vca-60Hz-1Ph	1.26
Samsung	AS24W6WB	Primero	24000	11.5	2.5	220Vac-60Hz-1Ph	2.5
OLIMPO	OAW85C	Informática	8000	6.4	0.65	110Vac-60Hz-	0.65
OLIMPO	OAC120LX	Prejardin	12000	5.4	1.18	220Vac-60Hz-1Ph	1.18
ConfortStar	CSC1012CD-B(I) / CSC1012CD-B(0)	Enfermería	12000	5.5	1.16	220Vac-60Hz-1Ph	1.16
Olimpo	OAC-18CSA/LC1	Cuarto y Quinto	18000	7.4	1.63	220Vac-60Hz-1Ph	1.63
Olimpo	OAC1881V	Segundo	18000	8.3	1.75	220Vac-60Hz-1Ph	1.75

Fuente: Establecimiento Educativo Fundación Lumberas del Mañana 2016 - 2017

Nissi Energy-Box Instalados:



Gráfica 46. Nissi Energy-Box instalado en la oficina de administración.



Gráfica 47. Nissi Energy-Box instalado en el salón de primero.



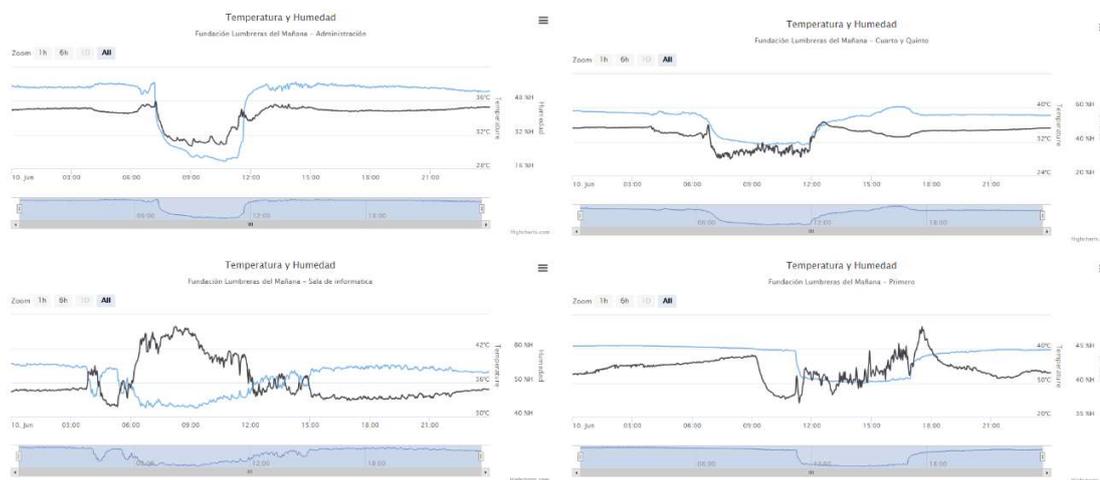
Gráfica 48. Nissi Energy-Box instalado en el salón cuarto y quinto.



Gráfica 49. Nissi Energy-Box instalado en el salón de segundo (ahora es informática).

4.2 DATOS TOMADOS EN LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA FUNDACIÓN LUMBRERAS DEL MAÑANA

En la Gráfica 50, se muestran las variables temperatura y humedad de la oficina Administrativa, Cuarto-quinto, Sala de informática y Primero de la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.



Gráfica 50. Temperatura y humedad en la oficina Administrativa, Cuarto-quinto, Sala de informática y Primero de la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.

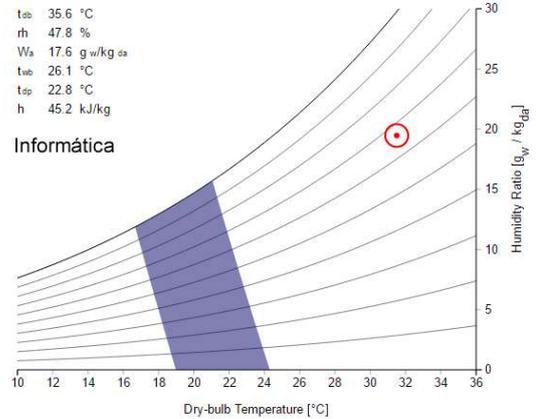
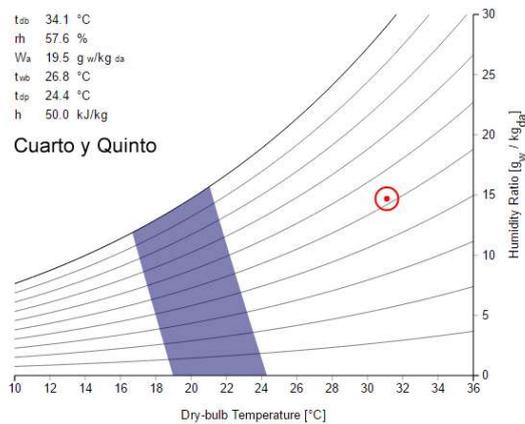
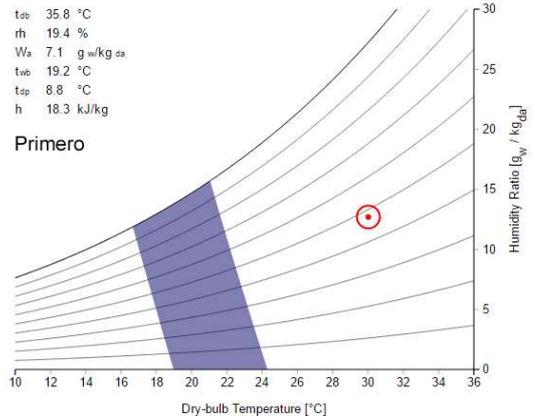
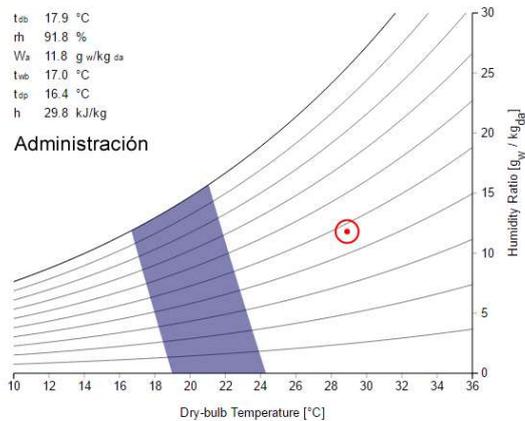
En ella se observa que el salón de informática para el día 10-06-2016 no se encendió el aire acondicionado y en ella la temperatura máxima 38.9°C y la temperatura mínima fue de 31.50°C, la humedad máxima fue de 66.48 %H y la humedad mínima es de 43.10%H, también se puede apreciar en el mismo horario una perturbación en las dos variables que pueden ser producidas por los salones adyacentes o por la apertura de la puerta. La oficina administrativa alcanzo una temperatura máxima de 38°C y una temperatura mínima de 28.9 °C, la humedad máxima fue de 47.33%H y la humedad mínima de 26.8%H. En el salón de cuarto y quinto la temperatura máxima fue de 40.28°C y la temperatura mínima fue de 31.10° C, la humedad máxima fue de 51.70%H y la humedad mínima fue de 30.18%H. En el salón de primero la temperatura máxima es de 40.52°C y la temperatura mínima es de 30.92°C, la humedad máxima es de 47.68%H y la humedad mínima es de 37.68%H. Estos datos corresponden a un día sin estudiantes y refleja la carga térmica, sin estudiantes, que debe manejar el sistema de aire acondicionado.

Tabla 6. Se muestran los valores máximos y mínimos de la temperatura y humedad de la oficina Administrativa, Cuarto-quinto, Sala de informática y Primero.

Zona	T Max.	T Min.	H Max.	H Min.
Administraron	38°C	28.9 °C	47.33%H	26.8%H
Primero	40.52°C	30.92°C	47.68%H	37.68%H
Cuarto y quinto	40.28°C	31.10° C	51.70%H	30.18%H
Informática	38.9°C	31.50°C	66.48 %H	43.10%H

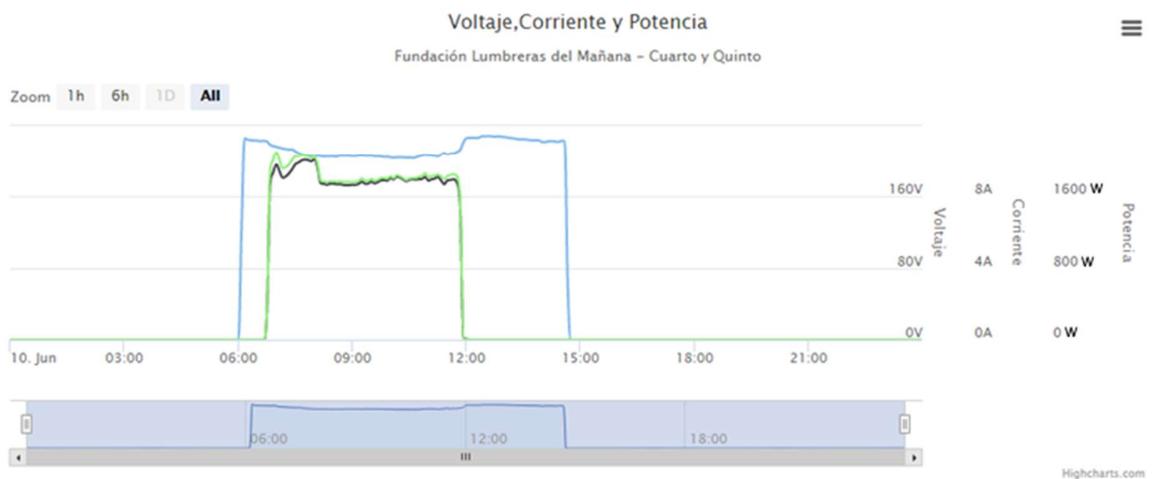
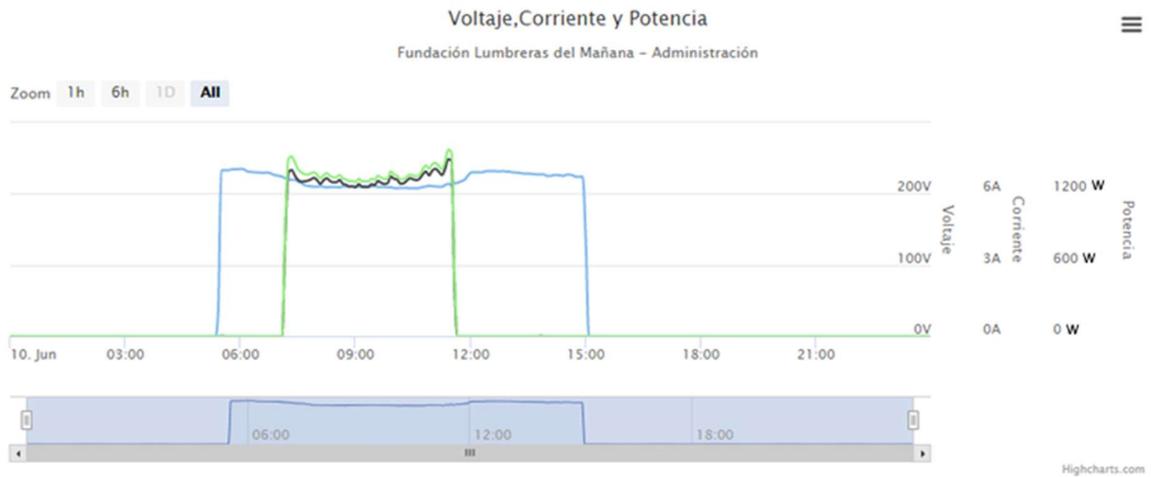
Fuente: Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana 2016 - 2017

Para una mejor visualización se tabulan los datos en la Tabla 6, donde se observa que los datos no difieren mucho, pero se nota que, en el salón de informática, aunque no se prendió aire acondicionado la temperatura llego a bajar 10° igual como los salones adyacentes, para lograr este efecto concluimos que el salón debió de estar desocupado de personas y ninguna fuente de calor encendida. La humedad de este salón no disminuyó como normalmente lo hace cuando el aire acondicionado se enciende.



Gráfica 51. Confort en la oficina Administrativa, Cuarto-quinto, Sala de informática y Primero de la institución Educativa Fundación Lumberras del Mañana, dato simulado con una temperatura radiante para el día 10 de julio de 2016 de 32°C, metabolismo típico de 1.1 y nivel de ropa de 0.5 para verano.

En la Gráfica 51 se observa el confort en la oficina Administrativa, Cuarto-quinto, Sala de informática y Primero de la institución Educativa Fundación Lumberras del Mañana, dato simulado con una temperatura radiante para el día 10 de julio de 2016 de 32°C, metabolismo típico de 1.1 y nivel de ropa de 0.5 para verano. Es evidente que en las 4 zonas no se cumple con los estándares de la ASHRAE 55-2013.



Gráfica 52. Voltaje, Corriente y Potencia en la oficina Administrativa y en el salón Cuarto y Quinto de la institución Educativa Fundación Lumberas del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.

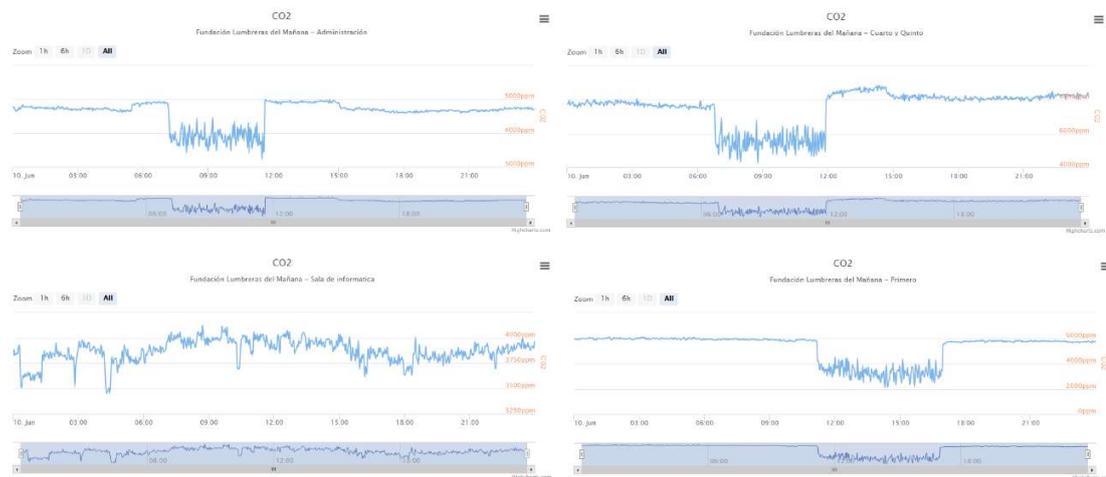
En la Gráfica 52 solo se colocaron datos de la oficina Administrativa y en el salón Cuarto y Quinto.

Por otra parte, el voltaje máximo alcanzado en los dos salones es de 232.66Vac resaltando que en la institución hay un solo panel eléctrico con un seccionador o breaker común que les proporciona energía a todos los aires, por eso se refleja el comportamiento del voltaje igual para todas las zonas.

La máxima corriente y la máxima potencia promedio medida en el salón de administración es de 7.38A y 1.5kW (Gráfica 52) y sus valores nominales para un aire acondicionado YORK con modelo YSDA12FS-ADA tiene 5.05A y 1.09kW. Se

observa que los valores medidos son correctos ya que no difieren mucho de los valores nominales, para lograr disminuir la potencia ya habrá que hacer un mantenimiento general al aire acondicionado para mejorar el rendimiento.

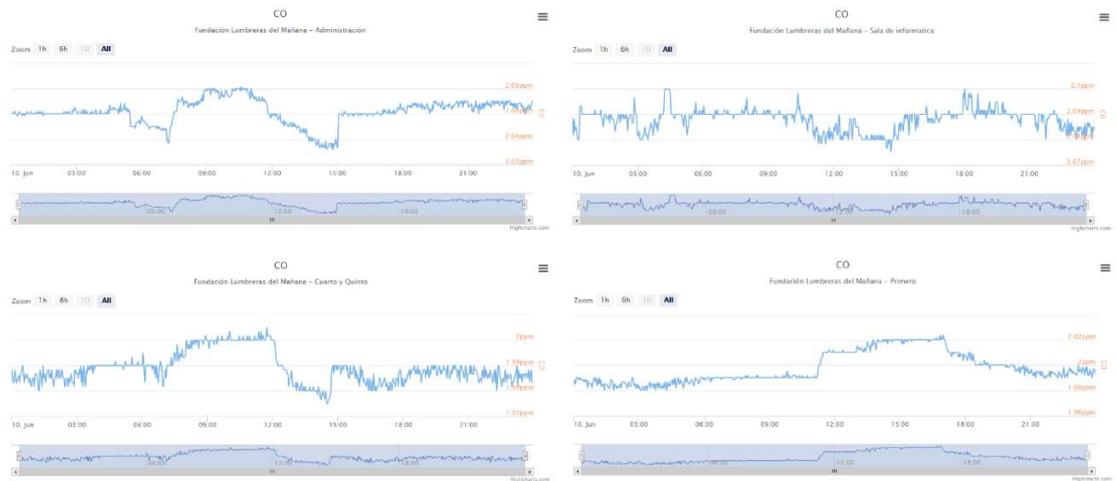
Igualmente, los valores del salón de Cuarto y Quinto muestran como máxima corriente y máxima potencia los valores de 10A y 2kW y sus valores nominales para un aire acondicionado OLIMPO con modelo OAC-18CSA/LCI tiene los valores de 8A y 1.7kW.



Gráfica 53. CO2 en la oficina Administrativa, Cuarto-quinto, Sala de informática y Primero de la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.

Los datos de CO2 se pueden observar en la Gráfica 53 en las 4 zonas para el día 10 de junio de 2016, el valor máximo de CO2 fue de 5000ppm aproximadamente, en el instante que el aire acondicionado se enciende la variable es perturbada se cree que es por la cercanía con el aire acondicionado el movimiento del ventilador es quien afecta el valor. En el salón de informática no se ve ese efecto porque no fue encendido el aire acondicionado.

En la Gráfica 54 muestra los valores de CO2 para las 4 zonas no se ve perturbado por el encendido del aire acondicionado que fue aproximadamente entre las 6:00am y 3:00pm, su perturbación es muy mínima porque va desde 1.98ppm hasta 2ppm, estará ligada a otros factores.



Gráfica 54. CO en la oficina Administrativa, Cuarto-quinto, Sala de informática y Primero de la institución Educativa Fundación Lumberas del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.

5. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES MEDIDAS Y CONFORT

Con el fin de mantener el confort térmico y ahorrar energía, como objetivo en el presente trabajo, a continuación, se mencionan las variables que se miden a través de la plataforma diseñada que denominamos Nissi Energy: **temperatura, humedad relativa, CO₂ y CO** de la habitación y las variables de voltaje y corriente alterna del aire acondicionado split.

En este estudio la temperatura y la humedad son las variables medidas que se utilizan para determinar el confort térmico; considerado éste como “la condición mental que expresa satisfacción en el entorno térmico y es una evaluación subjetiva” (ANSI / ASHRAE Standard 55).

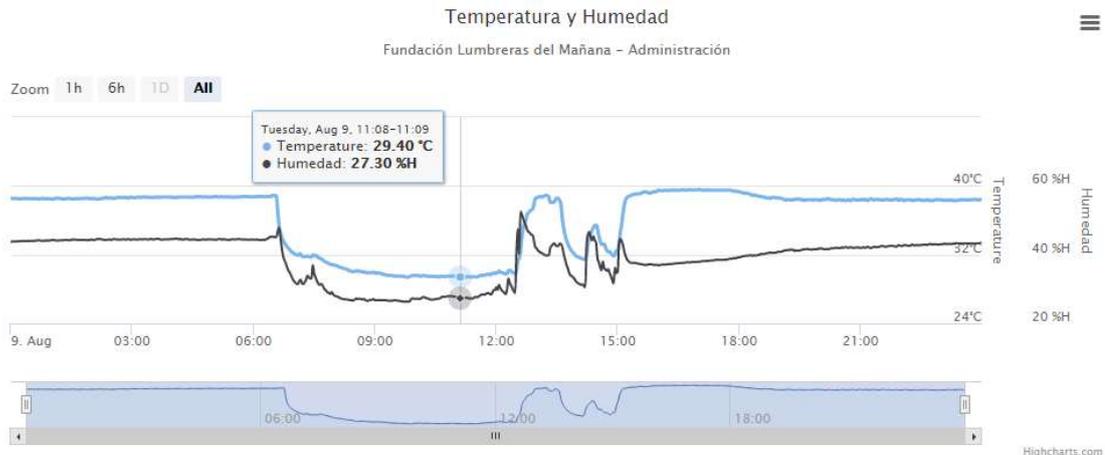
La temperatura es una magnitud física que determina la intensidad de calor que un cuerpo posee o sustancia, cualitativamente se puede decir que un cuerpo está más caliente o más frío que otro. Aun cuando se esté familiarizado con el término temperatura, “no es fácil ofrecer una definición exacta de este concepto” [13, p. 17].

En cada zona o habitación en estudio la temperatura varía en el tiempo dependiendo de la carga térmica que se encuentre en la habitación y de la carga térmica de los alrededores o temperatura externa. Este cambio en la temperatura por las cargas internas o externas obedece a la “transferencia de calor”, que se puede dar por conducción, convección o radiación. Y la transferencia de calor a su vez tiene un sentido, según la segunda ley de la termodinámica “se requiere que el calor se transfiera en la dirección de la temperatura decreciente” [13, p. 2].

En el caso del presente estudio, normalmente se tienen como cargas internas: personas, artefactos eléctricos (bombillos, computador, abanico y el aire acondicionado). Además, cargas externas: las habitaciones adyacentes y la temperatura exterior que es la de Cartagena, cuya temperatura promedio en el día es de 31° centígrados y en la noche de 21° centígrados.

Por otra parte, **la humedad relativa**, se define como “la razón entre la presión parcial del vapor de agua y la presión de vapor saturado a una temperatura dada. Generalmente se expresa como porcentaje” [14, p. 395].

En Cartagena la humedad relativa en promedio es de 81%. Esto se menciona para comparar la temperatura de cada habitación con respecto a la del ambiente.



Gráfica 55. Comportamiento de la temperatura y humedad en las oficinas administrativas de la institución Educativa Fundación Lumberas del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.

En la Gráfica 55 se observa que antes de encender el aire acondicionado (antes de las 6:30 a.m.), la temperatura es de 39°C y la humedad relativa de 45%H aproximadamente, tan pronto el aire acondicionado enciende ésta comienza a disminuir hasta 29°C y 27%H respectivamente. Igualmente se observan perturbaciones y los efectos de las operaciones en el aire acondicionado si es encendido o apagado en el transcurso del día.

Para determinar si se encuentra en condiciones de confort térmico una medida de temperatura y humedad, la presente investigación se basó en la herramienta de Confort Térmico CBE por ASHRAE 55 [11]; donde se puede determinar de acuerdo al método de predicción seleccionado, “método PMV” o “método adaptativo”, si se está en el rango de confort deseado.

Para utilizar la herramienta se registró la temperatura máxima real de 36°C en el día 9 del mes de agosto de 2016, esta temperatura se tomó de la compañía estadounidense AccuWeather en su página Web accuweather.com

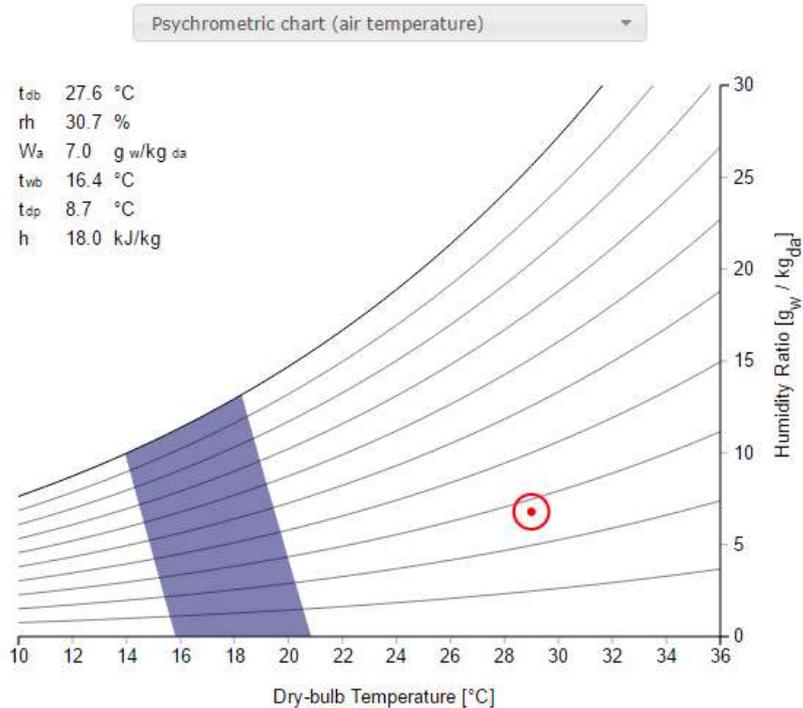
Por tanto, ingresando los siguientes parámetros:

- Temperatura del aire: 29°C
- Temperatura media radiante: 36°C
- Velocidad del aire: 0.1m/s
- Humedad relativa: 27.3%
- Tasa metabólica: 1.1 (Típica).
- Nivel de ropa: 0.5 Clo (Ropa de verano típica de interior).

Se obtuvo así la siguiente gráfico psicométrico (ver Gráfica 56).

X Does not comply with ASHRAE Standard 55-2013

PMV	2.17
PPD	84%
Sensation	Warm
SET	30.9°C



Gráfica 56. Gráfica psicométrica para observar si hay confort térmico el día 9 de octubre de 2016 en la oficina de administración en la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana.

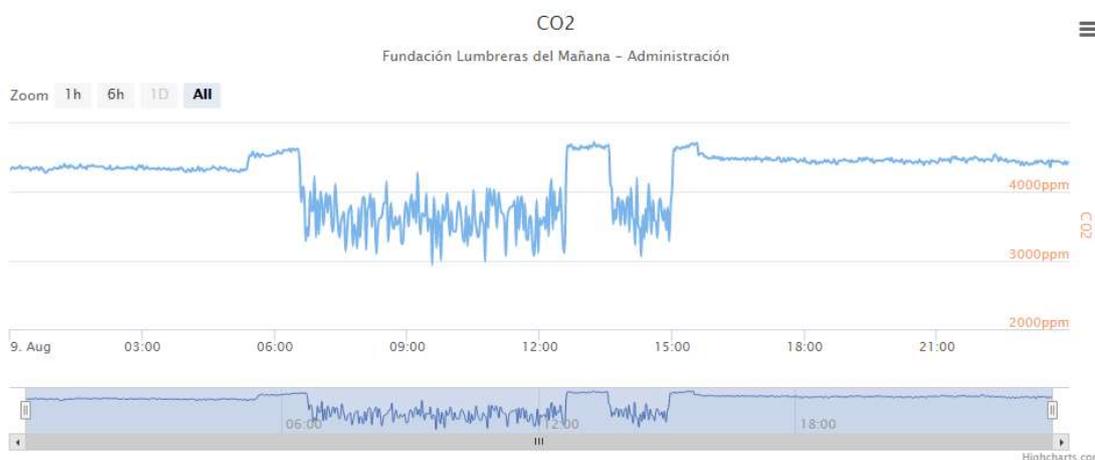
Nota: en esta gráfica psicométrica la abscisa es la temperatura del bulbo seco, y la temperatura media radiante (MRT) es fija, controlada por las entradas digitadas. Cada punto del gráfico tiene el mismo MRT, que define el límite de la zona de confort. De esta manera se puede ver cómo los cambios en MRT afectan el confort térmico. También puede utilizar el botón de temperatura operativa, pero cada punto tendrá el mismo MRT.

En la gráfica psicométrica se observa que no se cumplen las condiciones de confort térmico ASHRAE standard 55- 2013. Dato muy acertado, ya que esos días fueron muy calurosos en la ciudad de Cartagena (Col.).

Los gases CO₂ (dióxido de carbono) y CO (monóxido de carbono) son monitoreados para observar qué tan contaminado está el aire en las habitaciones de la edificación en estudio “Establecimiento Educativo Fundación Lumbreras del Mañana”.

El dióxido de carbono como contaminante:

El dióxido de carbono es un asfixiante simple que actúa básicamente por desplazamiento del oxígeno y que a elevadas concentraciones (>30.000 ppm); puede causar dolor de cabeza, mareos, somnolencia y problemas respiratorios, dependiendo de la concentración y de la duración de la exposición. Es un componente del aire exterior en el que se encuentra habitualmente a niveles entre 300 y 400 ppm, pudiendo alcanzar en zonas urbanas valores de hasta 550 ppm. El valor límite de exposición profesional (LEP-VLA) del INSHT para exposiciones diarias de 8 horas es de 5.000 ppm con un valor límite para exposiciones cortas de 15 minutos de 15.000 ppm. Estos valores son difíciles de encontrar en ambientes interiores no industriales como son oficinas, escuelas y servicios en general. En la práctica, en estos recintos se encuentran valores de 2.000 y hasta 3.000 ppm. Si se superan estos niveles puede deberse a una combustión incontrolada, en cuyo caso el riesgo para la salud puede no ser debido al dióxido de carbono sino a la presencia de otros subproductos de la combustión, principalmente el monóxido de carbono (CO), cuyo límite de exposición es muy inferior (25 ppm). [15]



Gráfica 57. Comportamiento de CO₂ en las oficinas administrativas de la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.

En la Gráfica 57 observamos que el CO₂ alcanza valores de 4500 ppm aproximadamente, en ella se observa que el valor superó el límite promedio para recintos como escuelas, pero advertimos que dentro del programa este valor no se ha ajustado o calibrado con una herramienta de referencia. También se observa que

cuando el aire se enciende, la variable de CO₂ se perturba mostrando una lectura no uniforme, se puede suponer que es por el movimiento del aire acondicionado que produce el ventilador del evaporador, ya que el sensor está ubicado al lado o muy próximo al aire acondicionado. Igual forma, queda para mejorar en un trabajo futuro la calibración y exactitud.

El monóxido de carbono es un gas inodoro, incoloro y tóxico. Debido a que es imposible ver, experimentar el sabor u olor de los gases tóxicos, el CO puede causar la muerte de una persona antes de darse cuenta que está en un recinto. Los efectos de la exposición al CO pueden variar mucho de persona a persona dependiendo de la edad, la salud general y la concentración y tiempo de exposición.

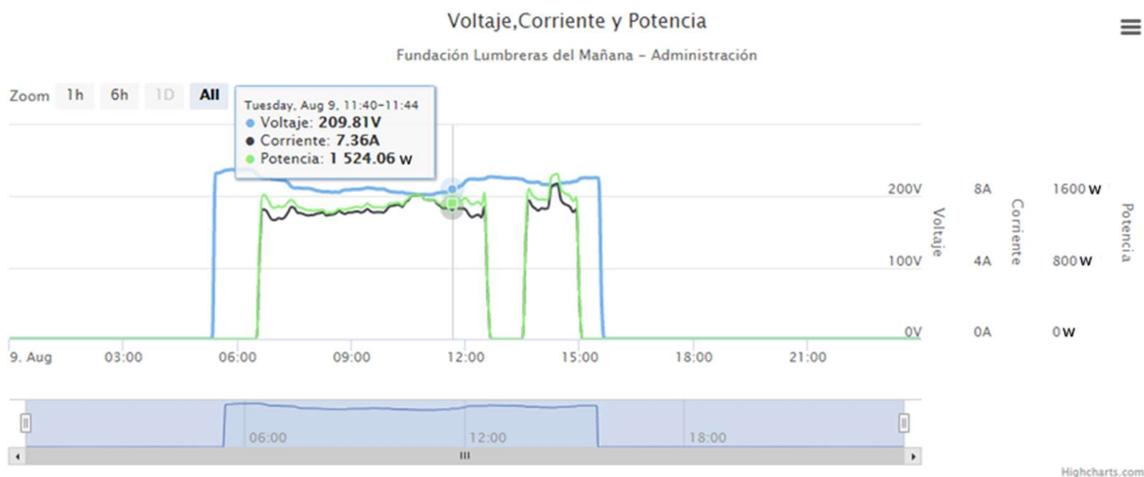
“Los niveles promedio en hogares sin estufas de gas varían de 0,5 a 5 partes por millón (ppm). Cerca de los niveles ajustados adecuadamente, las estufas de gas son a menudo de 5 a 15 ppm y esas estufas cerca de deficientemente ajustados pueden ser de 30 ppm o más” [16].



Gráfica 58. Comportamiento de CO en las oficinas administrativas de la institución Educativa Fundación Lumberas del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.

En la Gráfica 58 se observa que el CO se mantiene entre 2.06ppm y 2.08ppm rango aceptado entre los hogares sin estufas.

El voltaje y la corriente son útiles para saber la potencia consumida por el aire acondicionado. En la Gráfica 59, se observa que el aire acondicionado con un voltaje de 209.81 Vac y con una corriente de 7.36 A obtenemos 1.5 kW de potencia activa o promedio. Igual vemos los tiempos de encendido y apagado del aire acondicionado que está entre 6:30am a 12:45pm y se enciende nuevamente entre la 1:30pm a 3:00pm.



Gráfica 59. Voltaje, corriente y potencia en las oficinas administrativas de la institución Educativa Fundación Lumbreras del Mañana, datos muestreados cada 20 segundos durante las 24 horas del día.

6. MODELOS PARAMÉTRICOS A PARTIR DE LOS DATOS REGISTRADOS

Modelar un sistema de áreas acondicionados para múltiples zonas, orientado al control automático que garantice el confort y el ahorro de energía, conlleva principalmente a la temática centrada en los sistemas de transferencia de calor y masa. Dichos sistemas parten de la “Primera ley de la termodinámica o principio de conservación de la energía”.

6.1 MODELOS BASADOS EN PRINCIPIOS FÍSICOS

El principio de conservación de la energía (o balance de energía) para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como sigue [17, p. 11]:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía total} \\ \text{Que entra en el} \\ \text{sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energía total} \\ \text{que sale del} \\ \text{sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio en la} \\ \text{energía total} \\ \text{del sistema} \end{array} \right)$$

Considerando las variables tenidas en cuenta en el sistema:

- Temperatura
- Humedad
- CO₂
- CO

Se plantearon dos casos al principio para hacer dichos modelos: en el primer caso se pretendió modelar el sistema con las ecuaciones físicas que rodean el tema de transferencia de energía y calor, y en el segundo caso se pretendió utilizar la herramienta de Open modélica.

Al estudiar el fenómeno con las ecuaciones físicas y observando los artículos de referencia “A model-based optimal ventilation control strategy of multi-zone VAV air-conditioning systems”, se llega a la conclusión que el sistema realmente obedece a muchos factores que no se tienen en cuenta, como por ejemplo el número de personas de la habitación y que para lograr dichas aproximaciones reales se emerge en un complejo análisis matemático que no es el alcance de este trabajo.

A continuación se muestra las ecuaciones bases que se utilizan en el artículo de referencia, ya mencionado anteriormente, como punto de partida para realizar los modelos predictivos o “predicción de rendimiento del sistema”: balance de energía, balance de humedad y balance de contaminantes. Las cuales son:

1. $M_i c_p \frac{dT_i}{dt} = m_s i c_p (T_s - T_i) + Q_{sen,i}$
2. $M_i \frac{dG_i}{dt} = m_s i (G_s - G_i) + D_i$

$$3. \quad V_i c_p \frac{dC_i}{dt} = V_s i (C_s - C_i) + S_i$$

$Q_{sen,i}$ Carga de calor sensible.

D_i Carga de Humedad.

S_i Carga de contaminante.

M Es la masa de aire de un espacio.

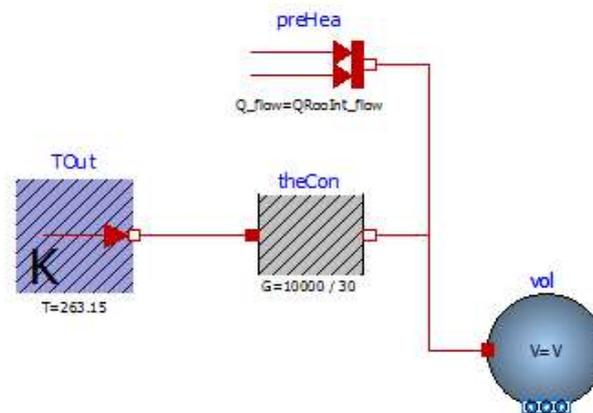
T Es temperatura.

G Contenido de humedad.

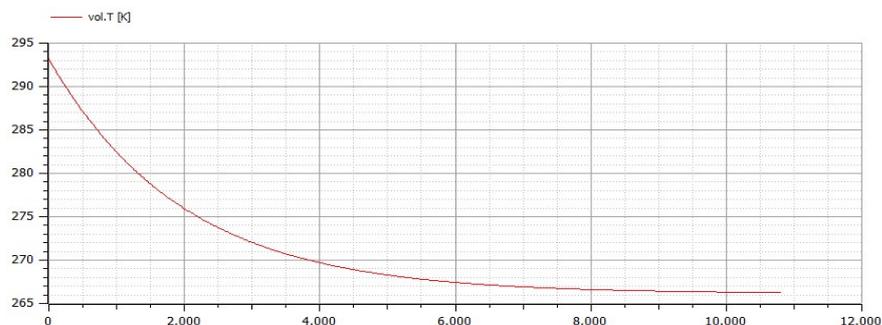
C Es la concentración de CO_2 .

El segundo caso con el que se intentó modelar el sistema fue con la herramienta Open Modelica la librería "Buildings" donde se modelan sistemas físicos desde muy simples hasta muy detallados (<http://simulationresearch.lbl.gov/modelica>). Pero con ella no se consiguieron los resultados deseados ya que el sistema arrojó errores en la compilación y para poder solucionar dichos errores había que reprogramar muchas librerías por causa de incompatibilidad entre ellas.

El modelado sencillo de una habitación dio resultados, como ejemplo se tomó Buildings.Examples.Tutorial.SpaceCooling.System1, ver Gráfica 60 y Gráfica 61.



Gráfica 60. Modelo en OpenModelica ejemplo "SpaceCooling System1".



Gráfica 61. Simulación modelo en OpenModelica ejemplo “SpaceCooling System1”.

Esta parte del modelo de sistema implementa la habitación con una ganancia de calor.

6.2 AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE LOS MODELOS

Ajuste de los parámetros de los modelos de cada zona a partir de los modelos basados en principios físicos, por lo que es razonable ajustar modelos de primer orden de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{K_p}{1+T_{p1}s}$$

Kp = Constante proporcional

Tp1 = Polos

Utilizando los datos históricos obtenidos del sistema, y la herramienta “System Identification Toolbox™” de MATLAB se obtienen los siguientes modelos.

Tabla 7. Código para identificar las zonas en el Establecimiento Educativo Fundación Lumberas del Mañana.

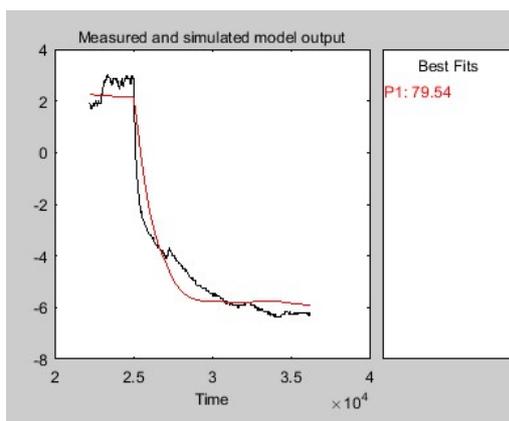
Código	Nombre Salón
1z1	Administración
1z5	Primero
1z6	Cuarto y quinto
1z7	Informática

Fuente: Establecimiento Educativo Fundación Lumberas del Mañana 2016 - 2017

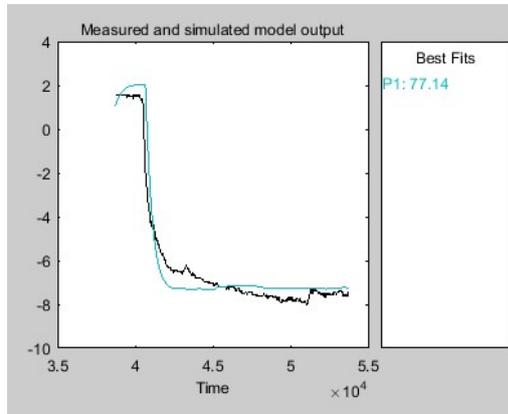
Los parámetros para el caso de enfriamiento se representan en la Tabla 8. Ver Gráfica 62, Gráfica 63, Gráfica 64 y Gráfica 65 para las gráficas de validación.

Tabla 8. Parámetros modelo aire acondicionado encendido.

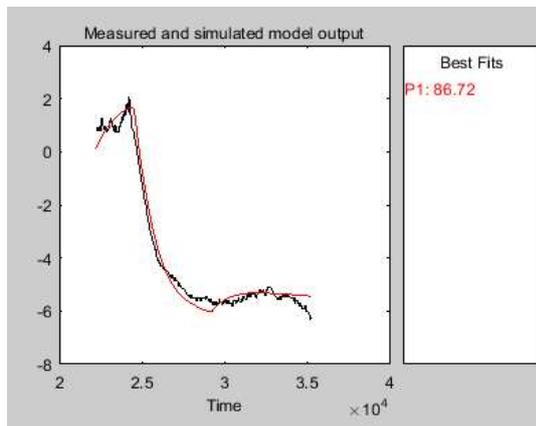
Código	Nombre Salón	Kp	Tp1	Fit to estimation data
1z1	Administración	-0.0051786 +/- 3.2432e-05	1355.9 +/- 31.294	79.54%
1z5	Primero	-0.0035573 +/- 1.3869e-05	367.08 +/- 13.017	76.78%
1z6	Cuarto y quinto	-0.0038862 +/- 1.3226e-05	1293.4 +/- 17.272	86.68%
1z7	Informática	-0.01317 +/- 5.312e-05	435.66 +/- 10.128	89.05%



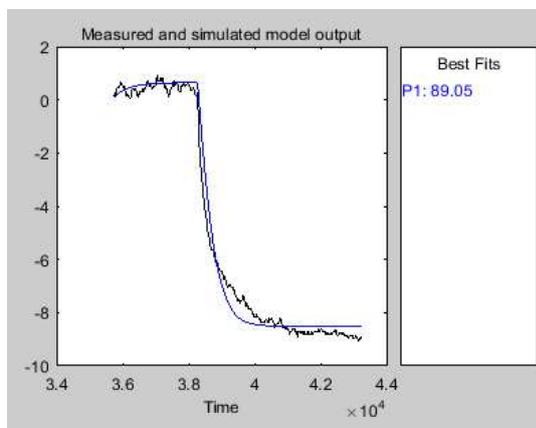
Gráfica 62. Simulación modelo aire acondicionado encendido de la zona 1z1 Administración.



Gráfica 63. Simulación modelo aire acondicionado encendido de la zona 1z5
Primero.



Gráfica 64. Simulación modelo aire acondicionado encendido de la zona 1z6
Cuarto y quinto.

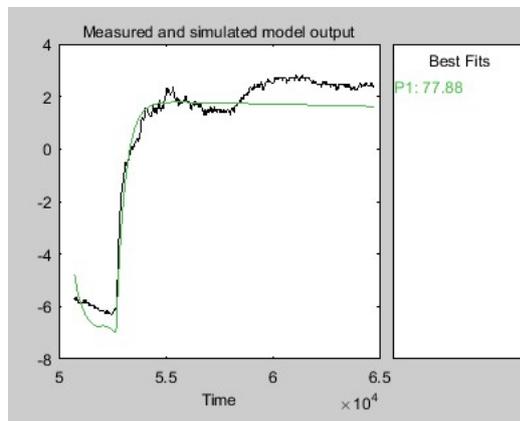


Gráfica 65. Simulación modelo aire acondicionado encendido de la zona 1z7 Informática.

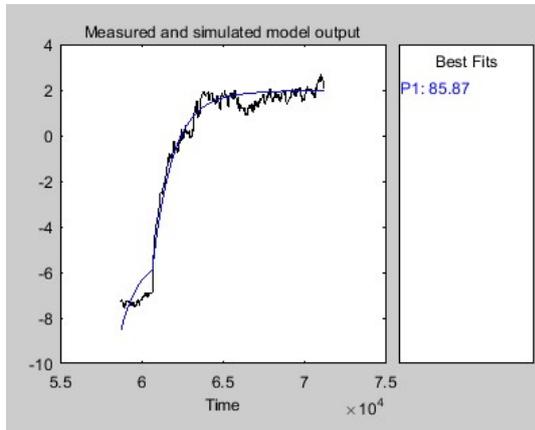
A continuación, mostramos la función de transferencia que representa el modelo del comportamiento de la temperatura cuando se apaga el aire acondicionado.

Tabla 9. Parámetros modelo aire acondicionado apagado.

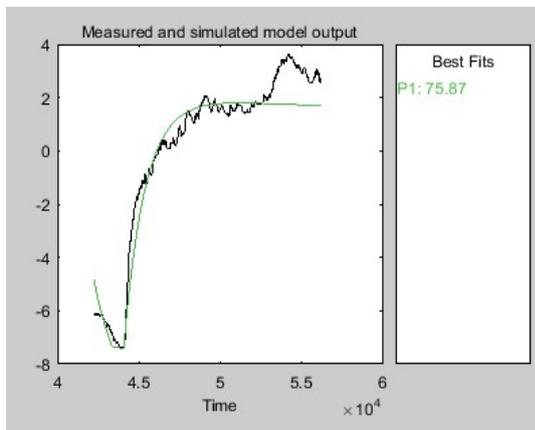
Código	Nombre Salón	Kp	Tp1	Fit to estimation data
1z1	Administración	-0.0057338 +/- 5.421e-05	410.48 +/- 13.348	77.88%
1z5	Primero	-0.0025295 +/- 2.628e-05	1245 +/- 16.94	85.87%
1z6	Cuarto y quinto	-0.0049693 +/- 7.3327e-05	1304.2 +/- 28.758	75.87%
1z7	Informática	-0.012853 +/- 0.00013587	776.77 +/- 16.519	84.89%



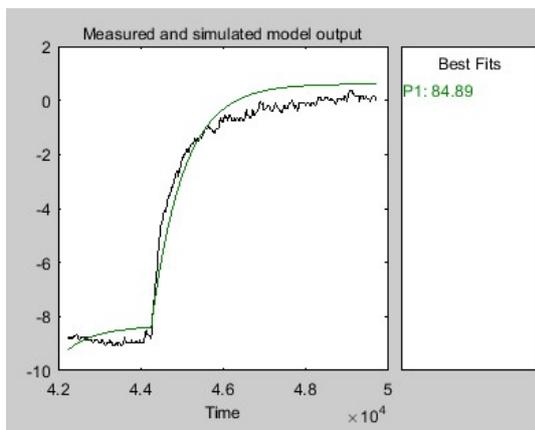
Gráfica 66. Simulación modelo aire acondicionado apagado de la zona 1z1 Administración.



Gráfica 67. Simulación modelo aire acondicionado apagado de la zona 1z5 Primero.



Gráfica 68. Simulación modelo aire acondicionado apagado de la zona 1z6 Cuarto y Quinto.

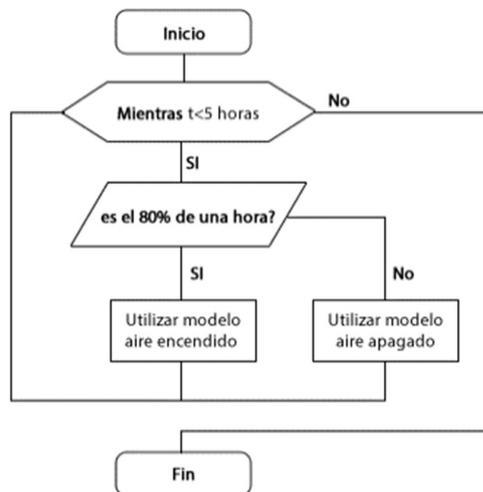


Gráfica 69. Simulación modelo aire acondicionado apagado de la zona 1z7 Informática.

Estrategia de control por temporización o con ley de control por tiempo.

Obtenido los modelos y teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- El tiempo en promedio en que deben permanecer los aires encendidos durante el día son 5 horas (18000 segundos).
- El tiempo de muestreo o en el que se toma la muestra es de 20 segundos.
- El modelo cuando el aire acondicionado está encendido dura 80% de una hora.
- El modelo cuando el aire está apagado dura el 20% de una hora.

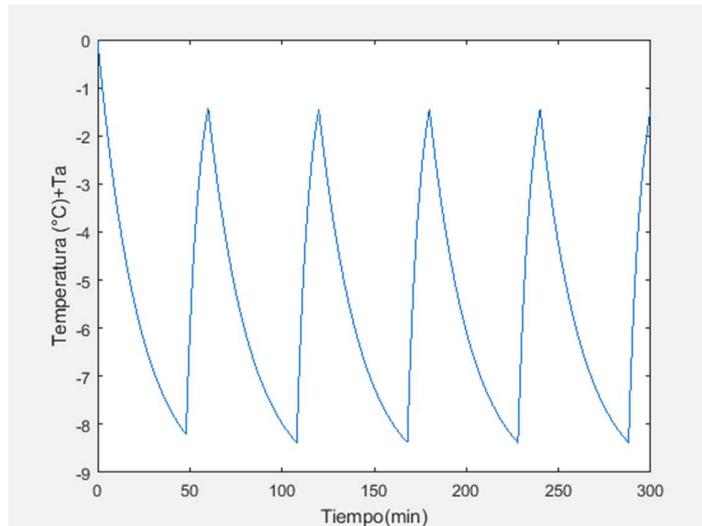


Gráfica 70. Diagrama de flujo utilización de modelos.

Simulación de los modelos

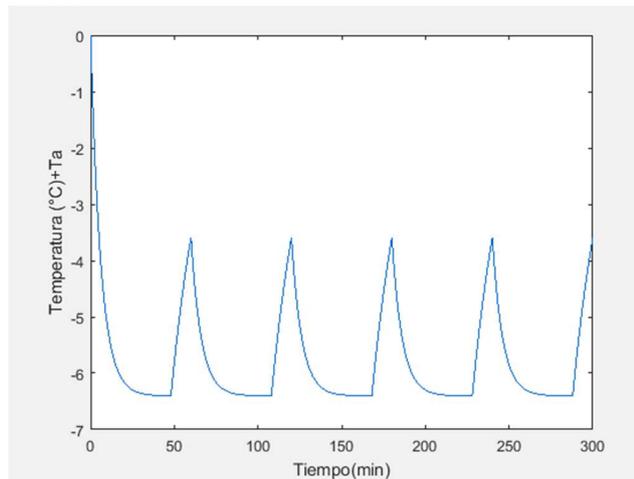
La simulación consiste en predecir el comportamiento de la temperatura del aire acondicionado y el objetivo es ahorrar por lo menos el 20%, la estrategia de ley de control por tiempo nos permite apagar el aire acondicionado el 20% del tiempo en el que permanece encendido. Los aires acondicionados en la Institución Educativa Fundación Lumberras del Mañana permanecen prendidos en promedio 5 horas al día. Es por eso, que en cada hora se procedió apagar el aire acondicionado durante 12 minutos.

En la simulación 1z1 Administración (Ver Gráfica 71), se observa que se pierde el enfriamiento ganado durante el encendido ($-8^{\circ}\text{C} + T_a$) ya que al apagar retorna a casi la temperatura inicial ($-2^{\circ}\text{C} + T_a$).



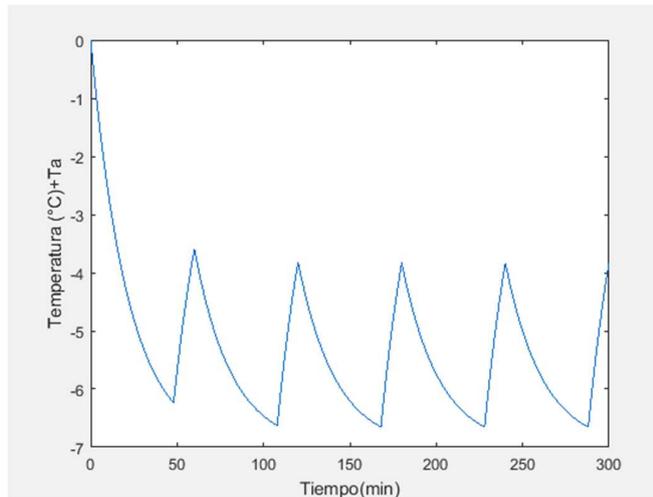
Gráfica 71. Simulación zona 1z1 Administración apagando el aire 12 minutos cada 60 minutos.

En la simulación 1z5 Primero (Ver Gráfica 66), se observa que el proceso de control da mejores resultados, ya que no se pierde mucho el enfriamiento al apagar el aire durante los 12 minutos.



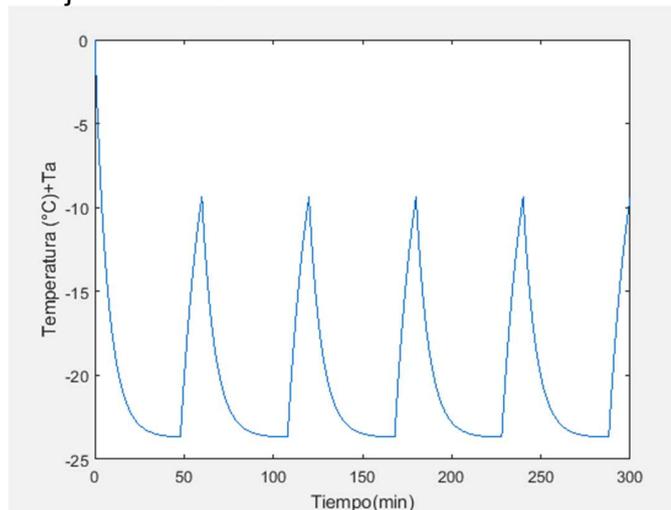
Gráfica 72. Simulación zona 1z5 Primero apagando el aire 12 minutos cada 60 minutos.

Igual se puede observar en la simulación de Cuarto y Quinto (Ver Gráfica 73), se logra ahorrar energía al mismo tiempo que no se pierde mucho el confort térmico.



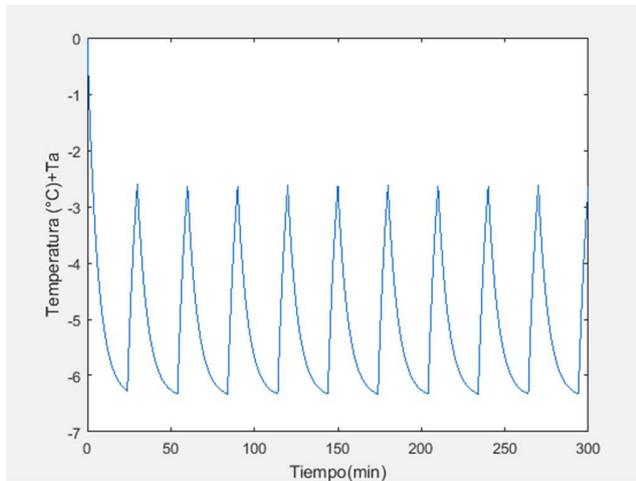
Gráfica 73. Simulación zona 1z6 Cuarto y Quinto apagando el aire 12 minutos cada 60 minutos.

La simulación 1z7 Informática aunque se aprecia el control, se observa que el modelo desciende mucho la temperatura casi $-25^{\circ} + T_a$, hay que mirar si es un error en los datos o ajustar el modelo con otras consideraciones.

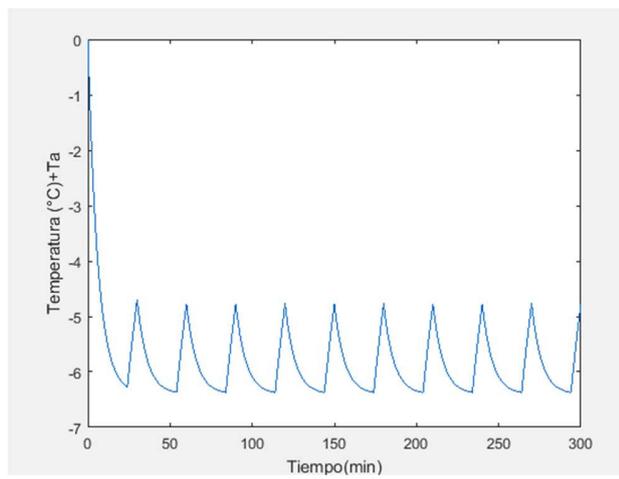


Gráfica 74. Simulación zona 1z7 Informática apagando el aire 12 minutos cada 60 minutos.

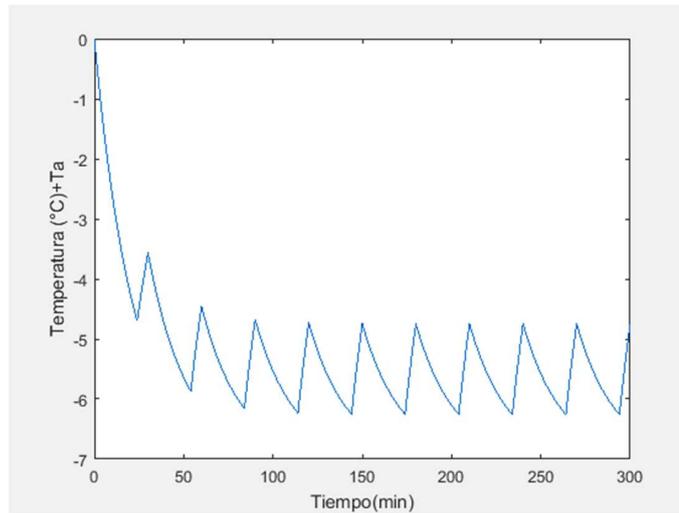
Si tratamos de optimizar el proceso de control al apagar el aire acondicionado 6 minutos cada media hora tenemos los siguientes resultados en simulación.



Gráfica 75. Simulación zona 1z1 Administración apagando el aire 6 minutos cada 30 minutos.



Gráfica 76. Simulación zona 1z5 Primero apagando el aire 6 minutos cada 30 minutos.



Gráfica 77. Simulación zona 1z6 Cuarto y Quinto apagando el aire 6 minutos cada 30 minutos.

Si comparamos los dos métodos apagando el aire cada 12 minutos cada hora y apagando el aire 6 minutos cada media hora, se puede observar en el de apagado de 6 minutos que ahorramos energía sin afectar mucho la climatización, logrando un ahorro cercano al 20%.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo se diseñó, implementó y validó un sistema de monitoreo orientado al control aplicado a aires acondicionados.

Se encontró que Modelando el sistema se logra en simulación el ahorro de energía del 20%. Aunque hay que tener en cuenta algunas consideraciones en cada habitación, ya que no en todas conviene ahorrar el 20% porque no se logra el confort de temperatura. Alguna de las consideraciones es mirar donde es deficiente el sistema: si es porque el aire acondicionado no es lo suficientemente potente para enfriar la habitación, también por factores de falta de mantenimiento o si hay pérdidas de la temperatura por mantener puertas y ventanas abiertas.

La arquitectura de hardware y software funcionó, igualmente se resalta mejorar la estabilidad de la red, esto se logra con algoritmos y equipos pensados específicamente para dichas tareas (Servidor central y mini-server).

La implementación de la plataforma Nissi Energy en el Establecimiento Educativo Fundación Lumberas del Mañana deja resultados reales. Tanto las variables que se midieron, como el poder observar las fortalezas y falencias del sistema para hacerlo más robusto.

El modelo del sistema ayudó en gran manera para predecir cómo es el comportamiento del sistema cuando se estuvo realizando el control, utilizando la técnica de control o "ley de control" por tiempo. Con el modelo se puede comparar las zonas y mirar cuál responde mejor al control o mirar si un sistema está deficiente. El objetivo logrado de ahorrar el 20% de la energía dio resultados, aunque en algunas zonas es mejor ahorrar el 10% para no salirse del confort.

Para trabajos futuros se recomienda considerar que cada habitación tiene un modelo dinámico único y en tal caso hay que ajustar el método de control utilizado para ahorrar energía en cada una de estas habitaciones.

El sistema en el lado del software podría mejorar, en cuanto a estabilidad en la red ethernet y algunos detalles funcionales como lograr control, el cual depende de la plataforma de hardware.

El sistema en el lado del hardware, podría mejorar el rendimiento para poder ejecutar funciones de monitoreo y control al mismo tiempo. En estos momentos las librerías y funciones cargadas al Arduino Yun solo permiten monitorear o controlar, pero las dos al tiempo no. También hay otras consideraciones a mejorar como hacer el sistema más pequeño, y consideraciones de mantenimiento, que el hardware pueda fabricarse de forma que el mantenimiento a sus piezas como sensores sea de fácil mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] U. D. o. E. O. o. E. E. a. R. E. (EERE), «Buildings Energy Data Book,» 2015. [Enlínea].Available: <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/TableView.aspx?table=3.1.5>.
- [2] T. Zheng, Y. Qin, D. Gao, J. Duan y H. Zhang, «A Practical Deployment Of Intelligent Building Wireless Sensor Network For Environmental Monitoring And Airconditioning Control» 2010 2nd IEEE InternationalConference on Network Infrastructure and Digital Content, p. 5, 2010.
- [3] P. Nangtin, P. Kumhom y K. Chamnongthai, «Adaptive actual load for energy saving in split type air conditioning,» 2016 16th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), p. 4, 2016.
- [4] F. Li, H.-q. Lu y H. Zhou, «Design of intelligent monitoring system of air conditioning and ventilation system in distribution station with 10kV power.,» 2012 China International Conference on Electricity Distribution, p. 4, 2012.
- [5] K. Chinnakani, A. Krishnamurthy, J. Moyne, A. Arbor y F. Gu, «Comparison of energy consumption in HVAC systems using simple ON-OFF, intelligent ON-OFF and optimal controllers.,» Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, p. 6, 2011.
- [6] M. Mossolly, K. Ghali y N. Ghaddar, «Optimal control strategy for a multi-zone air conditioning system using a genetic algorithm.,» Elsevier B.V., p. 9, 2008.
- [7] X. Xu, S. Wang, Z. Sun y F. Xiao, «A model-based optimal ventilation control strategy of multi-zone VAV air-conditioning systems.,» Elsevier B.V., p. 14, 2008.
- [8] P. Ferreira, A. Ruano, S. Silva y E. Conceição, «Neural networks based predictive control for thermal comfort and energy savings in public buildings,» Elsevier B. V., vol. 55, p. 13, 2012.
- [9] M. Castilla, J. Álvarez, M. Berenguel, F. Rodríguez, J. Guzmán y M. Pérez, «A comparison of thermal comfort predictive control strategies,» Elsevier B.V., vol. 43, p. 9, 2011.
- [10] R. McDowall, Fundamentals of HVAC Control Systems, Amsterdam: Elsevier B.V., 2006.

- [11] H. Tyler, S. Stefano, P. Alberto, M. Dustin y Steinfeld Kyle, «CBE Thermal Comfort Tool,» 2013. [En línea]. Available: <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>.
- [12] K. Ogata, Ingeniería de control moderna., Mexico: Pearson Education, 2003.
- [13] Y. A. Cengel, Transferencia de Calor y Masa, México: Mcgraw-Hill, 2007.
- [14] D. C. GIANCOLI, Física Principios con Aplicación., México: Pearson Educación., 2006.
- [15] J. B. Subils y F. B. Domínguez, NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior, España: Centro Nacional De Condiciones De Trabajo, 2000.
- [16] U. S. E. P. A. (EPA), «Carbon Monoxide's Impact on Indoor Air Quality | Indoor Air Quality (IAQ) | US EPA,» [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/carbon-monoxides-impact-indoor-air-quality>. [Último acceso: 2015].
- [17] Y. A. Çengel y m. A. Boles, Termodinámica, México: Mcgraw-Hill, 2012.
- [18] P. E. Tippens, Física, Conceptos y Aplicaciones., México: Mcgraw-Hill, 1995.
- [19] C. E. Montes, Metodología de la Investigación tecnológica, Huancayo, Perú: s.e., 2010.