



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Reconocimiento de comportamientos
y actividades para el ahorro de
energía en edificios residenciales.**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Industrial

P R E S E N T A

José Antonio Guevara Lagunes

DIRECTOR DE TESIS

M. en A. Yair Bautista Blanco



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016

A la Dr. Burcin Becerik Gerber quien me permitió y dio oportunidad de formar parte de esta increíble investigación en la USC.

A Simin Ahmadi Karvigh, quien, bajo su tutoría, enseña y consejo, logre consolidar y conceptualizar la tesis presente.

Al Dr. Francisco Valero Cuevas y Dr. Jesús Dorador González, quienes, sin su apoyo, tiempo y contribución, el presente trabajo no se hubiera realizado.

A mis padres, Antonio Guevara y Mónica Lagunes, quienes brindaron todo su apoyo incondicional, así como su consejo, enseñanza y ejemplo de éxito, para alcanzar este gran logro en mi vida.

A mis hermanas y familia.

A mi novia Nicole Victorica, quien con su amor e inspiración me motivaron a seguir adelante.

Al PAPIIT IT101915 por su contribución y apoyo a lo largo de este proceso.

Les agradezco infinitamente a todos, muchas gracias.

Índice

1. Introducción	3
Objetivo	4
Objetivos Particulares.	4
2. Antecedentes	5
BECM: Administración de energía y confort dentro de edificios.....	7
Edificios Residenciales.....	8
Sector Residencial	9
Sector de Oficinas.....	9
Sector Minoritario	10
Las actividades tomadas en cuenta.....	10
Ocupación en tiempo real	11
Predicción de los patrones de ocupación	11
Metodologías y Tecnologías.....	12
Justificación	13
Hipótesis.....	14
3. Desarrollo del Proyecto.....	15
Procesamiento de Señales	15
Digitalización	17
Muestro de Datos (<i>sampling</i>).....	17
Cuantificación.....	17
Codificación.	17
Software	20
Programación de Arduino	20
4. Pruebas de Laboratorio y Análisis Resultados	23
Prueba de Laboratorio 1: Cambio en la Intensidad de la Luz dentro del dominio del tiempo.	23
El Dominio de la Frecuencia.....	26
La transformada de Fourier.....	28
Transformada Corta de Fourier (STFT).....	29
Tipo de ventana y de la longitud de la ventana	30
Prueba de Laboratorio 1.2: Cambio en la Intensidad de la Luz dentro del dominio de la frecuencia.....	31

Prueba de Laboratorio 2: Diferencia en la frecuencia de Luz a partir de su naturaleza.....	41
Prueba 2.1: Medición y análisis de Luz artificial.	42
Prueba 2.2: Medición y análisis de Luz Solar.	43
Prueba 2.3: Medición y análisis de Luz Solar y Luz Artificial combinadas.....	45
Prueba 3: Reconocimiento de Actividades por medio de Luz y Potenciómetro.....	48
Prueba 3.1 Medición de Intensidad de Luz 10:00 am	52
Prueba 3.2 Medición de Intensidad de Luz 4:00 pm.....	55
Prueba 3.3 Medición de Intensidad de Luz 08:00 pm.....	58
Resumen.....	61
5. Resumen.....	63
6. Conclusiones	64
Trabajo Futuro.....	67
Bibliografía	68
Anexos.....	70

RECONOCIMIENTO DE COMPORTAMIENTOS Y ACTIVIDADES PARA EL AHORRO DE ENERGÍA EN EDIFICIOS RESIDENCIALES

José Antonio Guevara Lagunes

1. Introducción

El ingeniero industrial dentro del campo laboral e industrial representa un agente de eficiencia y optimización tanto de la productividad, como de la eficiencia y rentabilidad de los procesos, es decir, tiene la tarea fundamental de administrar, controlar, mejorar y mantener los recursos en tiempo y forma de los sistemas productivos y a su vez tener como tarea fundamental la solución de áreas de oportunidad en toda la industria y el ahorro de recursos.

La presente investigación se fundamenta en el objetivo de ahorro de energía, así como la eficiencia de la misma, basado en la creciente demanda de recursos, sumado al alto crecimiento de concientización sobre el medio ambiente y la conservación de la energía.

El comportamiento excesivo de consumo de los usuarios dentro de edificios residenciales, marca aproximadamente del 16 al 50% del consumo energético global, donde el principal impacto al gasto energético se encuentra en calefacción, ventilación, y sistemas de enfriamiento (HVAC, por sus siglas en inglés Heating, Ventilating and Air Conditioning), sistemas de iluminación y electrodomésticos.

Sumado a esto, un comportamiento consumista puede añadir un 30% al consumo de energía, mientras que un comportamiento conservador puede ahorrar un 30% del consumo total dentro de edificios residenciales.

De esta forma, el presente trabajo se enfoca en el análisis de la señal de la luz para identificar su naturaleza, así como el comportamiento de las personas en edificios residenciales, el que podría promover estrategias para el ahorro de consumo de energía, intentando responder las siguientes preguntas: ¿Cómo las actividades y comportamientos del usuario impactan en el consumo de energía para ahorros potenciales? ¿Cómo es posible reconocer dichas actividades de la manera más económica? Con el motivo de responder estas preguntas, se describirán los experimentos realizados en el laboratorio i-LAB (Innovation in Integrated Informatics Lab), en el departamento de Ingeniería Civil y ambiental, en la Facultad de Ingeniería (Viterbi School) de la Universidad del Sur de California, (USC, University of Southern California), bajo la enseñanza de la estudiante de doctorado Simin Ahmadi Karvigh, y la supervisión de la Dr. Burcin Becerik-Gerber.

José Antonio Guevara Lagunes

Objetivo

El objetivo de esta tesis es analizar la información recolectada del reconocimiento de actividades y comportamientos humanos, por medio de procesamiento de la señal de luz para lograr finalmente el ahorro de energía dentro de edificios residenciales.

Objetivos Particulares.

- Comprender conceptos relacionados al ahorro de energía.
- Comprender conceptos relacionados a la medición de señales.
- Programación de tarjetas Arduino para la obtención de alta frecuencia en obtención de datos, a partir de la digitalización.
- Transformar señal en el dominio del tiempo al dominio de frecuencias por medio del método STFT (*Short-Time Fourier Transform*).
- Generar gráficos de espectrograma para apreciación de frecuencia de señal.
- Medición de luz dentro de cuartos cerrados con luz artificial para la detección de cambios en la intensidad de la luz.
- Medir luz dentro de espacios abiertos, iluminados con solo luz natural(solar), espacios con ventanas, iluminados con luz natural y artificial, y espacios cerrados iluminados con solo luz artificial para el reconocimiento de fuente de la luz (Natural o artificial, o ambas).
- Reconocimiento de actividades por medio de señales de luz y de potencia.

2. Antecedentes

Actualmente en el siglo XXI la sociedad cada vez se vuelve más consciente con respecto al tema del impacto ambiental. Se han desarrollado investigaciones, propuestas, proyectos, etc. pero ninguno con un impacto de la misma magnitud que el consumo energético genera.

Estudios [1] demuestran que el consumo de energía se presenta en su mayoría en edificios residenciales, comprendiendo como edificio residencial a aquel ocupado u habitado por personas, como ejemplo oficinas, hoteles, departamentos, etc.

Del total de consumo de energía los edificios representan del 16% al 50% del consumo [2], más que la industria que es del 28% y más que el transporte 32% [3]. Como ejemplo en el 2010 los Estados Unidos de América, consumió 92,772 cuatrillón (10^{15}) de BTU [4], esta cantidad es 300% más que la consumida en 1949.

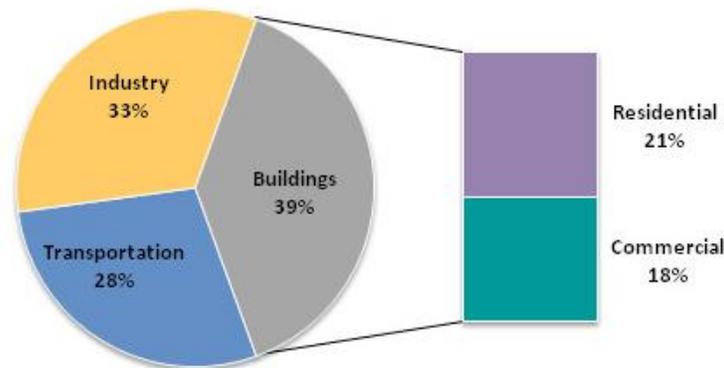


Ilustración 1: Gráfico representativo del total de consumo de energía (Edificios 39%)

Lo anterior es explicado porque los usuarios de los edificios pasan más del 90% de su tiempo en una oficina o en sus hogares, donde el mayor consumo se ve reflejado en enfriamiento, calefacción, y ventilación, el uso desmesurado de estos elementos puede añadir un 30% al consumo total de energía [5].

Para la crisis ambiental en nuestro planeta a nivel global, se piensa en electricidad de recursos no fósiles como la solución más viable al problema de consumo y medio ambiente, pero estos a pesar de ser una buena solución, también consumen recursos finitos, el desarrollo e implementación son demasiado costos, sin mencionar el espacio que se necesita para su aplicación. Como ejemplo el proyecto "Solar Tres" en España, Sevilla, tomo un área de 240,000 m² y un costo de 419 MDD [6].

Por lo que la solución más rápida y económica es la reducción de consumo de energía a través del control y administración eficiente de los recursos, especialmente dentro de los edificios residenciales, La agencia internacional de energía (*IEA por sus siglas en ingles "International Energy Agency"*) quien trabaja para asegurar la energía confiable, económica, tiene como meta la reducción del 77% del consumo mundial de carbono. [5]

Pero la pregunta es ¿Cómo? Existen más de 7 billones de personas en el mundo [7], e intentar educar y concientizar a la población con respecto al consumo y ahorro de energía, tomaría más tiempo y recursos.

De esa manera se deduce que el factor de cambio es la administración, control de los edificios y elementos que consumen energía (en su parte los usuarios), existen ya muchas instituciones enfocadas en el ahorro de consumo de energía.

El WBCSD (por sus siglas en inglés “*World Business Council for Sustainable Development*”) ha demostrado que se puede cortar el consumo de energía drásticamente, con solo cambiar el comportamiento a uno ahorrador, generando tantos ahorros como el consumo total de área de transporte 30% aproximadamente [5].

Tomar responsabilidad es de vital importancia en las actividades y comportamientos que generan consumo. Estudios demuestran que las tres actividades que consumen mayor energía son: Climatización o HVAC (por sus siglas en inglés “*Heating, Ventilating and Air Conditioning*”), luces y los enchufes eléctricos (lo que se conecte en ellos).

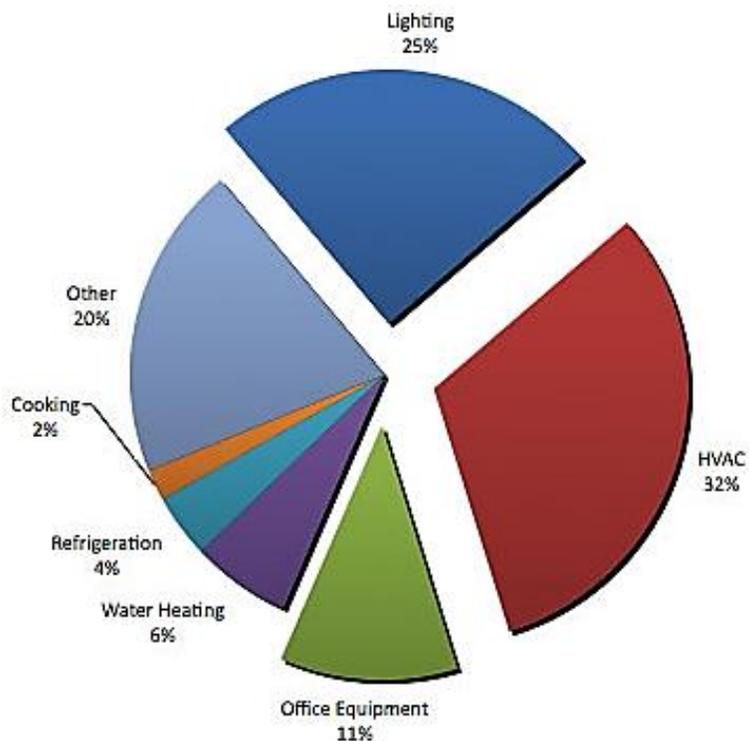


Ilustración 2: Gráfico de la distribución de energía dentro los edificios residenciales (Luz: 25%)

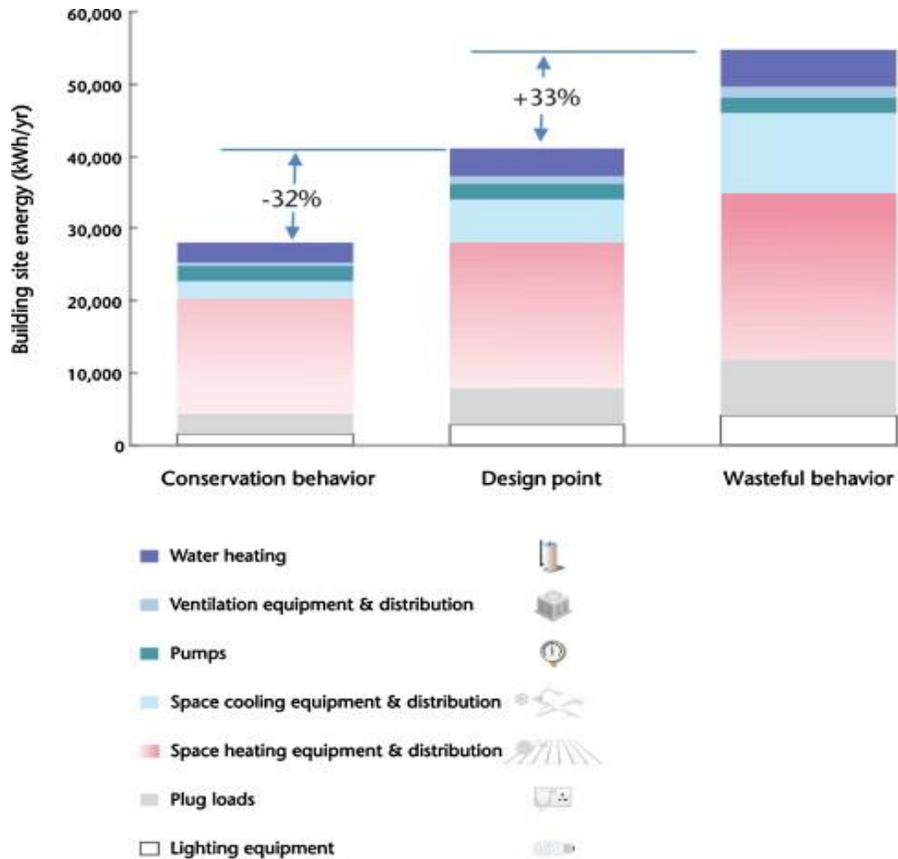


Ilustración 3: Gráfico de consumo de energía dentro de edificios según comportamiento (Comportamiento gastador: +33% de consumo normal, Comportamiento ahorrador: -32 % de consumo normal)

BECM: Administración de energía y confort dentro de edificios.

No sólo un comportamiento ahorrador y responsabilidad con nuestras acciones son requeridos para el ahorro de consumo de energía, se requiere de controlar el consumo, así como administrarlo. [8]

Los sistemas BECM (por sus siglas en ingles BECM “*Building energy and confort managment*”) se concentran principalmente en controlar y administrar las operaciones de un edificio o grupo de edificios, y como objetivo general tiene “Cumplir las necesidades y requisitos de los ocupantes con el mayor confort posible y al mismo tiempo reducir el consumo de energía durante la operación del edificio”. [9]

La implementación de este tipo de sistemas a un edificio, crea un edificio inteligente o también puede crear un edificio verde (*Green Building*).

La diferencia se puede observar desarrollando cada concepto. El edificio Inteligente tiene como función administrar, controlar, monitorear y optimizar la función del edificio. Las dos definiciones mejores aceptadas para un edificio inteligente son:

Del IBC, *Intelligent Building Group*, “Es aquel que provee un productivo y eficiente ambiente a través de la optimización de los cuatro elementos básicos los cuales son la estructura, sistema, los servicios y la administración, y su interacción entre ellos.” [10]

La EIBG, *European Intelligent Building Group*, dice, “El edificio inteligente crea un ambiente que maximiza la eficiencia de los ocupantes, mientras que al mismo tiempo permite la eficiencia del manejo de los recursos con el mínimo costo.” [11]

Se define edificio inteligente como “Aquel que está equipado con tecnología que permite monitorear sus ocupantes y sus dispositivos para diseñar, automatizar y optimizar el control de estos, con el objetivo del ahorro de energía.”

Mientras que por otra parte el edificio verde se refiere a la práctica de la creación de las estructuras y el uso de procesos que sean ambientalmente responsables y durante todo el ciclo de vida del edificio sea eficiente en el manejo de los recursos. Desde el diseño, construcción, operación, mantenimiento, renovación y demolición. El objetivo común de un edificio verde es el diseño para la reducción el impacto global al entorno, la salud humana y el medio ambiente natural mediante el uso eficiente de energía, agua, etc.

Edificios Residenciales.

Como definimos previamente los edificios residenciales son aquellos que son ocupados o habitados por usuarios y que interactúan con él. Así como estos representan del 16% al 50% en el consumo de energía. [5]

Los edificios residenciales se dividen tres sectores: sector residencial, sector de oficinas y sector minoritario. Las investigaciones relacionadas a cada sector se han realizado con base en la inversión provista, el gráfico siguiente muestra el número de estudios realizados para cada sector.

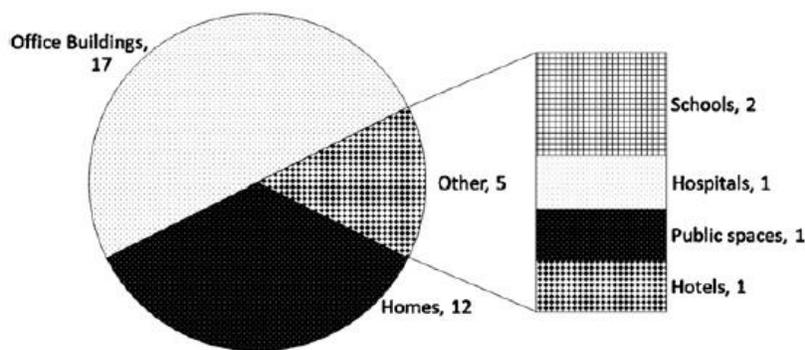


Ilustración 4: Gráfico representativo del número de estudios realizados a edificios residenciales (Oficinas: 17 estudios)

Sector Residencial.

Este sector consume más energía que el sector comercial, y es responsable de más del 40% de las emisiones de CO₂. Los sistemas HVAC es el principal contribuidor a este consumo, es decir alrededor de 60% para calentadores y aires acondicionados, 20% para calentadores de agua, 10% en luz y el otro 10% en el demás consumo. [5]

Algunos de los proyectos sobresalientes en este sector son los siguientes:

eDIANA (Embedded systems for energy efficient buildings, USA)

[12] Es una investigación donde el objetivo era desarrollar una plataforma para mejorar la eficiencia de la energía y optimizar el consumo de energía, midiendo en tiempo real integrando y controlando el consumo. De esta manera los usuarios podrán manejar la plataforma para la optimización del consumo de energía y al mismo tiempo podían expresar sus preferencias.

iSPACE (UK)

[13] Proyecto de un estudiante donde se construyó una habitación, dentro de esta se instalaron gadgets, sensores. Todos los muebles estaban equipados con instrumentos inteligentes los cuales permitían detectar el comportamiento y uso del usuario y aprender de este. Los gadgets instalados se comunicaban mutuamente permitiendo que los conjuntos de agentes coordinaran sus acciones. Los agentes podían recordar de forma inteligente los hábitos de los usuarios bajo condiciones ambientales particulares y después hacer cambios en el ambiente de acuerdo a los hábitos.

Smart House CASAS (USA)

[14] El proyecto CASAS, una investigación multidisciplinaria de la Universidad Estatal de Washington enfocado en la creación de una casa con ambiente controlado. El enfoque fue la casa inteligente como un agente inteligente que lograba percibir su medio ambiente a través del uso de sensores, y puede actuar sobre el medio ambiente mediante el uso de mecanismos automáticos.

Sector de Oficinas

En el sector comercial son los principales aportadores de consumo, y dentro de la oficina el 33% se usa para energía general, 25% para iluminación, 9% sistemas de aire acondicionado. [1] También en este sector es donde se enfocan las principales investigaciones para el ahorro de consumo de energía, relacionado con el capital de inversión.

Dentro del sector de oficinas se logran destacar los siguientes proyectos:

MAS Project (Suiza)

[15] Proyecto con la colaboración de universidades suizas, en el cual se monitoreaba y controlaba el uso de la iluminaria de un edificio de oficinas. Se localizaron dentro del edificio diversos sensores y agentes que identificaban las ubicaciones de los usuarios en el

edificio, así como sus preferencias de estancia. La información era enviada por el agente a la computadora central la cual guardaba información, y asignaba un valor o insignia a cada usuario dentro del edificio. La computadora aprendía de esta información logrando predecir la ubicación de usuario y ajustar la iluminación, obteniendo ahorros de energía.

LightWise (Irlanda)

[16]El proyecto LightWISE (por su referencia en inglés *LIGHTting evaluation through Wireless SEnsors*) el cual usaba sensores y herramientas inalámbricas para observar y medir la iluminación de una oficina. El objetivo particular era evaluar dichos sistemas de luz. Además, utilizaba sistemas de detección (sensores PIR) para la detección ocupacional de la oficina, vincular la información, para la administración dentro de la oficina.

Bode Project (USA)

[17]Proyecto de la universidad de California en EUA, el cual como objetivo tiene la medición de la ocupación, modelado y predicción de ocupación dentro de una oficina para el ahorro de energía.

Esto por medio del rastreo de usuarios estáticos o en movimiento, utilizando sensores y cámaras sensoriales. Al poder predecir la ocupación de los usuarios dentro del edificio de oficinas, esta información se utiliza para el ahorro de energía principalmente en el consumo de HVAC e iluminación.

Sector Minoritario

Los minoristas consumen el 16% de la energía en el área comercial, principalmente HVAC y luz. [1]

Entre los proyectos destacados en este sector están:

HosPilot (Europa)

[18]Proyecto iniciado en 2009, que aborda el medio ambiente con respecto al sector de hospitales en los Países Bajos, España y Finlandia. En este se instalaron y sintonizaron sistemas los cuales, comunicados entre sí, lograban una mejor climatización y entorno en el edificio del hospital.

En resumen, el principal sector enfocado en el desarrollo e innovación de nuevas tecnologías para el ahorro de consumo de energía dentro de edificios residenciales es el sector de oficinas, claramente por el nivel de capital que se maneja y se puede invertir, más que el sector minoritario como hospitales, escuelas u espacios públicos como bibliotecas.

Las actividades tomadas en cuenta

Como hemos resumido en esta introducción, la presencia de usuarios y su compartimiento dentro de los edificios han mostrado tener grandes impactos en la calefacción, refrigeración y ventilación.

La información recopilada sobre el comportamiento en tiempo real siempre se ha utilizado para el control de diversos dispositivos, como la luz artificial, aparatos de climatización, etc. Las investigaciones anteriormente mencionadas han demostrado que el uso de información en tiempo real puede tener significativos ahorros al consumo.

Al mismo tiempo, se sabe que las investigaciones recientes, se han enfocado el creciente interés de satisfacer las preferencias de los usuarios, es decir el ahorro de energía sin afectar su comodidad y mejorarla.

El papel más importante en esta relación confort-ahorro, es la predicción de ocupación dentro del edificio. Por lo tanto, la investigación presente se ha centrado en la predicción de los patrones de ocupación para el control de iluminación.

Ocupación en tiempo real

Muchas investigaciones descritas previamente, usando un sistema multi-agente buscan satisfacer las preferencias de un ocupante sólo cuando el ocupante está presente en el edificio. El sistema intenta conservar la energía de forma automática la reducción de la temperatura de la habitación cuando el ocupante no está en el edificio.

En tiempo real la información de la ubicación del usuario, por sí sola no es suficiente para una eficaz gestión del manejo de la energía y de la comodidad. Este problema es especialmente cierto para el sistema de iluminación, ya que afectan el confort visual del usuario. [1]

La razón es que la mayoría de los sensores de ocupación disponibles en el mercado tienen un tiempo de retraso para apagar las luces después del último movimiento es detectado por el sensor. Sin embargo, si el tiempo de espera es muy pequeño, la luz se apague mientras los usuarios están aún presentes, que puede ser molesto para los usuarios. Por el contrario, si el tiempo de espera es más larga de lo necesario, las luces se quedarán encendidas cuando el usuario no esté en la habitación, lo que puede resultar contrario al ahorro de energía.

Predicción de los patrones de ocupación

La predicción de patrones del usuario es sumamente importante para el control de temperatura, debido a que la frecuencia en la que varía la información en la temperatura tiene un largo tiempo de respuesta y cambio. De esta manera la predicción y la preferencia del usuario se vuelven el centro de muchas investigaciones.

Los sistemas de administración de energía AIM crea perfiles de comportamiento de los usuarios dentro del edificio y a través de un algoritmo de predicción el sistema AIM es automáticamente capaz de controlar los aparatos y dispositivos del edificio (principalmente dispositivos que se utilizan para el espacio calefacción / refrigeración, iluminación) con respecto a los hábitos de los usuarios. Cuando los usuarios cambien sus hábitos debido a acontecimientos imprevisibles, el sistema AIM detecta predicciones

erróneas, esta información se analiza en tiempo real y el comportamiento del sistema de sensores y modifica en consecuencia.

En resumen, los actuales edificios inteligentes utilizan en su mayoría información sobre ocupación controlando en tiempo real la información lo cual es muy adecuado para el sistema de iluminación. Es estimado que la energía gastada en la iluminación podría reducirse en alrededor del 50%. Como resultado, mucha investigación se centra en proponer termostatos inteligentes basados en enfoques de predicción de la ocupación.

Metodologías y Tecnologías

El reconocimiento de la actividad ha atraído una atención creciente en áreas de investigación relacionadas, tales como la computación ubicua y robótica inteligente. También es impulsado por las crecientes necesidades del mundo real en áreas tales como la vida cotidiana asistida y vigilancia de seguridad. Por lo que la implementación de tecnología moderna es de vital importancia para la eficiencia en los sistemas implementados para el control y manejo de la energía.

En su mayoría, así como en el presente trabajo, se presentan redes de sensores inalámbricos y alámbricos, para abordar el reconocimiento de la actividad del usuario. Además, la mayor parte de los proyectos hacen énfasis en el requisito de no recurrir a cualquier sensor avanzado, tales como cámaras, que son caros y generan preocupaciones, incomodidad sobre la privacidad y puede causar cambios en el comportamiento del usuario, afectando la información recolectada. [1] En su lugar, alguna instalación sencilla, sin cables, sensores binarios son favorecidos, ya que son baratos, fáciles de reequipamiento en edificios existentes, requieren poco mantenimiento y supervisión mínima, y no tienen que ser llevado o transportado.

Sensores simples se utilizan en muchos edificios inteligentes. Por ejemplo, los sensores PIR se utilizan a menudo (en especial con sistema de iluminación) para su ocupación detección. Estos sensores PIR son también sensores de movimiento simples y a menudo no pueden determinar realmente si la habitación está ocupada o no.

Por otro lado, la lógica del sistema que recopila información y datos del sensor por lo general se utiliza para detectar ocupación en tiempo real.

En el sistema previamente mencionado AIM, construye perfiles de usuario mediante el uso de un algoritmo de aprendizaje que extrae las características de los hábitos de los usuarios en la forma de distribuciones de probabilidad, la red de sensores recoge la información las 24 horas del día, recolectando información acerca de la presencia / ausencia en cada habitación de la casa en un período de tiempo (es decir, semana, mes). Al final del seguimiento, la correlación entre los datos recolectados, calcula para cada habitación de la casa agrupando datos creando perfiles para cada día, demostrando la aplicación de sistema de redes de sensores sencillos que son efectivos.

Resumiendo, en las investigaciones por el ahorro de energía y a su vez el área de gestión de la comodidad del usuario, las redes de sensores pueden jugar un papel importante al continuo al uso de energía del edificio, que establece la base de la eficiencia energética en los edificios. La red de sensores proporciona herramientas básicas para la recopilación de la información de usuario comportamiento y su interacción con los aparatos del entorno del hogar. La red de sensores también puede proporcionar un mecanismo para la identificación de usuario (de modo que los diferentes perfiles pueden ser creados para los diferentes usuarios que viven en el mismo apartamento/casa).

Las actividades del usuario y comportamientos tienen gran impacto en energía consumida en todos los sectores ya sea residenciales, oficinas o el sector minoritario. La mayor parte de la cantidad de energía consumida puede ser ahorrada por sistemas de regulación de aparatos y electrodomésticos de acuerdo con las necesidades reales. Para esto, las actividades del usuario, así como su comportamiento son esenciales para la construcción de sistemas de automatización.

En cuanto a los sistemas de iluminación, también hasta 40% [1] de esta podrían salvarse mediante la adopción de una combinación de la moderna las estrategias de control, tales como el simple uso de la luz del día, la detección ocupación en cuartos, la programación para la desconexión de sistemas de carga.

Sin embargo, la viabilidad del desarrollo de la administración y control de edificios inteligentes que se relacionen con los ocupantes y al mismo tiempo obtener ahorros de energía en tiempo real, actualmente se encuentra en desarrollo.

El presente trabajo busca crear una base para las futuras investigaciones en el área de ahorro energético, reconocimiento de actividades por medio de la señal de luz en los sistemas de iluminación en edificios residenciales.

Justificación

La constante demanda de energía, los escasos recursos y tecnologías para controlar y generar ahorros de energía ha llevado a la investigación de edificios inteligentes o edificios verdes los cuales controlan su consumo según su demanda, de los principales sistemas de gasto energético son, ventilación, calefacción, aire acondicionado, enchufes e iluminación.

En cuanto la investigación presente, se enfocará principalmente en el ahorro de iluminación. La investigación se fundamenta a que el consumo lumínico dentro de un área residencial es de alrededor del 25% del consumo total, después de la calefacción y aires acondicionados con 32%. Además, la fácil administración, manejo y control de esta facilitan el desarrollo de tecnología, lo cual es fundamental para el objetivo principal de detección de actividades y ahorro de energía, ya que debe ser eficiente en todo sentido.

Cuando nos encontramos en un edificio, puede variar la cantidad y tipo de luz que ilumina el espacio, observamos durante la mañana luz natural, en la tarde luz natural con artificial y durante la noche puramente artificial (muy poca reflexión solar de la luna, que puede ser

tomada a consideración). Por lo tanto, si se requiere tener un ahorro significativo tenemos que tomar en cuenta la cantidad de luz dentro del espacio en sus tres estados: Natural, Natural con Artificial y Luz Artificial, esto servirá para saber cuándo se tiene que consumir energía lumínica y cuando no, y así controlar el consumo obteniendo ahorros.

Sabemos también que la frecuencia de señal de luz es variable dependiendo de su naturaleza, no es similar la frecuencia emitida por el sol, que por una bombilla.

Hipótesis.

De esta forma se plantea la hipótesis que a través de la frecuencia e información obtenida de la señal de luz se podrá reconocer su naturaleza, magnitud y amplitud. Y con esta información complementada con el muestreo de datos de señales adicionales, se podrán reconocer patrones en la integración de los resultados del análisis, logrando reconocer la actividad realizada dentro de un espacio residencial.

Esta información en conjunto es de vital importancia para el desarrollo de edificios inteligentes. En resumen, la señal y arreglos de hardware, analizarán la cantidad de luz y se determinará su frecuencia para lograr encontrar un patrón entre la cantidad de luz medida, su frecuencia y las actividades realizadas para finalmente analizar la correlación y determinar si se es capaz de reconocer las actividades realizadas.

Para la ayuda de reconocimiento de actividades se utilizará un *powermeter* (potenciómetro) o medidor de potencia en los principales dispositivos de consumo de energía, al medir la potencia y la luz, se observará si existe alguna correlación entre potencia y luz en el tiempo y espacio que ayude a reconocer la actividad.

Con esta idea e hipótesis en mente, me integre al equipo de iLAB en el proyecto Interacción humano-edificio para la eficiencia de la energía (*Human-Building Interaction for Energy Efficiency*) en la Universidad del Sur de California, USC.

3. Desarrollo del Proyecto

Procesamiento de Señales

Una vez se inició la investigación fue necesaria comprender diferentes conceptos. Empezando por la luz.

La luz es una señal de radiación electromagnética que se propaga por medio de ondas en el espacio. Esta señal se puede medir, al poder ser medida se puede lograr controlar y mejorar, este es el principio básico para el ahorro de energía.

La forma de medición para la luz, es por medio de luxes o lumen, es la unidad derivada del Sistema Internacional de Medidas para la iluminancia o nivel de iluminación. Equivale a un lumen /m². Se usa en fotometría como medida de la intensidad luminosa, tomando en cuenta las diferentes longitudes de onda según la función de luminosidad, un modelo estándar de la sensibilidad a la luz del ojo humano.

$$1 \text{ lx} = 1 \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right] = 1 [\text{cd} * \text{sr}/\text{m}^2]$$

Donde lx=lux, m=metro, cd=candela y sr=estereorradián

La principal diferencia entre un lumen y un lux es su manera de aplicación, es decir:

Los lúmenes son la cantidad total de luz emitida en todas las direcciones mientras que los luxes son los lúmenes por metro cuadrado.

La intensidad de la luz varia conforme al espacio y exposición de luz a la que se encuentre, como ejemplo:

Iluminancia	Ejemplo
50 lux	Sala de una vivienda familiar
80 lux	Pasillo/cuarto de baño
400 lux	Oficina bien iluminada
400 lux	Salida o puesta de sol en un día despejado.
1000 lux	Iluminación habitual en un estudio de televisión
32.000 lux	Luz solar en un día medio

Tabla 1 Valores de Iluminancia promedio en diferentes áreas expuestas a la luz.

Comprendemos como señal a cualquier cosa que no da alguna información, por ejemplo, el semáforo lanza una señal de luz que nos indica cuando avanzar o detenernos, o

simplemente mover la cabeza de un lado a otro puede significar un gesto de negativo, esos son señales.

Las señales, se logran medir por el proceso llamado *signal processing* o procesamiento de señales, esto se refiere al proceso para extraer y reconocer la información dentro de la señal (entre otras controlar, filtrar y predicción) por medio de un sistema ya sea mecánico, electrónico o algún programa computacional.

El sistema puede obtener la información de dos maneras:

Análoga: El procesamiento de señales análogas se caracterizan por ser continuas y representadas por medios físicos (como alguna radio o TV) y se presentan en tiempo real.

Digital: A diferencia de las señales análogas las señales digitales son discretas y generadas por módulos digitales es decir son procesadas en código binario de 0 y 1, este tipo de señal es empleada por cualquier aparato computacional.

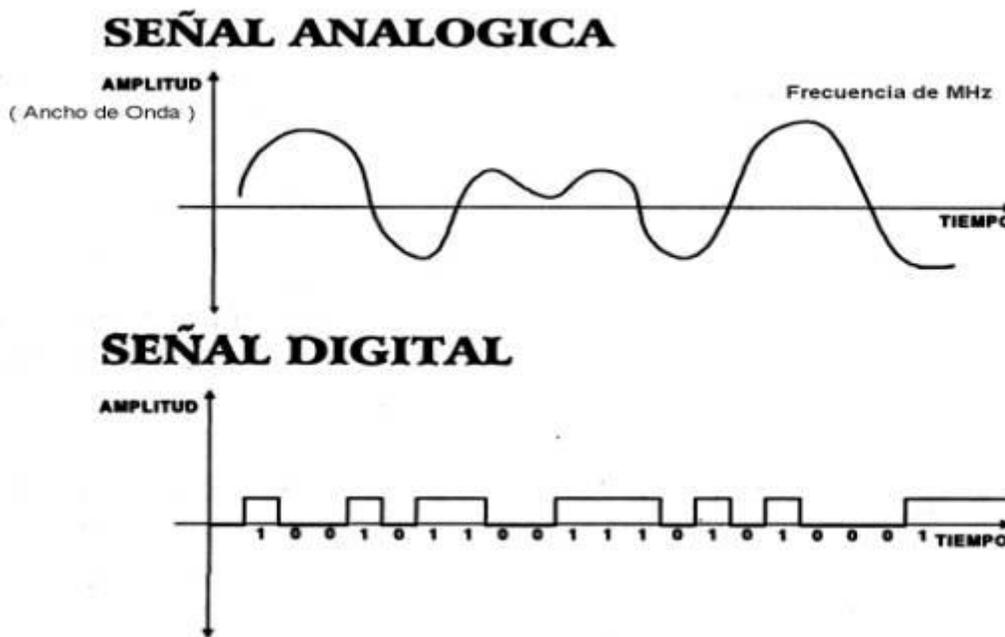


Ilustración 5 Ejemplificación de la señal analógica contra una señal digital.

Según su periodicidad, las señales se clasifican en *Periódicas* y *No Periódicas*, aquella señal que se repiten cada cierto intervalo de periodo T de la variable independiente, contrariamente las señales que no se repiten son *No Periódicas*.

Particularmente la luz, es una señal análoga no periódica, lo cual nos permite obtener información real en tiempo real, pero con la limitante de no ser el 100% efectiva en los resultados, finalmente obteniendo un aproximado.

El procesamiento de señales puede ser representado de infinidad de maneras, pero en su mayoría son gráficas de amplitud vs tiempo, los cuales muestran la variación de la señal

con respecto al tiempo medido y son de gran utilidad para observar en que tiempo se presentaron los fenómenos físicos.

Dentro del análisis análogo de señales, encontramos el procesamiento estocástico, este se refiere al procesamiento de señales variantes en el tiempo es decir procesamiento de magnitudes aleatorias (o estocásticas) las cuales cambian conforme a otra variable en este caso el tiempo.

Digitalización

Para el análisis de la señal de luz, primero se requiere adquirir información y así poder manipular la información. Para esto se tiene que pasar a un proceso de digitalización, es decir generar información controlable y cuantificable para su análisis.

La Digitalización (o conversión analógica-digital C/D o ADC por sus siglas en inglés *analogue to digital converter*) es el proceso mediante el cual un mensaje se convierte en una sucesión de impulsos eléctricos, es decir en 0's y 1's (código binario). De esta manera, toda señal es susceptible a transformarse en señal eléctrica y ser codificado digitalmente. Una vez digitalizada la señal esta puede almacenarse o transmitirse.

La digitalización consiste básicamente en tres pasos: Muestreo de Datos, Cuantificación y Codificación.

Muestro de Datos (*sampling*)

El muestreo de datos consiste en tomar muestras periódicas de la amplitud de la señal analógica. El ritmo de este muestreo es llamado frecuencia de obtención de datos, el cual determina el número de muestras que se toma en un intervalo de tiempo.

Cuantificación.

El proceso de cuantificación consiste en convertir una sucesión de muestras de amplitud continua en una sucesión de valores discretos. Durante el proceso de cuantificación se mide el nivel de voltaje o resistencia de cada una de las muestras, y se le atribuye a un valor finito (discreto) de amplitud.

Codificación.

La Codificación consiste en la traducción de los valores de tensión eléctrica analógicos que ya han sido cuantificados (ponderados) al sistema binario, de tal manera que la señal analógica queda transformada en un tren de impulsos digital (sucesión de ceros y unos).

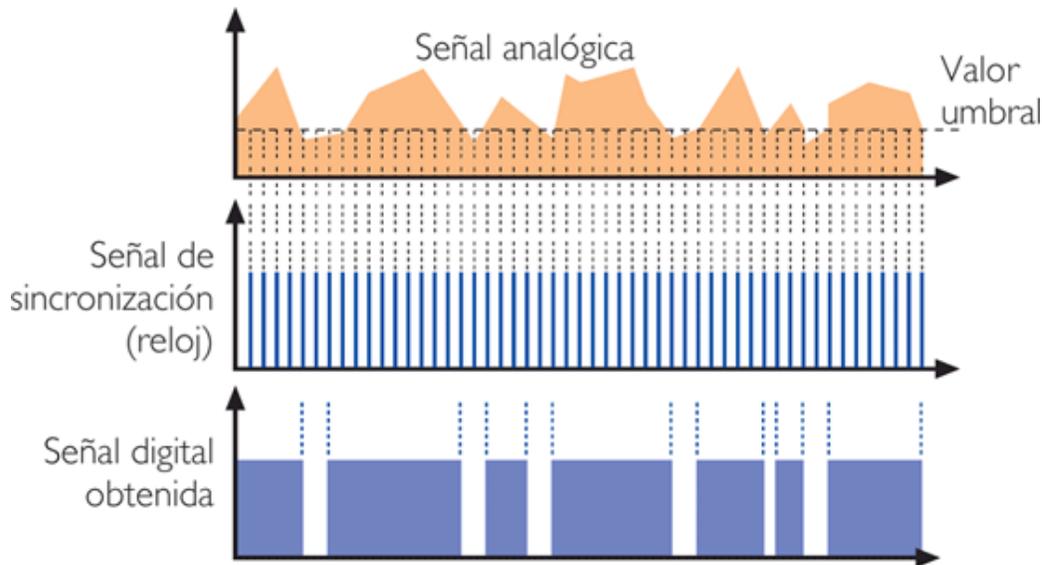


Ilustración 6. Representación de la digitalización de una señal analógica.

Este proceso se lleva a cabo por medio de un acondicionador de señales o conversor (CAD conversor analógico-digital), para este caso se usará una plataforma Arduino UNO.

Arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Esto se fundamenta en el microcontrolador.

Se tiene conocimiento de otros microcontroladores y plataformas disponibles para el propósito de conversor tales como, Parallax Basic Stamp, Netmedia's BX-24, Phidgets, MIT's Handyboard, pero las ventajas de Arduino sobre estas es precio más competitivo, además de su multiplataforma, esto se refiere a que el software se ejecuta en diferentes sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y GNU/Linux y la principal ventaja es su lenguaje de fácil programación basado en C++.

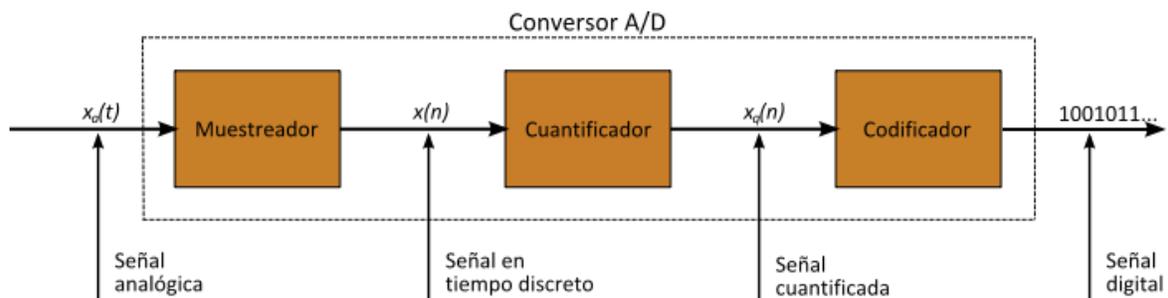


Ilustración 7. Diagrama de bloques representativo del proceso de un conversor A/D

La plataforma Arduino, por sí solo, no puede recibir señales analógicas, parte de sus funciones es convertir esta señal en digital y es por eso que cuenta con entradas y salidas para su transmisión.

Para la recepción de señales de luz, usaremos sensores.

Los sensores son dispositivos capaces de convertir una magnitud física (analógica), como luz, temperatura, la presión, etc. Por medio de una diferencia de potencial o una variación de resistencia. Es decir, realizan una conversión de energías y suministran información sobre el estado y tamaño de la magnitud.

Particularmente, se usará el sensor AMBI (GA1A1S201WP) (*Ambient Light Sensor*), este sensor de luz, responde a los cambios fotoeléctricos es decir a los cambios de intensidad de la luz, dando como respuesta una variación de resistencia la cual es digitalizada por la plataforma de Arduino.

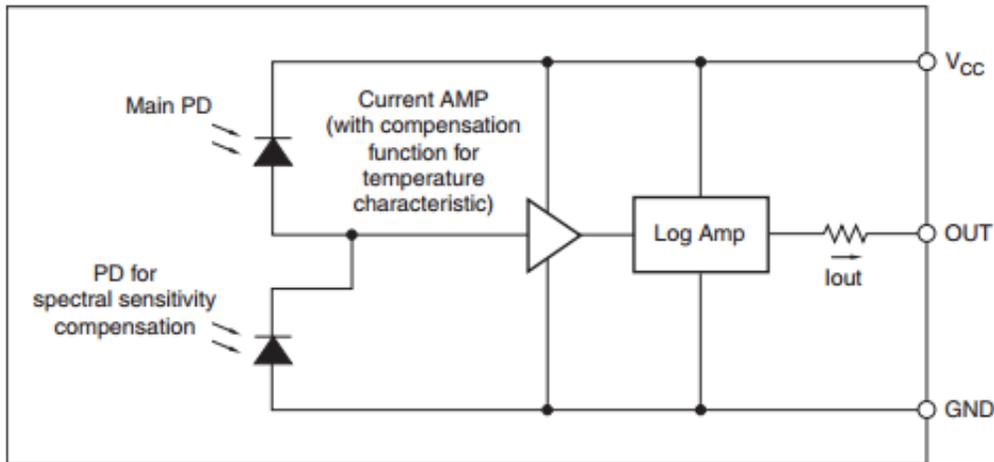


Ilustración 8 Diagrama de bloques del sensor de luz AMBI

Armando toda esta información en conjunto se logrará un análisis completo de la señal de luz, para su posterior análisis.

Algunas plataformas Arduino fueron sustituidas por microcontroladores DiamondBack, funcionando de la misma forma que un Arduino, pero a su vez más económico.

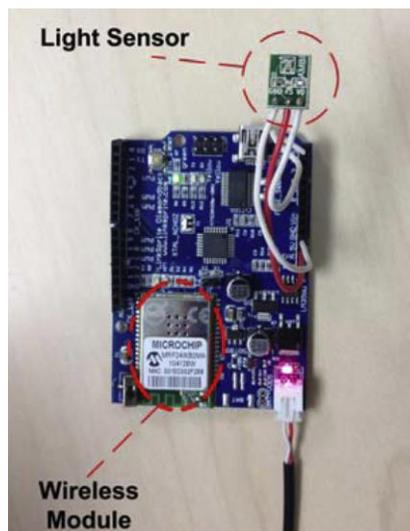


Ilustración 9 Microcontrolador DiamondBack y sensor de luz AMBI.

Software

La cantidad de información obtenida de la plataforma Arduino y los sensores debido a la frecuencia de obtención de datos (1kHz) será de miles de datos por segundo, por lo que una simple hoja de cálculo no sería eficiente de emplear para su análisis, por lo que se empleará softwares especialmente diseñados para el procesamiento de estas.

El primer software empleado es un sistema de programación y cálculo basado en la manipulación de matrices, en cual su principal función es el cálculo numérico y su representación gráfica, este a su vez soporta grandes cantidades de información, especializado en el procesamiento de señales.

Adicionalmente también el segundo software empleado es una aplicación especializada para análisis de datos y generación gráfica, siendo esta la más empleada debido a su sencillez de uso para analizar la señal espectralmente.

Programación de Arduino

La programación de la plataforma, se fundamentó en la frecuencia de datos requeridos para el análisis, se estableció una frecuencia de 1kHz (1000 datos por segundo) para observar los milisegundos exactos en los que la intensidad de la luz cambia dentro del cuarto.

Las primeras programaciones formulados fueron en función probar el funcionamiento del hardware a implantar, se probó el sensor de luz y la plataforma, además de las primeras medidas de frecuencia de obtención de datos y valor promedio de la luz en un laboratorio en ambiente controlado.

Obteniendo una seriación de datos variantes entre los valores 655 [lx] y 665 [lx] de intensidad de luz con una frecuencia de 1 Hz, el sensor y la plataforma funcionaron correctamente.

Después de una serie de pruebas se determinó que el almacenamiento de la información sería más manejable y eficiente si se guardara de manera automática en una tarjeta SD, además de mejorar la frecuencia debido a la impresión y velocidad de la información se grababa en el monitor. Como objetivo se tenía 1 kHz y ser grabada toda esta información ordenadamente en una placa SD (*SDcard shield*).

Se añadió la placa SD de la siguiente manera:

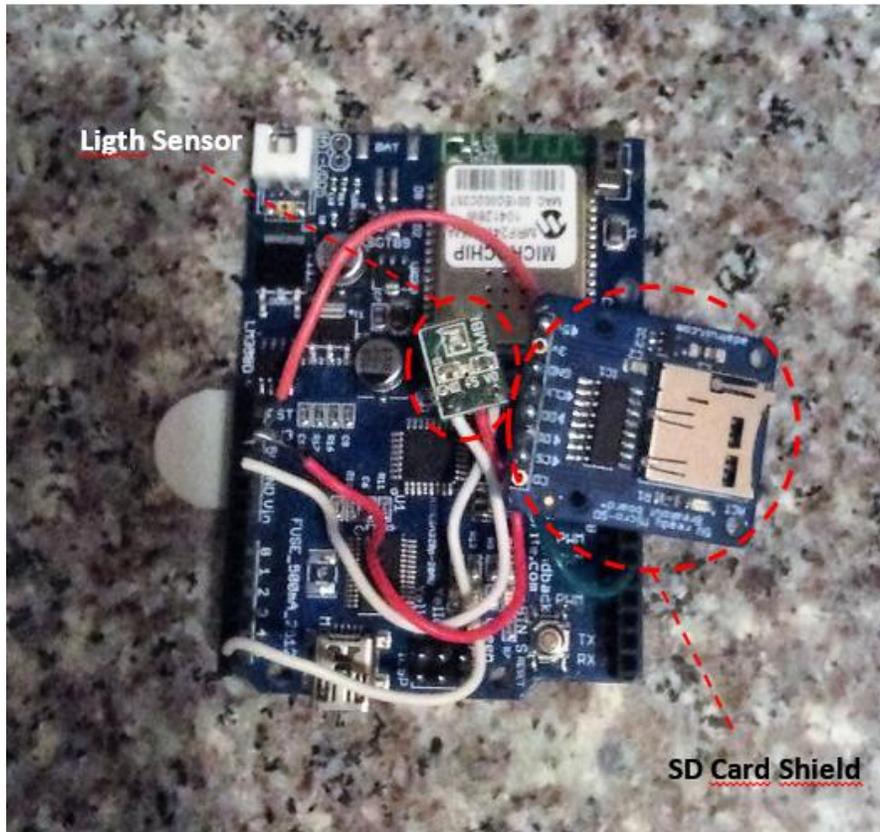


Ilustración 10 Plataforma DiamonBack con sensor de luz AMBI y placa para tarjeta SD

Una vez adaptada la placa el objetivo era la obtención de una mayor frecuencia obtención de datos, de 1kHz, para la adquisición de información precisa de los cambios de la intensidad de luz, por lo que se eliminaron ciertas restricciones del programa.

La función *delay* en el programa corresponde directamente a la frecuencia de los datos, es decir un *delay (1000)* proporciona un dato cada segundo o sea 1Hz, por lo tanto, un *delay (100)* nos dará 10Hz y de la misma manera un *delay (1)* nos dará una frecuencia de 100Hz.

Consecuentemente el programa requería añadir la parte informática de la plataforma de memoria SD. Se agregaron las librerías <SD.h> para usar los comandos de la tarjeta y la librería <SPI.h> (*Serial Peripheral Interface*) este es un protocolo de datos en serie el cual sirve para comunicarse con uno o más dispositivos periféricos rápidamente en distancias cortas, lo cual añadirá frecuencia de datos al programa.

De esta forma se compilo el programa que consistía en primeramente añadir las bibliotecas de comandos para que el programa lograra compilar sin ninguna restricción, asignar las variables necesarias, verificar que la placa SD estuviera conectada de manera correcta y que se pudiera grabar en ella, iniciar una cadena de datos en serie (*string*) y cada 100 datos grabar sobre la tarjeta, este ciclo terminaría después del tiempo determinado para el experimento cortando la alimentación eléctrica.

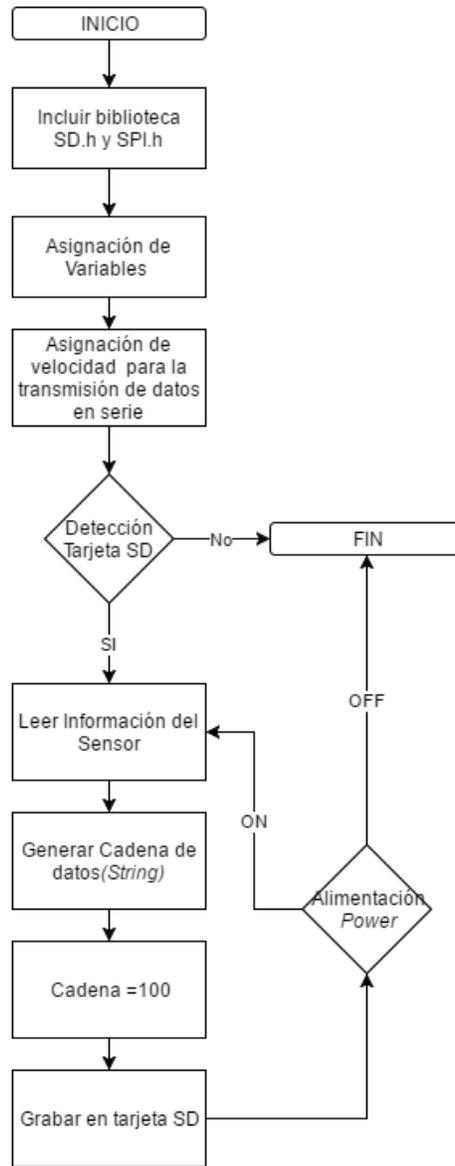


Ilustración 11 Diagrama de flujo del programa Arduino para la obtención de datos de sensor de luz AMBI y almacenar información en tarjeta SD

Usando este programa, y obteniendo los datos de la tarjeta SD, se calculó una frecuencia de datos máxima de 700 Hz, no alcanzando el objetivo de 1 kHz, pero para el objetivo de observación y detalle de cambios en la intensidad de la luz, se consideró suficiente, por lo que se ajusta el proyecto a la obtención de datos en una frecuencia de 700Hz.

Se realizaron series de pruebas, para comprobar la frecuencia del arreglo de hardware y software, en todas las frecuencias de obtención de datos promedio resulto en 700Hz, valor que se usara en las pruebas de laboratorio.

4. Pruebas de Laboratorio y Análisis Resultados

Prueba de Laboratorio 1: Cambio en la Intensidad de la Luz dentro del dominio del tiempo.

Después de las pruebas piloto realizadas dentro del laboratorio en un ambiente controlado, se propuso la medición de luz variando su intensidad para observar los cambios de intensidad con respecto al tiempo, lo cual permitiría determinar la relación de intensidad y consumo de energía, a su vez se mediría cualitativamente el confort de los usuarios dentro del cuarto, con el objetivo de observar que intensidad es la correcta para realizar sin problema las actividades.

Dentro del laboratorio se contaba con un arreglo de 18 luces de focos tubulares de 32 W, distribuidas uniformemente, conectados a tres interruptores que controlaban la iluminación interna.

Se determinaron 5 estados controlados en los que variaría la intensidad de luz dentro del cuarto por el periodo de 1 hora 10 minutos.

Estado 1: Luces Apagadas: 0 focos durante 5 min.

Estado 2: Luces Encendidas: 18 focos por 20 min.

Estado 3: Luces Encendidas: 12 focos por 20 min.

Estado 4: Luces Encendidas: 6 focos por 20 min.

Estado 5: Luces Apagadas: 0 focos durante 5 min.

Usando el Arduino pre programado con el sensor de luz y la placa SD, se inició el experimento, y vario la luz durante una hora diez minutos, arrojando los siguientes resultados.

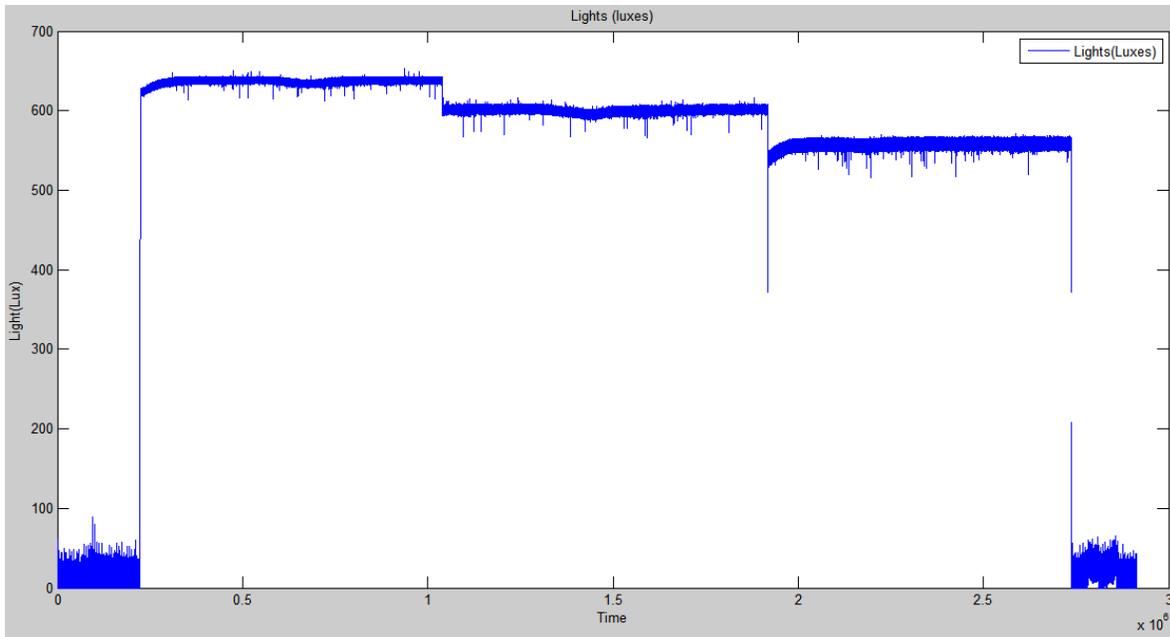


Ilustración 12 Gráfica de prueba 1 intensidad de la luz variable durante 1 hora 10 minutos

Como se puede observar en la gráfica, la intensidad es variable dentro del tiempo establecido a una sola intensidad de luz, ejemplo, está variando de 0 a 90 cuando las luces están constantemente apagadas, esta variabilidad es debido a que la señal se encuentra en el dominio del tiempo mostrando perturbaciones en la señal, es decir ruido dentro de la señal.

Para los 5 usuarios dentro del laboratorio también se postularon 3 estados de confort: Malo, Regular, Bueno. De esta forma sabremos que intensidad es la correcta para trabajar dentro del laboratorio

Con los 5 estados previos medimos la intensidad de luz, y varía de la siguiente manera:

Estado	Tiempo	Focos	Intensidad[lx]	Confort (Prom)
1	5 min	0	0 a 90	Malo

Los valores de 90 lx durante esta primera fase, se piensa que son provenientes de la luz emitida artificialmente por algún monitor o luz led de los alimentadores de computadores y dispositivos móviles. El confort es totalmente malo, siendo algo lógico al no a ver ni un foco encendido.

Estado	Tiempo	Focos	Intensidad[lx]	Confort (Prom)
2	20 min	18	611-652	Bueno

Durante este estado, la intensidad rumbo entre 611 y 652 lx, que es un número considerable para un laboratorio, ya que este valor normal para una oficina oscila entre los 400 lx y 500 lx. Una observación notable es la transición de intensidad lumínica en el

cuarto, ya que durante esta transición el primero valor de intensidad es de 398 lx a 501 lx, antes de normalizar y variar entre 611 y 652 lx.

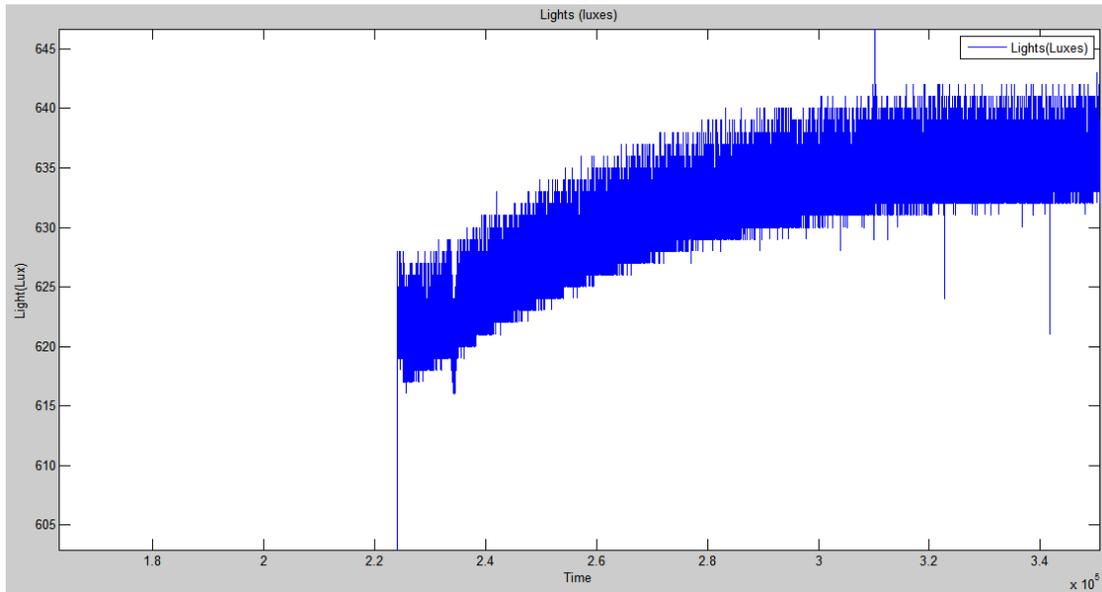


Ilustración 13 (acercamiento) Acoplamiento de intensidad de luz en el estado 2

Para darle razón lógica a este acoplamiento exponencial de intensidad de luz, se puede pensar en un retraso en el cambio de luces, es decir de 0 a 18 focos o en la lectura del sensor.

Mientras para el estado de confort es bueno, debido a que se suele trabajar a diario con esa cantidad de luminosidad.

Estado	Tiempo	Focos	Intensidad[lx]	Confort (Prom)
3	20 min	12	594 -615	Bueno

La luminosidad que dan los 12 focos tubulares dentro del laboratorio es de buena calidad, permite hacer cualquier actividad sin ningún problema, este inmediatamente es opción de ahorro de energía al tener una diferencia de aproximadamente 50 lux, no representa físicamente gran diferencia para los usuarios.

Estado	Tiempo	Focos	Intensidad[lx]	Confort (Prom)
4	20 min	6	547 -568	Regular

Al pasar a esta fase, se tuvo un segundo de cero luces, por lo que volvemos a observar la transición curvada de 0 luces a luz a pesar que es menor la intensidad, se sigue percibiendo esta. La calidad se vio disminuida junto con la visibilidad, aunque no fue imposible, si difícil de permitir el trabajo.

Estado	Tiempo	Focos	Intensidad[lx]	Confort (Prom)
5	5 min	0	0-87	Malo

La última fase es muy similar a la primera esta tuvo lugar para cerrar el ciclo y observar el cambio en viceversa de luz a 0 luces.

Hasta ahora se ha manejado todo en el dominio del tiempo y hablado de la frecuencia de obtención de datos. El dominio temporal (tiempo) como observamos previamente nos muestra la evolución de la señal sinusoidal durante un periodo de tiempo, observando los cambios en la intensidad, pero a su vez como desventajas, se observa una gran cantidad de turbulencia o ruido en la señal.

El ruido combinado con la señal provoca cambios en la amplitud provocando una mala lectura de esta, de la misma forma si se quisiera transferir a una medición no controlada, es decir un ambiente real de una señal poco variante y constante, como ejemplo la luz de sol o la luz en un cuarto, sería muy difícil observar los cambios exactos por medio de la amplitud en el dominio del tiempo, por lo que se puede manejar desde otro factor de la señal, que sea más exacto eliminando el ruido y cualquier otra señal involucrada, esto se puede observar por la frecuencia de señal.

El Dominio de la Frecuencia.

Como se sabe la señal análoga sinusoidal, se conforma por tres elementos: amplitud, frecuencia y fase. La muestra de una señal obtenida desde el dispositivo de adquisición de datos constituye la representación en el dominio del tiempo de la señal. Algunas medidas, como ruido o distorsión armónica, son difíciles de cuantificar al inspeccionar la forma de onda del tiempo. En el dominio temporal como se ha estado trabajando se maneja los cambios de amplitud con respecto al tiempo, pero cuando queremos observar la fase, frecuencia y amplitud, es requerido cambiar de dominio de la frecuencia.

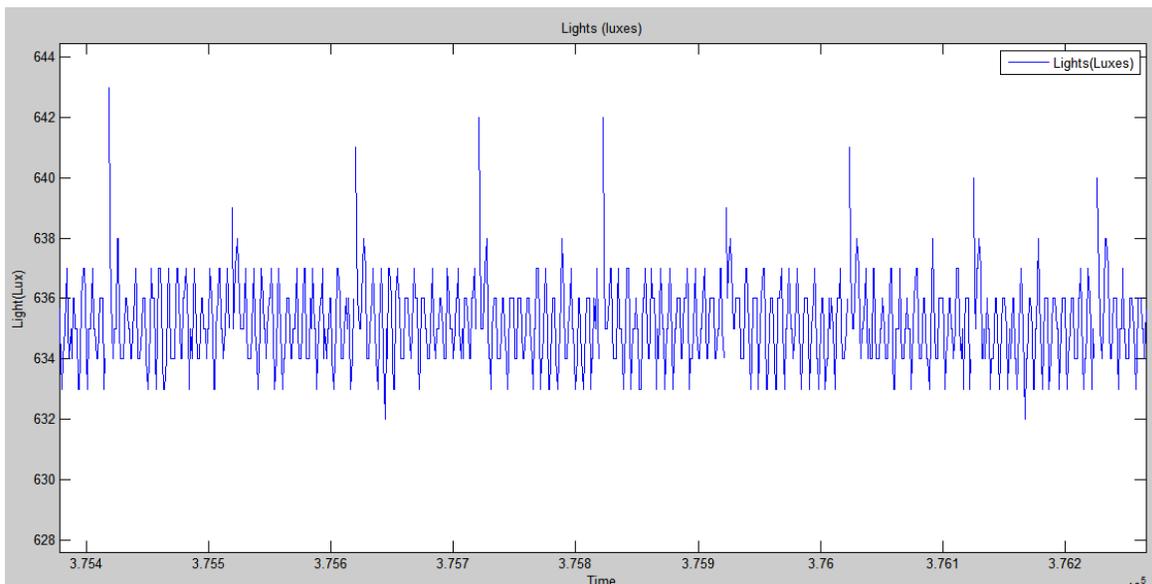


Ilustración 14 Señal sinusoidal de luz, en el dominio del tiempo.

Observando la gráfica posterior, de una señal continua de luz, es difícil identificar los cambios exactos de amplitud, vemos que algunos eventos que se traslapan y que son confusos en el dominio de tiempo, los mismos elementos están separados en sus componentes individuales en el dominio de la frecuencia. La forma de la onda de vibración contiene una gran cantidad de información que no es aparente. Parte de la información está en las componentes de nivel muy bajo de magnitud, estos elementos que puede ser menor que la línea de la gráfica de onda, es decir: Los efectos individuales se identifican de manera más fácil en el dominio de las frecuencias.

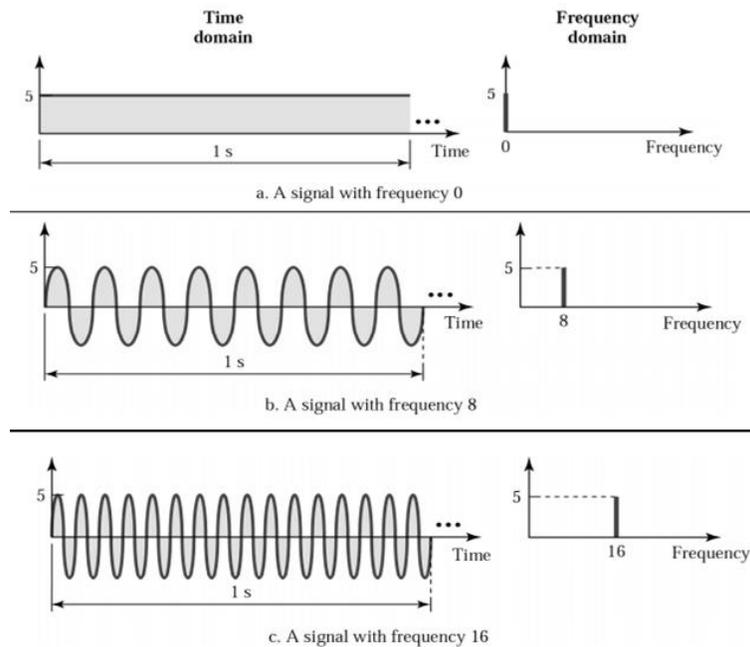


Ilustración 15 Ejemplificación de cambio del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

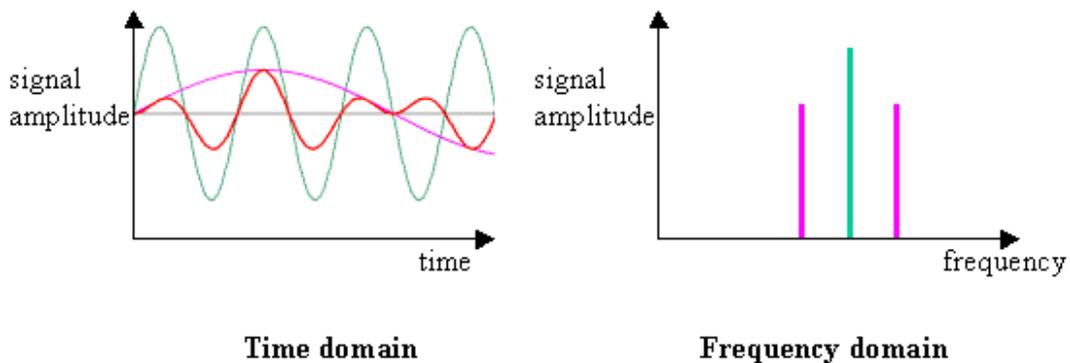


Ilustración 16 Segregación de señales cambiando del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

En el dominio de frecuencia, puede separar conceptualmente las ondas sinusoidales que añaden para formar la señal compleja en el dominio del tiempo. La Figura posterior

muestra los componentes de la frecuencia, los cuales se separan en el dominio del tiempo, como impulsos distintos en el dominio de frecuencia. La amplitud de cada línea de frecuencia es la amplitud de la forma de onda del tiempo para este componente de frecuencia. La representación de una señal en términos de sus componentes de frecuencia individuales es la representación de la señal en el dominio de frecuencia. La representación del dominio de frecuencia podría proporcionar más comprensión sobre la señal y el sistema en el que fue generada.

El proceso por el cual se puede cambiar de un dominio temporal al dominio frecuencia, se conoce como transformada de Fourier.

La transformada de Fourier.

La transformada de Fourier se encarga de transformar una señal del dominio del tiempo, al dominio de las frecuencias. Esta idea parte del teorema *“que cualquier señal continua y periódica puede ser representada como la suma de series de ondas sinusoidales”* es decir que permiten demostrar señales sinusoidales que representan el envío de datos por medios de transmisión eléctricos. A partir de este teorema se generan las series de Fourier que se representan como una suma infinita ponderada de senos y cosenos para funciones periódicas, mientras para las funciones no periódicas la representación se da por medio de la transformada de Fourier.

Si una función continua $f(t)$ es periódica con periodo T , entonces se puede aproximar arbitrariamente bien mediante una serie de Fourier

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi nt/T) + b_n \text{sen}(2\pi nt/T)]$$

Donde los coeficientes de Fourier son:

$$\begin{cases} a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(2\pi nt / T) dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \text{sen}(2\pi nt / T) dt \end{cases} \quad n \geq 1$$

$$\text{mientras que } a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt.$$

La idea básica de las series de Fourier es que toda función periódica de periodo T puede ser expresada como una suma trigonométrica de senos y cosenos del mismo periodo T .

Particularmente, para la señal de luz análoga no periódica, usaremos la transformada de Fourier.

Sea $f(t)$ una función integrable sobre \mathbb{R} $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty$ su transformada de Fourier es la función

$$\mathcal{F}[f]: \omega \rightarrow F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

Si la transformada de Fourier de f es una función integrable, la fórmula de dicha transformada inversa de Fourier se comprende como la operación notada \mathcal{F}^{-1} , permite encontrar f a partir de

$$f(t) = \mathcal{F}^{-1}[F(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{+i\omega t} d\omega$$

La variable t corresponde al tiempo y la variable ω a la frecuencia. Se dice que $f(t)$ está en el dominio del tiempo y que $F(\omega)$ está en el dominio de la frecuencia.

Se realizaron pruebas sin éxito al aplicar la transformada de Fourier, transformada rápida de Fourier, y esto es debido a que la señal no periódica tiene un periodo finito de tiempo, y presenta ciertas limitaciones y distorsiones en el análisis de la transformada de Fourier.

La transformada de Fourier expresa una señal como una suma de sinusoides. Debido a que el tiempo de duración de las sinusoides es infinito, la transformada de Fourier de la señal refleja el contenido espectral de una señal de todo el tiempo, pero no indica cuando se produce el contenido espectral. En algunos casos, la evaluación del contenido espectral de una señal a través de una escala de tiempo corto puede ser útil.

Por lo que, con el fin de eliminar la independencia temporal de la transformada de Fourier, y evaluar el contenido espectral en escalas de tiempo cortas, al tener una señal variante en el tiempo, se usara la transformada corta de Fourier o por sus siglas en ingles *Short-Time Fourier Transform (STFT)*.

Transformada Corta de Fourier (STFT)

La transformada corta de Fourier, (STFT) es un método de tratamiento de la señal utilizada para el análisis de señales no estacionarias, cuyas características estadísticas varían con el tiempo. En esencia, STFT extrae varios tramos de la señal a analizar con una "ventana" que se mueve con el tiempo. Si la ventana de tiempo es suficientemente estrecha, cada trama extraído puede ser vista como estacionario de modo que la transformada de Fourier se puede utilizar en cada venta. Con la ventana en movimiento a lo largo del eje de tiempo, la relación entre la variación de la frecuencia y el tiempo puede ser identificado.

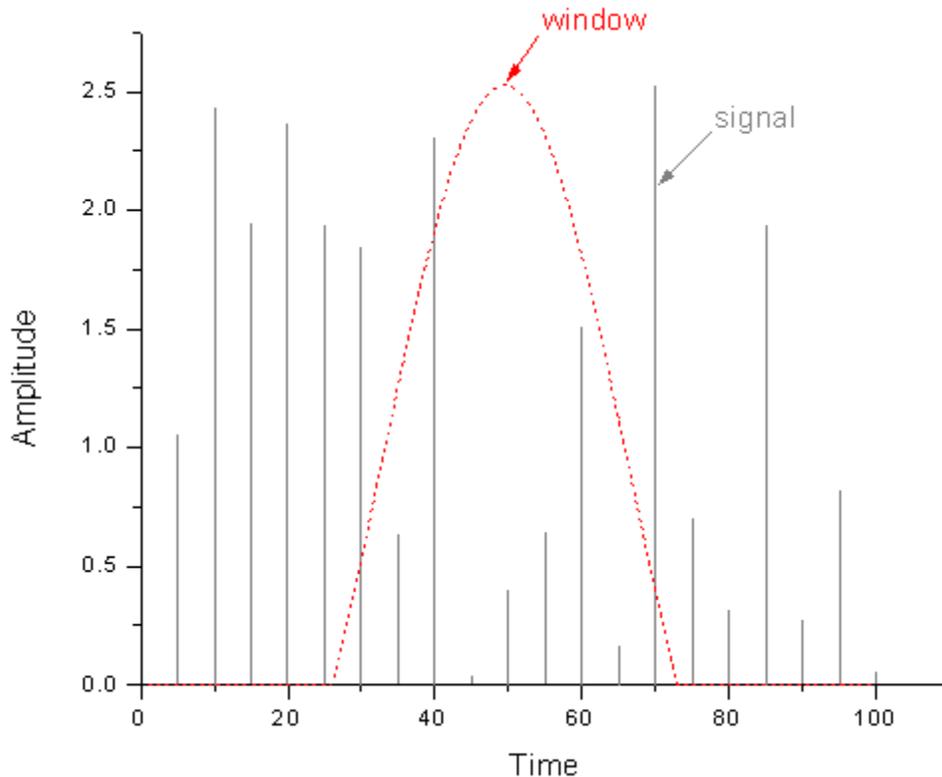


Ilustración 17 Ejemplificación de la ventana móvil en el análisis STFT

Adicionalmente, la STFT, también llamada la transformada de Fourier de ventana deslizante, parte de la señal de entrada en dominio de tiempo en varios bloques superpuestos multiplicando la señal con una función de ventana y luego se aplica la transformada de Fourier discreta a cada bloque.

Las funciones de la ventana, también llamadas ventanas corredizas, son funciones en las que la amplitud se estrecha gradualmente y suavemente hacia cero en los bordes. Debido a que cada bloque ocupa diferentes períodos de tiempo. La STFT resultante indica el contenido espectral de la señal en cada periodo de tiempo correspondiente. Cuando se mueve la ventana deslizante, se obtiene el contenido espectral de la señal en diferentes intervalos de tiempo. Por lo tanto, la STFT es una función del tiempo y la frecuencia que indica cómo el contenido espectral de una señal evoluciona con el tiempo. Las magnitudes de los coeficientes de STFT forman un espectro de magnitud de tiempo-frecuencia, y las fases de los coeficientes de STFT forman un espectro de tiempo-frecuencia de fase.

Tipo de ventana y de la longitud de la ventana

La resolución de tiempo-frecuencia de la STFT se define como el producto de la resolución de tiempo y la frecuencia. El tipo de ventana que utiliza afecta a la resolución de tiempo-frecuencia de la STFT. La ventana Blackman tiene la resolución de tiempo y frecuencia óptima.

La longitud de la ventana también afecta a la resolución de tiempo y la resolución de frecuencia de la STFT. Una estrecha ventana da como resultado una resolución de tiempo bien, pero una resolución de frecuencia gruesa porque las ventanas estrechas tienen una duración de tiempo corto, pero un gran ancho de banda.

Una ventana de ancho da como resultado una resolución de frecuencia bien, pero una resolución de tiempo gruesa porque las ventanas anchas tienen una duración de tiempo largo, pero un ancho de banda de frecuencia estrecha. Este fenómeno se denomina el efecto ventana. La mejor ventana de longitud depende de las características de la señal que se desea analizar. La longitud de la ventana debe ser lo suficientemente pequeña para que el bloque de señal de ventana es esencialmente estacionario durante el intervalo de ventana y lo suficientemente grande para que la transformada de Fourier del bloque de señal de ventana proporciona una resolución de frecuencia razonable.

Para una señal de tiempo discreto $x[n]$, la STFT está dada por la ecuación:

$$\text{STFT} \{x[n]\} \equiv X(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]w[n-m]e^{-j\omega n}$$

Donde, $x[n]$ es la señal y $w[n]$ es la ventana deslizante. En este caso m es discreta y ω es continua.

La magnitud cuadrada de la STFT origina el espectrograma de la función:

$$\text{espectrograma} \{x(t)\} \equiv |X(\tau, \omega)|^2$$

Prueba de Laboratorio 1.2: Cambio en la Intensidad de la Luz dentro del dominio de la frecuencia.

Con el uso de los softwares especializados en procesamiento de señales se procesó la información previamente obtenida del laboratorio, se analizó en el dominio del tiempo.

En el análisis en el dominio de frecuencia, se buscan cambios en la amplitud de frecuencia que muestren con exactitud el tiempo del evento.

Se estableció para el análisis, el tiempo en el eje X y la luminancia de la luz en el eje Y, un tamaño de ventana de 256, esta elección es fundamentada en mientras más corta la ventana realizando TF (transformada de Fourier), más exacto y claro será el resultado.

Para el tipo de ventana, debido a la muestra $N= 2,884,357$ datos una frecuencia de aproximadamente 700 Hz, la ventana por selección es de tipo Blackman-Fenster. Esta se representa de la siguiente manera:

$$w[n] = 0.432 - 0.5 \cos\left(\frac{w\pi n}{N-1}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$$

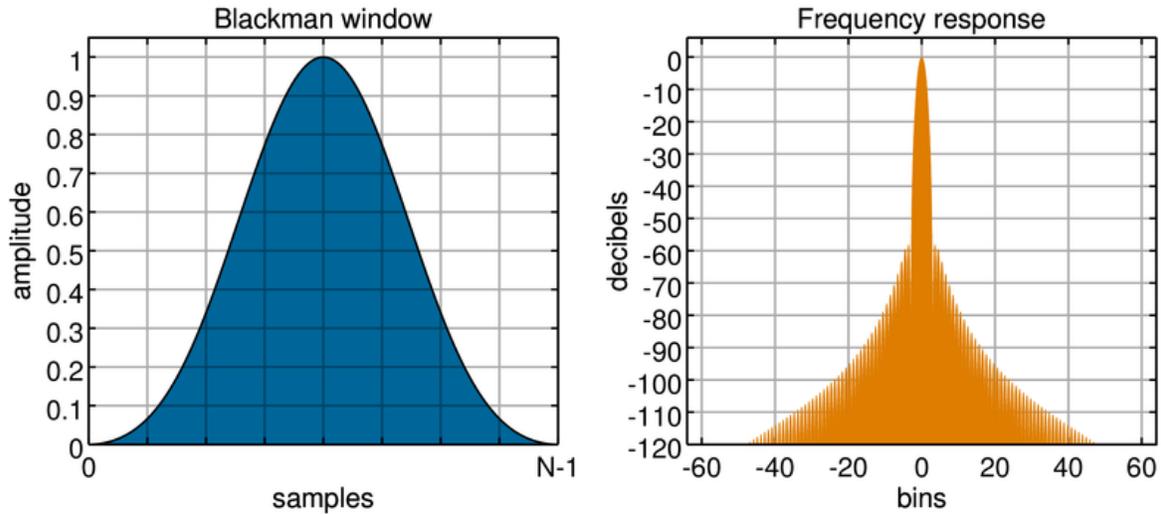


Ilustración 18 Ejemplo de análisis con venta tipo Blackman

La configuración final del análisis se muestra de la siguiente manera:

Specify By	Interval	▼
Sampling Interval	0.001428571	<input checked="" type="checkbox"/> Auto
FFT Length	256	▼
Window length	256	<input checked="" type="checkbox"/> Auto
Overlap	128	<input checked="" type="checkbox"/> Auto
Window Type	Blackman	▼
Window Correction	Amplitude	▼
Option	Amplitude in dB	▼

El intervalo de muestreo se calcula por medio de la frecuencia, se obtuvieron 2,884,357 datos en 70 minutos, es decir que la frecuencia promedio fue de 687 Hz, por lo que cada dato adquirido se dio cada 0.001428571 segundos.

Se aplicó la Transformada corta de Fourier obteniendo los siguientes resultados:

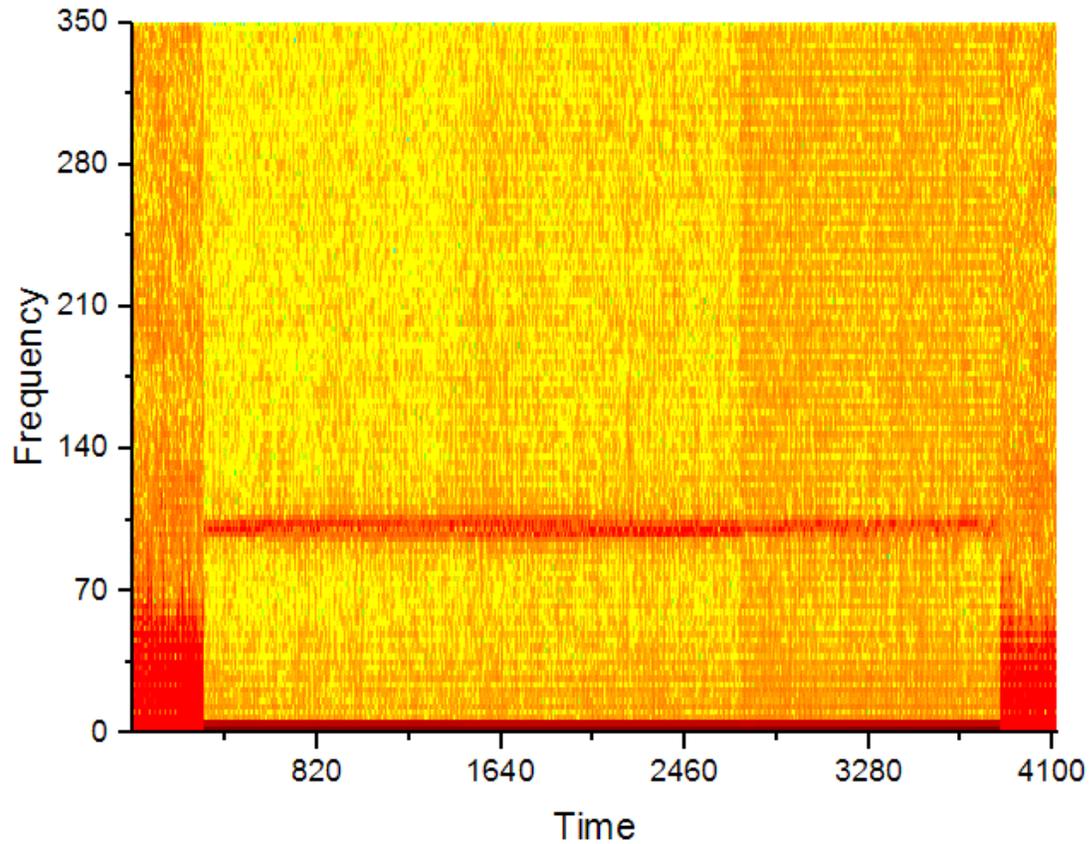


Ilustración 19 Espectrograma de frecuencia de prueba laboratorio 1.

Observando la gráfica, se denota una frecuencia dominante de aproximadamente de 100 a 105 Hz, filtrando la única señal existente, esta corresponde a la frecuencia de la luz en el laboratorio. Al ser una misma señal no se observan grandes cambios en la frecuencia a lo largo del tiempo, son los cambios en la amplitud que denotan los cambios de estado, como se puede observar en el gráfico siguiente:

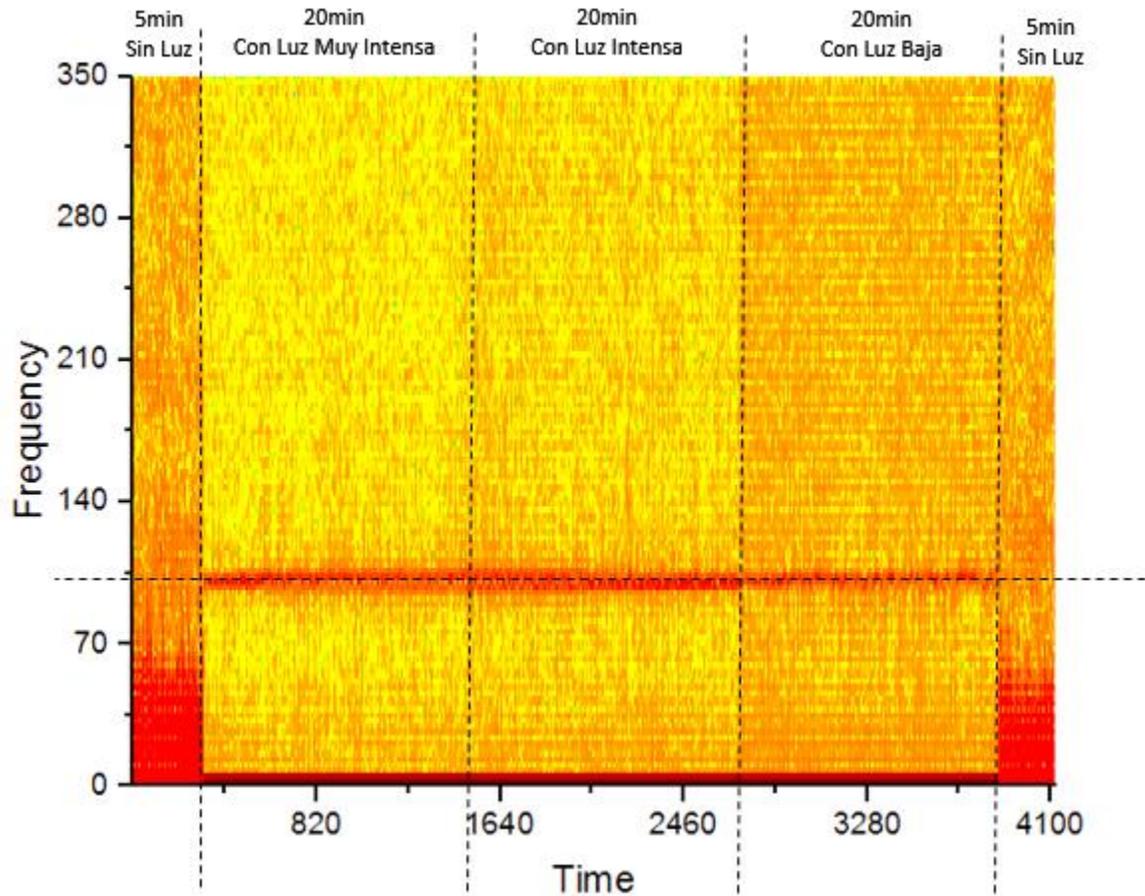


Ilustración 20 Estados de prueba 1 en gráfico de frecuencia.

Gracias a los cambios de la frecuencia se delimito el área donde se cambia de estado de iluminancia, un análisis más profundo para a la transformada corta de Fourier se realizará para observar los pequeños cambios en la amplitud y frecuencia dentro del espectrograma de señal de 100Hz.

Del resultado del procesamiento de señal por STFT se obtiene una serie de datos que gráficamente se pueden representar en 3 dimensiones, frecuencia, tiempo y amplitud:

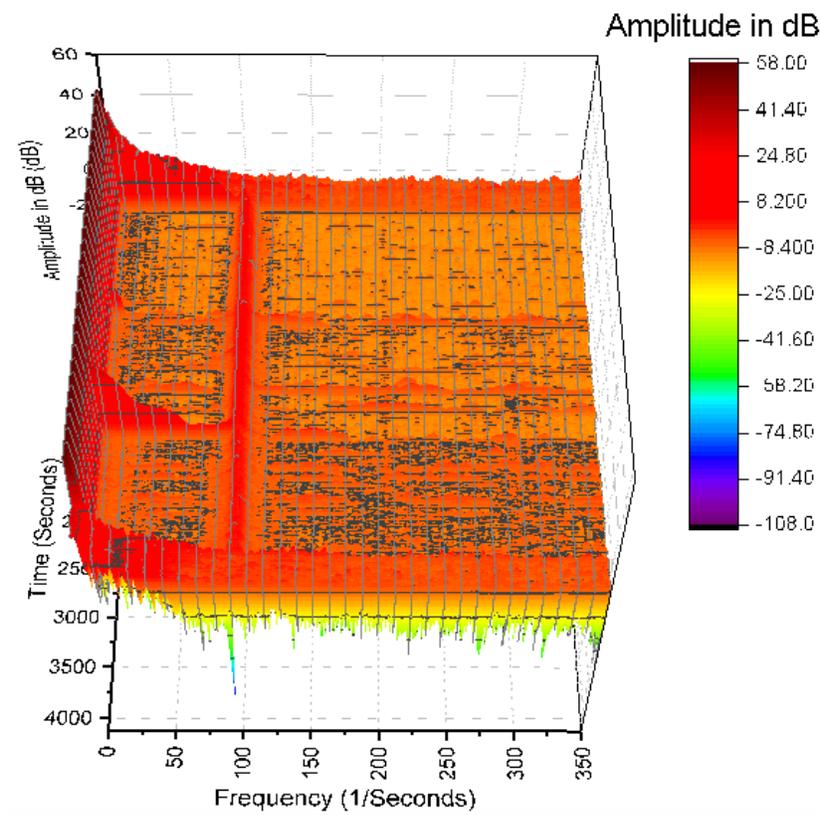
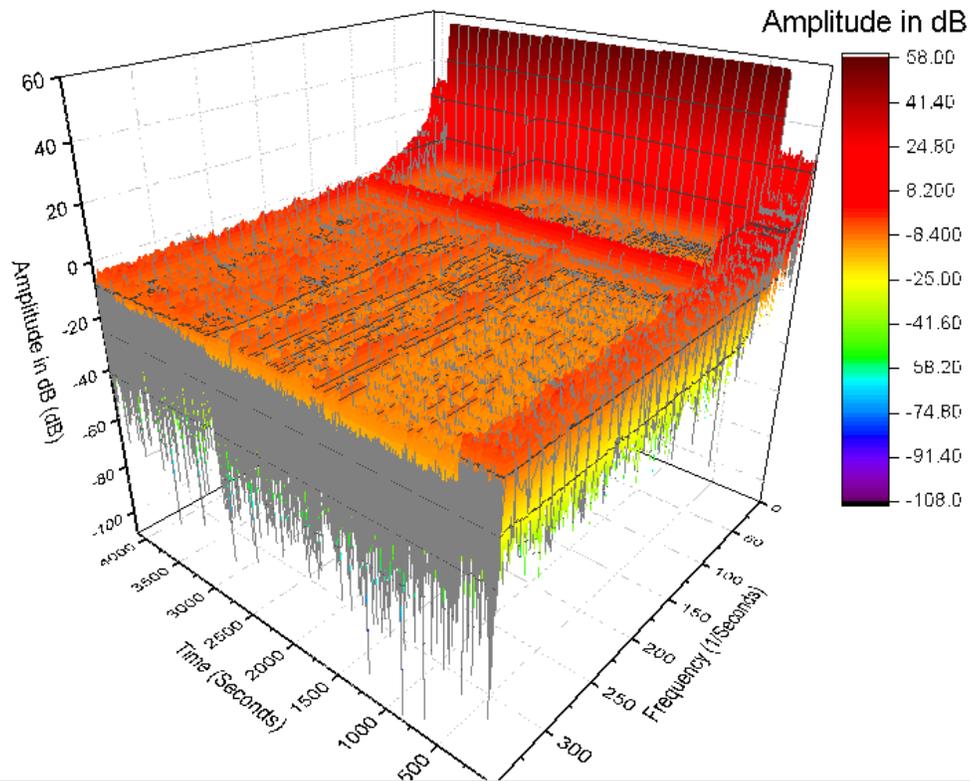


Ilustración 21 Gráficos 3D Iluminancia en el dominio de las frecuencias prueba 1

De esta manera se visualiza con mayor detalle los cambios de estado, ya que ahora parecen observarse a simple vista. El espectrograma resultado de la información obtenida del sensor, también puede ser analizado por partes separadas en dos dimensiones, para ver gráficamente los cambios de amplitud, que determinan el valor de la frecuencia.

Tomando “líneas aleatorias” es decir una serie de valores de amplitud de cada estado, se obtiene la siguiente información:

Estado 1: Sin luz, 5 minutos, serie de valores aleatorios de los resultados del análisis STFT de la señal. Muestras =12.

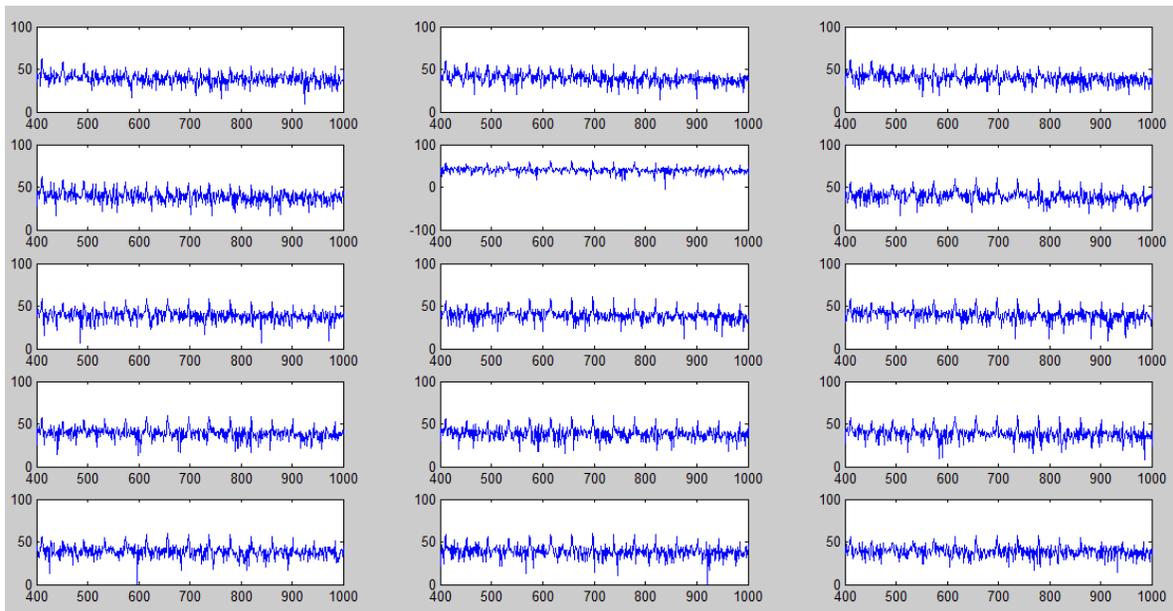


Ilustración 22 Estado 1, No luz, 0 focos, Valores de amplitud en dB

Observando las 12 muestras tomadas del primer estado, no muestra ningún cambio de amplitud representativo, lo cual era lo estipulado, si existiera algún pico en la amplitud, representaría la presencia de luz, la amplitud se presenta constante.

Estado 2: Luz muy Intensa 18 focos encendidos, 20 minutos, serie de valores aleatorios de los resultados del análisis STFT de la señal. Muestras =12.

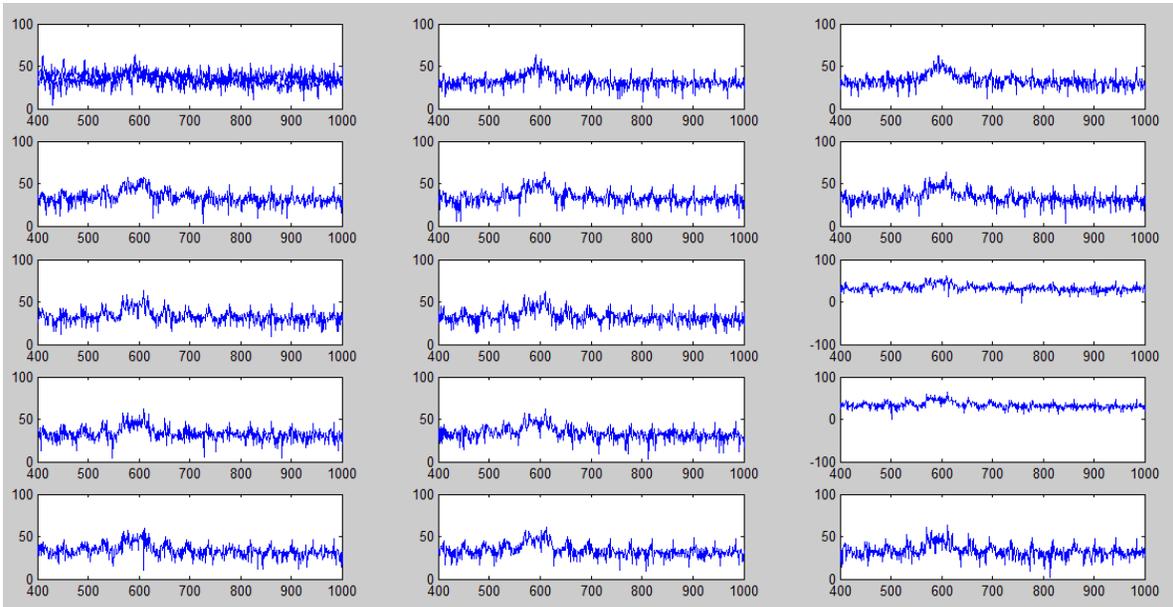


Ilustración 23 Luz muy Intensa, 18 focos encendidos, Valores de amplitud en dB

Se muestra un poco representativo de la frecuencia de la señal de luz presente, este se observa en cada una de las muestras, esta frecuencia representa la presencia de luz en el cuarto. Este pico alcanza frecuencia de 100 a 105 Hz.

A mayor ilustración de la diferencia entre amplitud cuando existe luz, y cuando no, se muestra el siguiente gráfico, en el que se tomó una sola muestra de estado y se graficó.

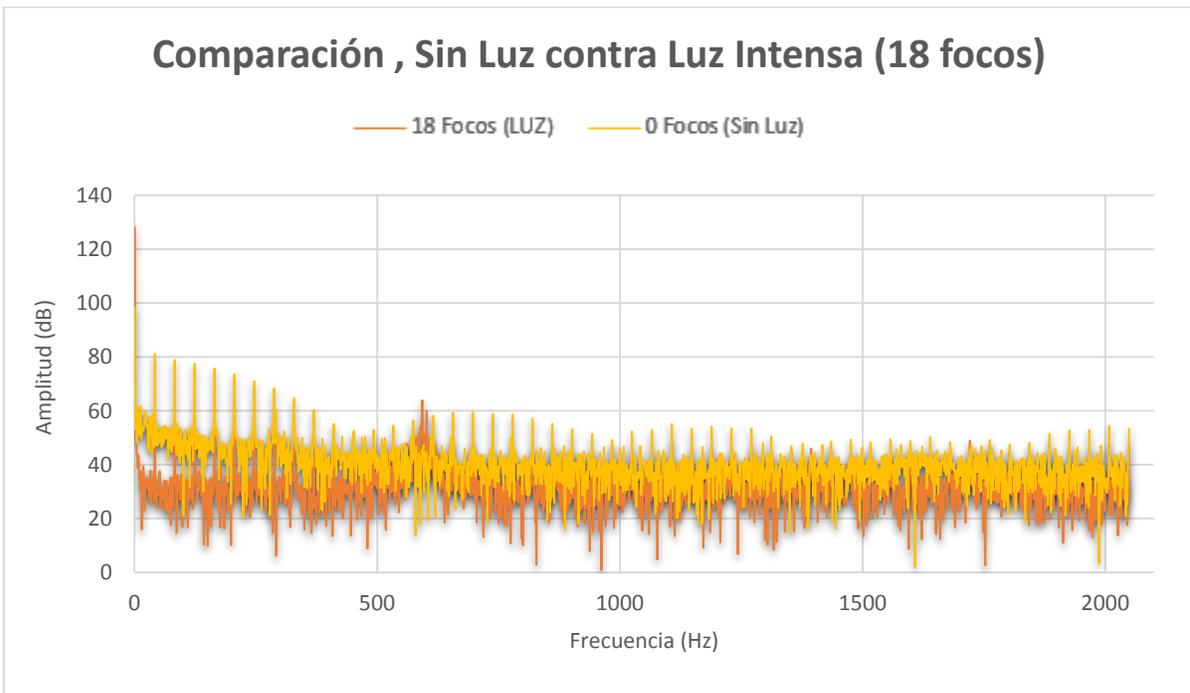


Ilustración 24 Gráfica comparativa entre cuarto sin luz 0 focos, y luz intensa -18 focos

Se observa una diferencia en el valor de la amplitud, el pico representa la señal de luz a diferencia de la amplitud sin luz, gracias a esta diferencia se puede inferir cuando existe señal y cuando no, de esta forma el siguiente paso es diferenciar en cantidad se encuentra la luz, muy intensa, intensa o baja.

Estado 2: Luz Intensa 12 focos encendidos, 20 minutos, serie de valores aleatorios de los resultados del análisis STFT de la señal. Muestras =12.

De igual manera, tomamos valores aleatorios y se gráfica:

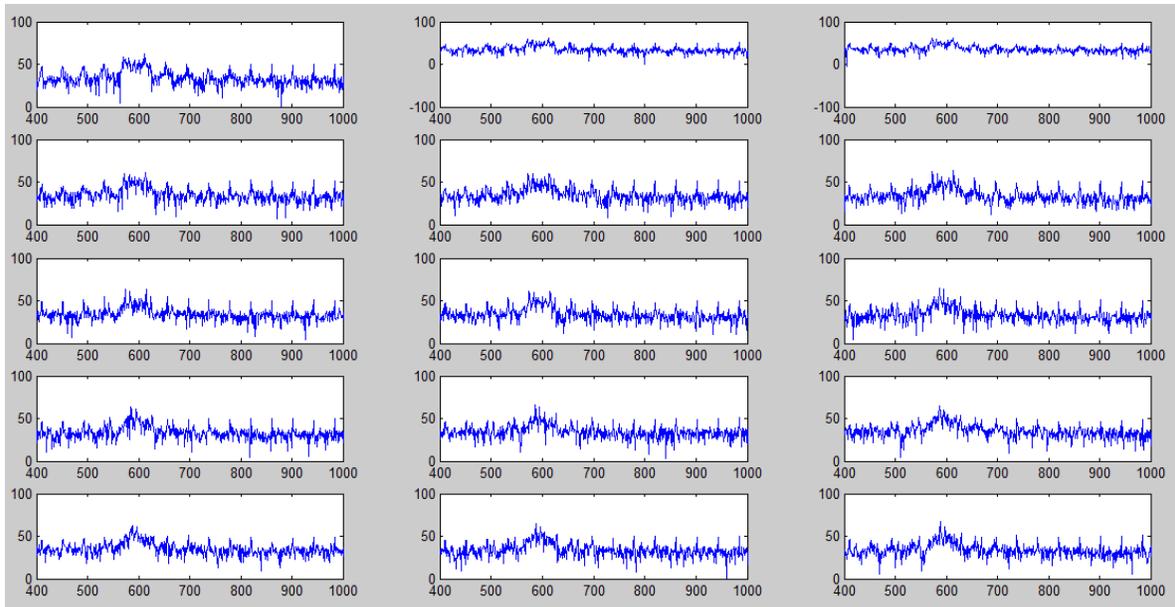


Ilustración 25 Gráfica de Luz Intensa, 12 focos encendidos, Valores de amplitud en dB

Igualmente, muestra el pico representativo de frecuencia de la señal de luz, por lo que se tiene que analizar si existe alguna diferencia en la amplitud a diferencia de la luz con 18 focos encendidos, y de esa manera observar si se puede identificar los cambios de intensidad de luz por medio de la frecuencia.

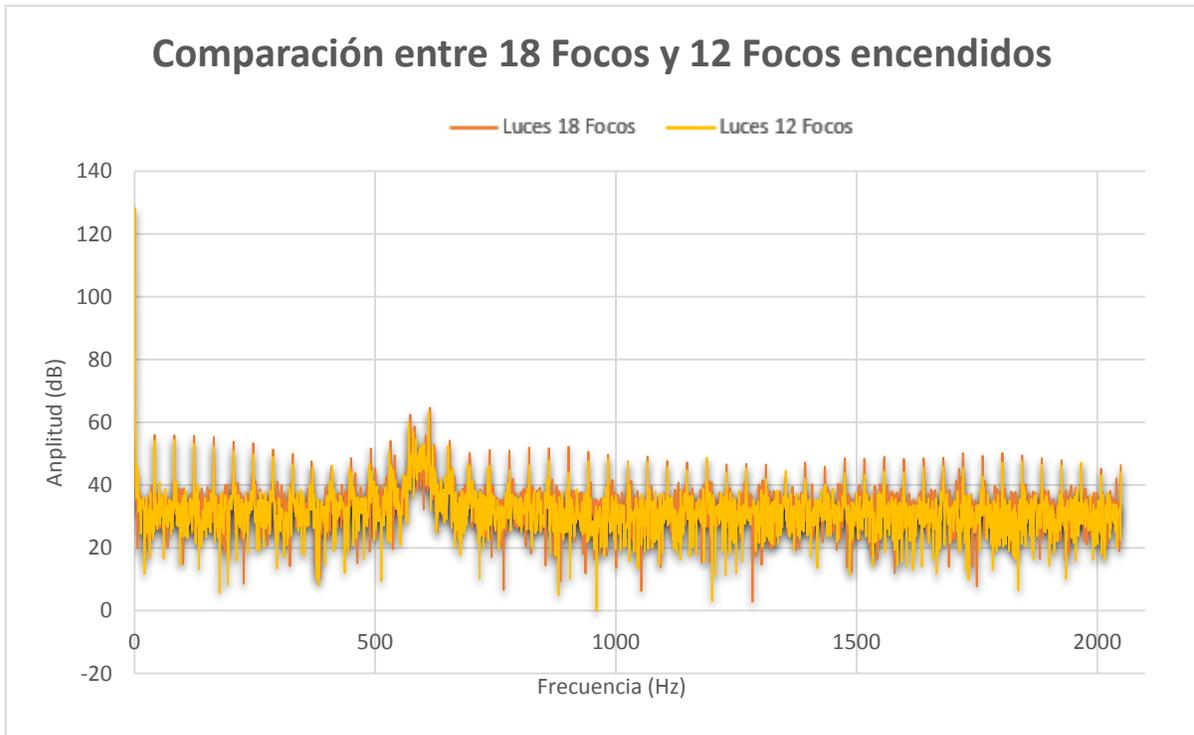


Ilustración 26 Gráfica comparativa entre cuarto con luz intensa-18 focos, y luz medio intensa -12 focos

La diferencia de amplitud entre ambas señales es apenas notable, pero existe un pequeño valor que logra diferenciar ambos estados de apenas 3 o 5 unidades de amplitud, mientras que la diferencia entre frecuencias es de la misma forma apenas notable, pero disminuye en casi 4 puntos. Para este análisis y diferenciación de cambios de intensidad de luz, la gráfica en el dominio de la frecuencia, no representa un resultado considerable.

Estado 4: Luz Baja 6 focos encendidos, 20 minutos, serie de valores aleatorios de los resultados del análisis STFT de la señal. Muestras =12.

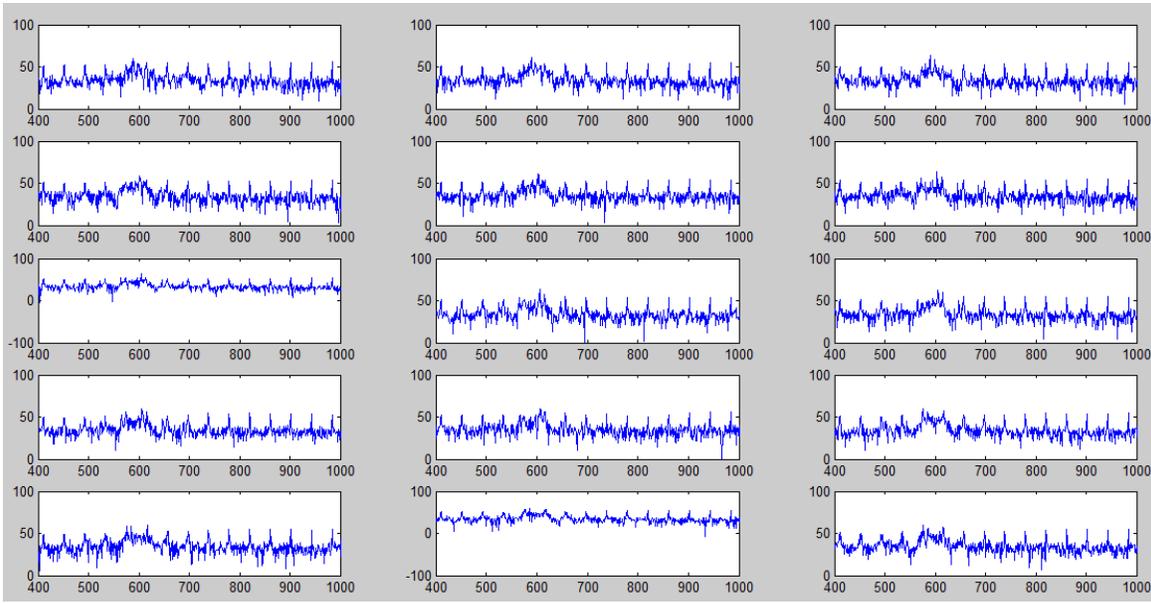


Ilustración 27 Gráfica de Luz baja 6 focos encendidos, Valores de amplitud en dB

El mismo pico representativo aparece en el gráfico, se analizará la comparación entre el estado anterior (12 focos) y el actual en análisis.

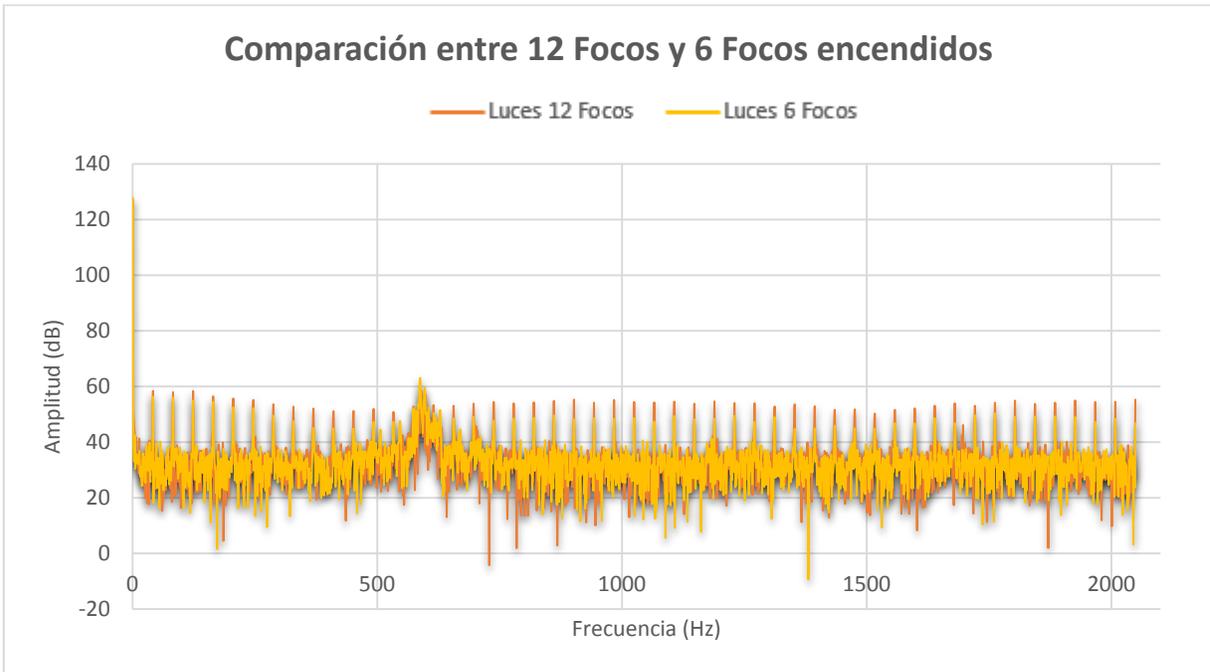


Ilustración 28 Gráfica comparativa entre cuarto con luz media- 12 focos, y luz baja-6focos

Se observa de igual manera, un cambio en la amplitud, esta al varia con respecto a la intensidad de luz, como se muestra en la gráfica anterior, mientras menor se la intensidad menor es la amplitud.

Estado 5: Sin Luz 0 focos encendidos, 20 minutos, serie de valores aleatorios de los resultados del análisis STFT de la señal. Muestras =12.

Para el último estado se muestra el mismo estado que el inicial, sin pico representativo de frecuencia.

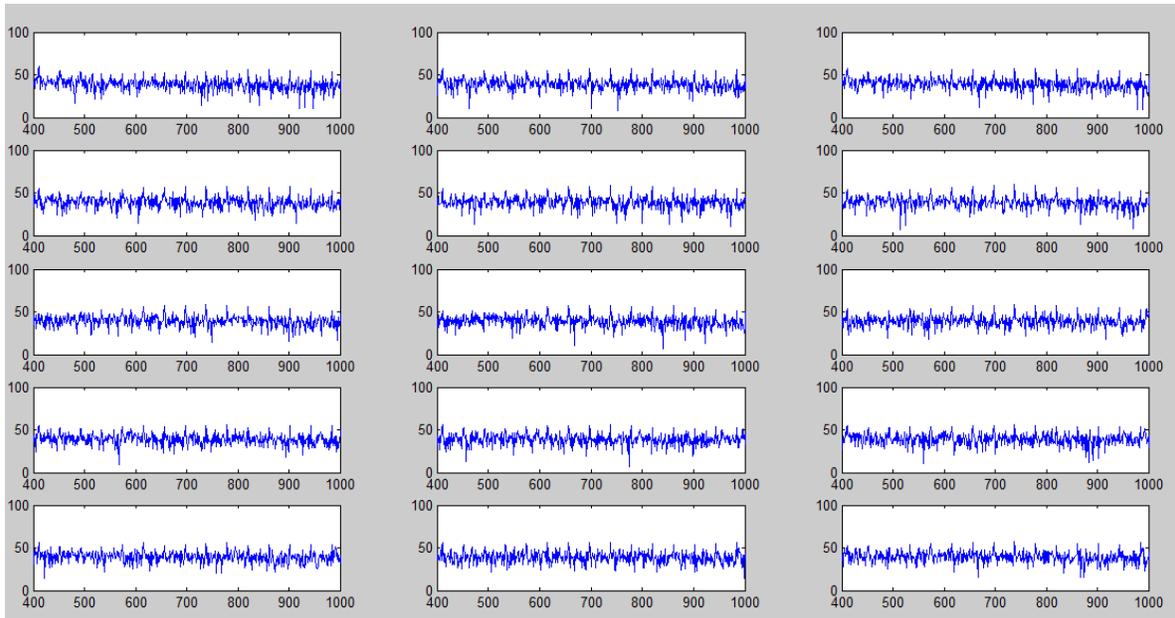


Ilustración 29 Grafica sin Luz, 0 focos encendidos, Valores de amplitud en dB

De esta forma, se determina que es posible analizar y observar los cambios de estado en cualquiera de los dos dominios, si se observa desde el dominio del tiempo, es notable el cambio de luminancia que es recibida por el sensor de luz y de la misma forma en el dominio de la frecuencia, se percibe el cambio de amplitud en la frecuencia, observando de igual manera el cambio de estado.

Esto finalmente ayudara al ahorro de energía para controlar en base a estos cambios de intensidad de luz y con la preferencia del usuario, la regulación de cantidad de luz en el cuarto, generando ahorros de energía consumida.

Por lo que la siguiente interrogante es conocer la naturaleza de la señal, es decir el origen de la fuente de luz, donde se clasificara de tres formas, luz solar, luz artificial y la combinación de estas, luz artificial.

Prueba de Laboratorio 2: Diferencia en la frecuencia de Luz a partir de su naturaleza.

Durante la primera prueba se analizó y observo los cambios de intensidad en la luz que pueden ocurrir y como detectarlos a través de su valor en amplitud e intensidad. Esta información ayuda a poder controlar la cantidad de luz que se encuentra en cuarto, y

conforme la actividad y preferencia del usuario, se podría regular, generando ahorros en el consumo.

La cantidad de luz en cuarto va correlacionado a su origen, este puede ser natural o artificial, o una combinación de ambas. La intensidad de luz en el dominio del tiempo no nos representara más que una serie de datos correspondientes a la iluminancia en el cuarto, por lo que como vimos previamente, el análisis en el dominio de la frecuencia nos ayuda a separar señales de diferente naturaleza.

Se medirán tres casos en ambiente controlado donde se expondrá el sensor de luz a una luz artificial, solar, y una combinación de ambas, y la información recolectada se analizará en el dominio de la frecuencia a través de la transformada corta de Fourier (STFT).

Prueba 2.1: Medición y análisis de Luz artificial.

Para la primera prueba se requería de una fuente de luz artificial, es decir proveniente de la transformación de energía eléctrica a lumínica generada a través de un foco.

Esta fuente de luz solo se podía obtener en un espacio totalmente cerrado, afortunadamente el laboratorio contaba con cuartos restringidos de cualquier luz exterior, iluminando el cuarto con meramente luz de 18 focos tubulares.

Para la obtención de datos, se colocó el arreglo de sensor, plataforma y placa de tarjeta SD previamente armado, en el centro del laboratorio iLAB y se corrió el programa durante un periodo $T= 180$ segundos y una frecuencia promedio de obtención de datos= 695 Hz, los resultados en el dominio del tiempo son los siguientes:

Muestra de 1 segundo de luminancia, $N=697$ datos, $f=695$ Hz

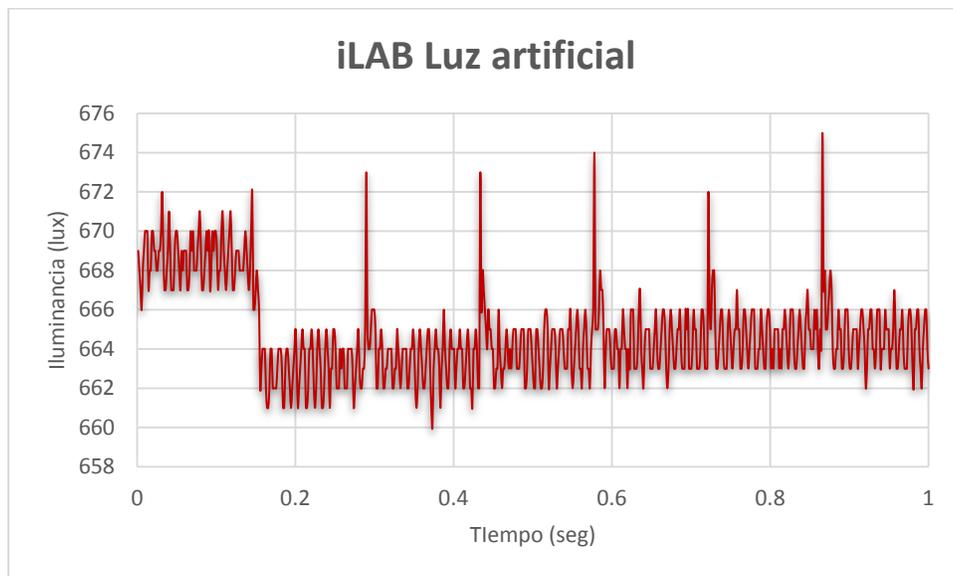


Ilustración 30 Gráfico de 1 segundo de luz artificial dentro de un cuarto cerrado.

Aplicando STFT al total de datos ($N=124900$) $f=693\text{Hz}$, se obtiene el siguiente espectrograma:

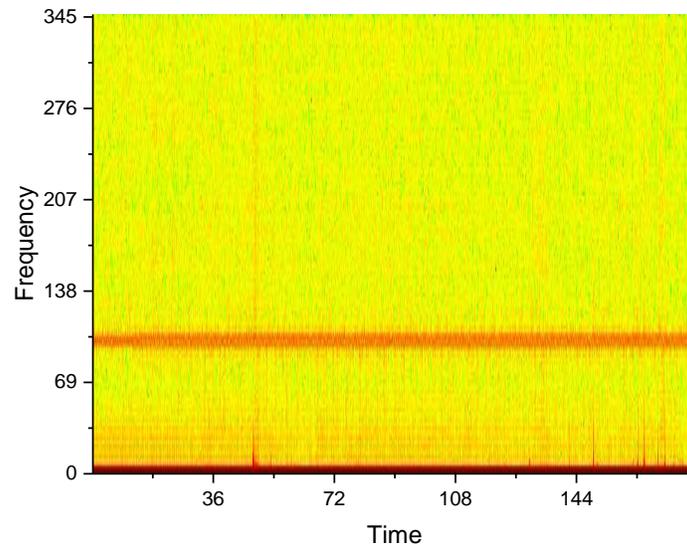


Ilustración 31 Espectrograma de luz artificial en el tiempo, frecuencia dominante = 100 Hz.

Se observa la misma señal única de luz continua que en los experimentos anteriores, se logra deducir que la frecuencia normal para la luz artificial es de 100 Hz, y se identifica como una sola señal.

Prueba 2.2: Medición y análisis de Luz Solar.

Del mismo modo, se fue al exterior del edificio alrededor de las 12 de la tarde, y se buscó un lugar fuera de luz artificial, es decir fuera de algún reflector o lámpara. Se localizó el sensor en rayo expuesto de sol, y se tomaron muestras de luz en por lo menos 3 minutos y se obtuvieron los siguientes resultados:

Muestra de 1 segundo de luminancia, $N=693$ datos, $f=693$ Hz

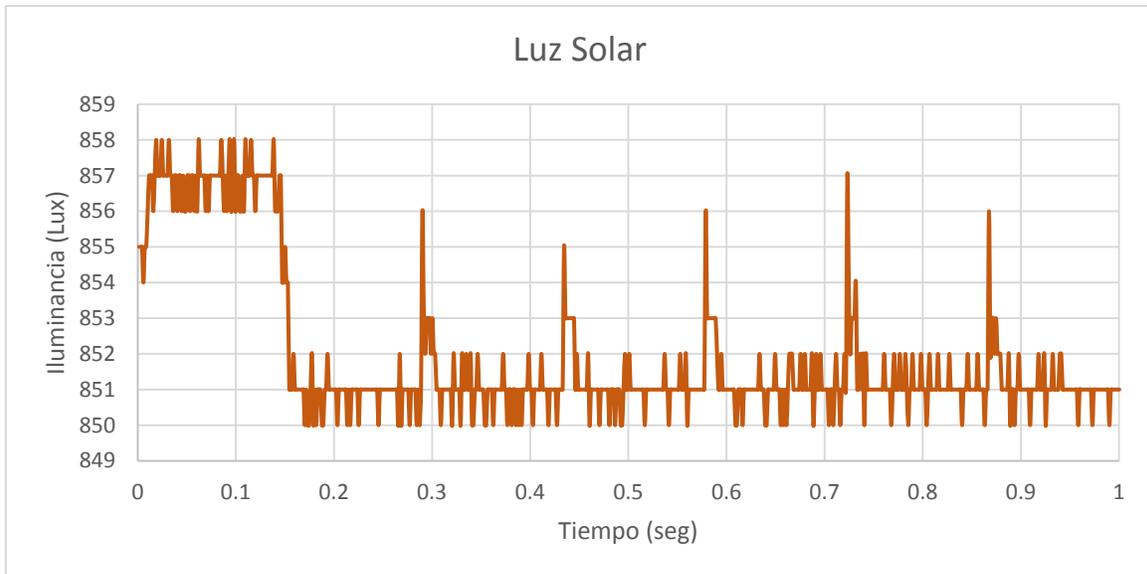
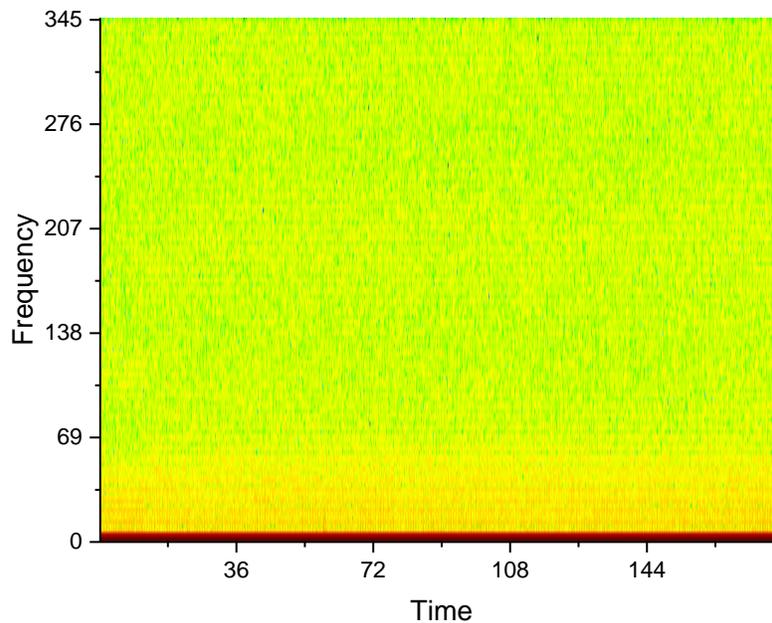


Ilustración 32 Gráfico de 1 segundo de luz solar en el dominio del tiempo, expuesto al aire libre.

Los cambios en la intensidad de luz aumentaron considerablemente de 600 promedio de iluminancia a 800, 700 lux. Observando la gráfica la señal se vuelve un poco más arreglada de forma cuadrática y poco variable.

Aplicando STFT al total de datos ($N=124,700$) $f=692$ Hz, se obtiene el siguiente espectrograma:



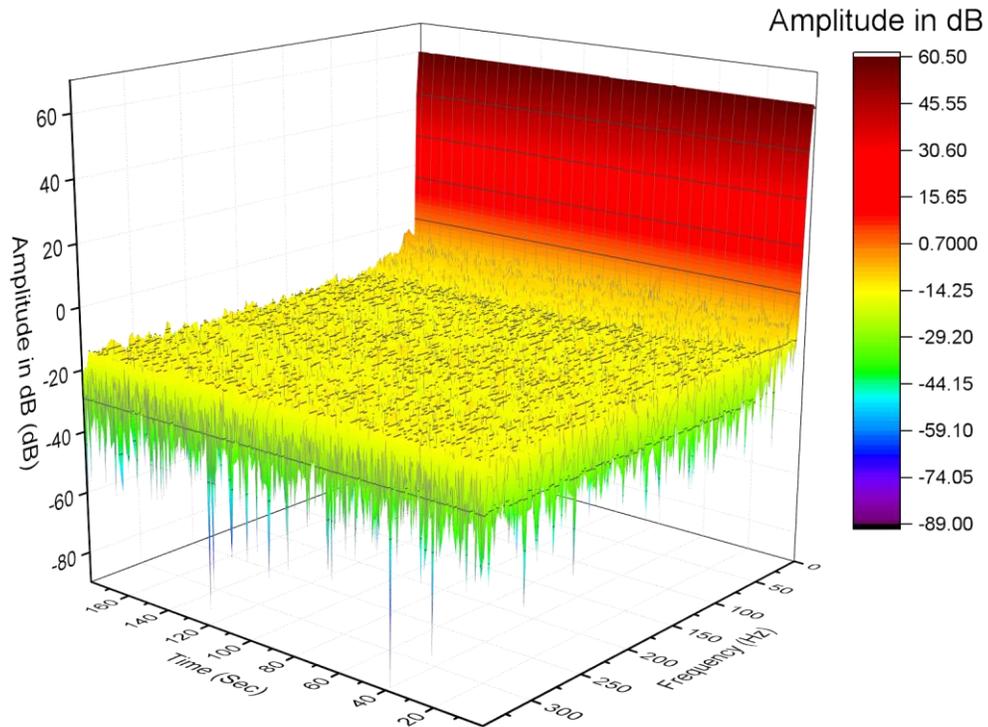


Ilustración 33 Espectrograma de luz solar, sin existir frecuencia dominante.

Con la información de intensidad de luz solar, no se muestra en el gráfico de la transformada de Fourier corta, alguna frecuencia dominante, a pesar de esto, nos ayuda a identificar el estado de luz cuando es meramente solar, es decir, si no existe frecuencia dominante será luz solar.

Prueba 2.3: Medición y análisis de Luz Solar y Luz Artificial combinadas.

Para esta prueba se fue al interior del edificio, el cual contaba en la entrada con un ventanal de suelo a techo y convenientemente dos luces que alumbraban la entrada con luz intensa, se colocó el arreglo del sensor, en el pasillo de la entrada, y de igual manera se tomó la medición por un periodo de $T=3 \text{ min}$, obteniendo los siguientes resultados:

Muestra de 1 segundo de luminancia, $N=700$ datos, $f=700 \text{ Hz}$

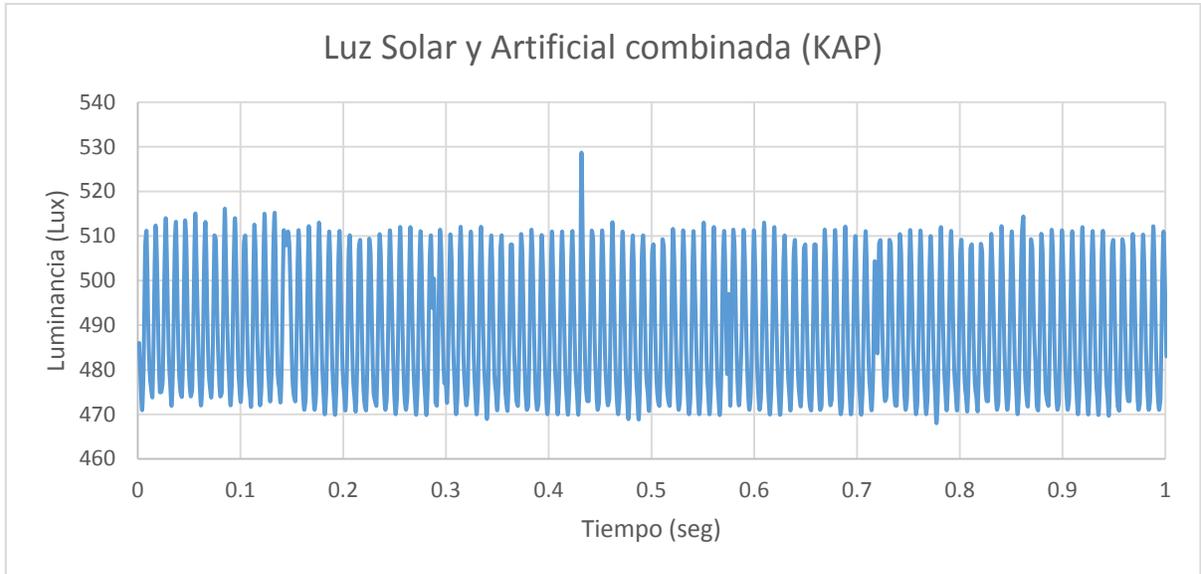
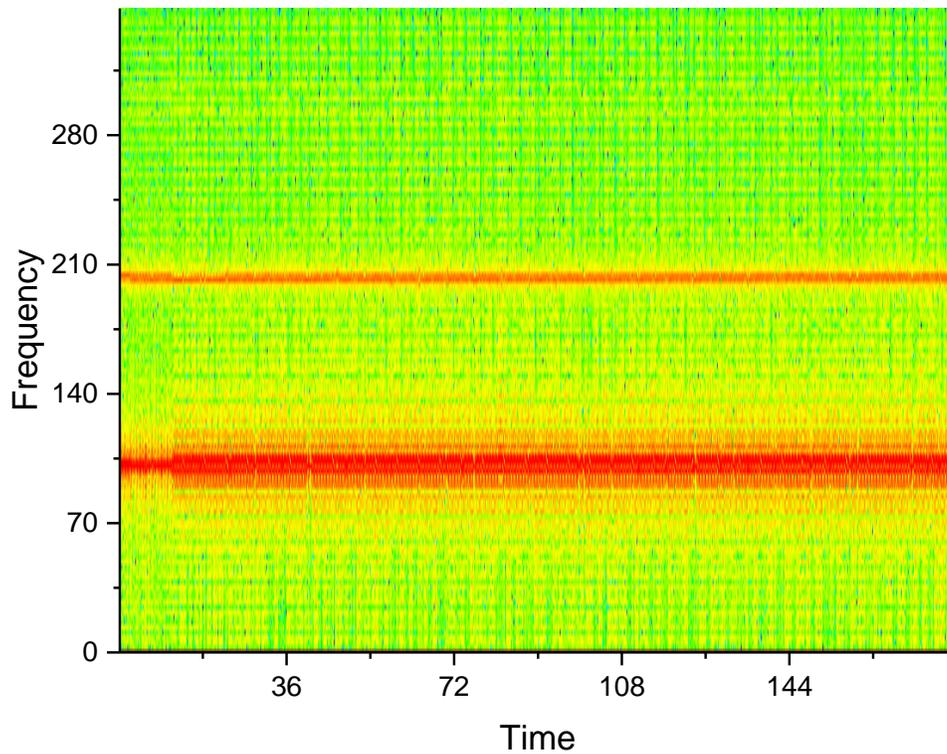


Ilustración 34 Muestra de 1 segundo de luz artificial y solar combinada en el dominio del tiempo.

La combinación de luz solar con artificial muestra una señal muy variable en amplitud, dando valores desde 470 lx hasta 530 lx.

Aplicando STFT al total de datos ($N=125,500$) $f=697\text{Hz}$, se obtiene el siguiente espectrograma:



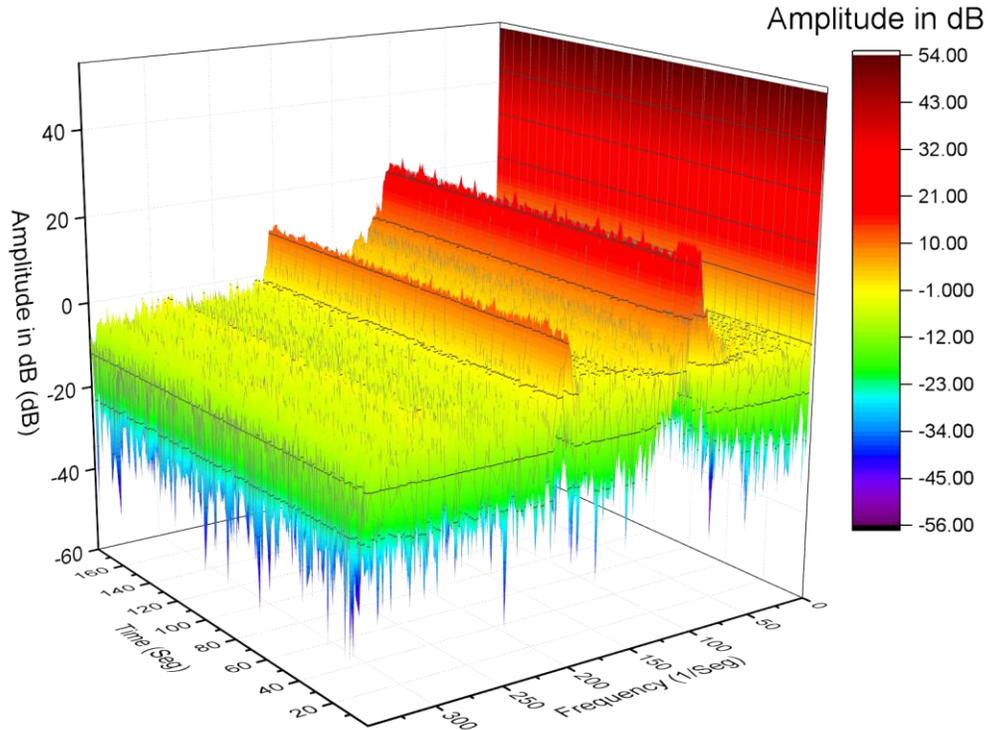


Ilustración 35 Espectrogramas de luz solar y luz artificial combinadas, presentes dos frecuencias dominantes 100 Hz y 200 Hz representantes a cada señal.

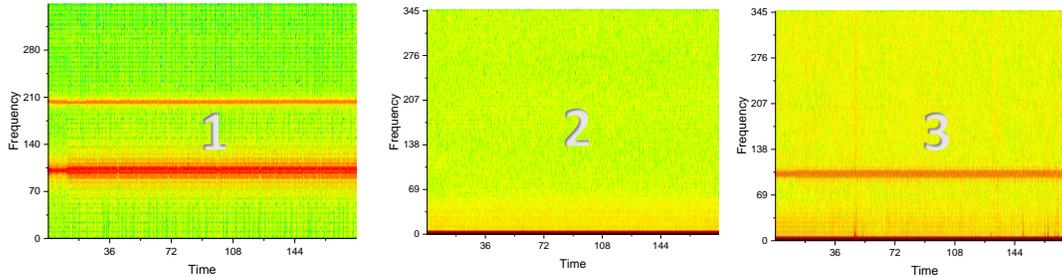
El gráfico muestra dos frecuencias dominantes, una para cada señal. Por experimentación previa se sabe que la señal de luz artificial alcanza los 100 Hz, por lo que por discriminación la luz solar en combinación con la luz ambientada no da una frecuencia 200 Hz. La transformada corta de Fourier alcanzo su objetivo separando las diferentes señales por su frecuencia.



Ilustración 36 Kaprielian Hall, USC edificio de investigación donde se realizaron todas las pruebas de medición de luz.

Observando el espectrograma de cada estado, se determina las condiciones siguientes para un tiempo establecido de 3 min o 180 segundos:

Estado	Data	FreqData(Hz)	Interval(seg)	FreqLuz(Hz)
1. Sol y Artificial	125,500	697	0.001434	100, 200
2. Sol	124,700	693	0.001443	0
3. Artificial	124,900	694	0.001441	100



La diferencia de frecuencia de señal es realmente la que diferencia un estado de otro, cuando se muestre dos señales uno $F=100$ Hz y otra de 200 Hz, en el espectrograma de la transformada corta de Fourier, se establece que existe Luz Artificial y Solar correspondientemente.

Cuando no se presente alguna frecuencia dominante, $F=0$ Hz es solamente luz solar, y de la misma forma, si presenta una frecuencia dominante de $F=100$ Hz, corresponde a luz artificial únicamente.

Consecuentemente ahora se es capaz de diferenciar cantidad de luz y su fuente de procedencia, identificando sus condiciones para de esta forma controlar su intensidad dependiendo de su fuente, dando como resultado ahorros de consumo de energía eléctrica.

Prueba 3: Reconocimiento de Actividades por medio de Luz y Potenciómetro.

La cantidad de intensidad de luz finalmente es condicionada por la preferencia del usuario que ocupe la habitación, por lo que conocer la cantidad de luz que se encuentra en la habitación o de que fuente proviene no es del todo suficiente para la generación de ahorros, se tiene que conocer las preferencias y actividades del usuario.

La señal de luz, no solo podría indicarnos datos como frecuencia, estado, fuente, cantidad, si no que su variación en una línea de tiempo podría también indicarnos que actividad realiza el usuario.

La prueba 3 consiste en una seriación de actividades pre establecidas que se realizaran en los diferentes cuartos donde pasamos la estancia de investigación. Se medirá la señal de luz con varias plataformas del tipo Arduino colocando uno por cuarto con sus respectivos sensores y placa de memoria SD. Además de añadir una plataforma portátil llamada FLORA que portara el usuario de prueba y llevara consigo por los diferentes cuartos

realizando las actividades, funciona de la misma forma que la plataforma Arduino, pero con una limitación de micro procesamiento de datos, que es menor.

Al reunir la información de todas las plataformas, se unirá cada seriación en una sola grafica que mostrará la señal de luz y si existe alguna correlación entre la luz medida por la plataforma Arduino en el cuarto y la luz de la plataforma FLORA portada por el usuario, y finalmente observar si se logra identificar la actividad realizada.

La plataforma Flora es de menor tamaño (1.75" de diámetro) y de menor peso (4.4 gramos) además de tener una forma circular ergonómica para ser portable. Funciona y se programa de igual manera que una plataforma Arduino.

Como ventaja además de peso y tamaño, cuenta con una entrada de alimentación de energía de 3.5 a 5 Volts, por lo que se conectó una batería pequeña que junto con el sensor y la tarjeta SD, formaron la plataforma móvil FLORA.

Añadiendo velcro y una correa ajustable para muñeca se conformó de la siguiente manera:

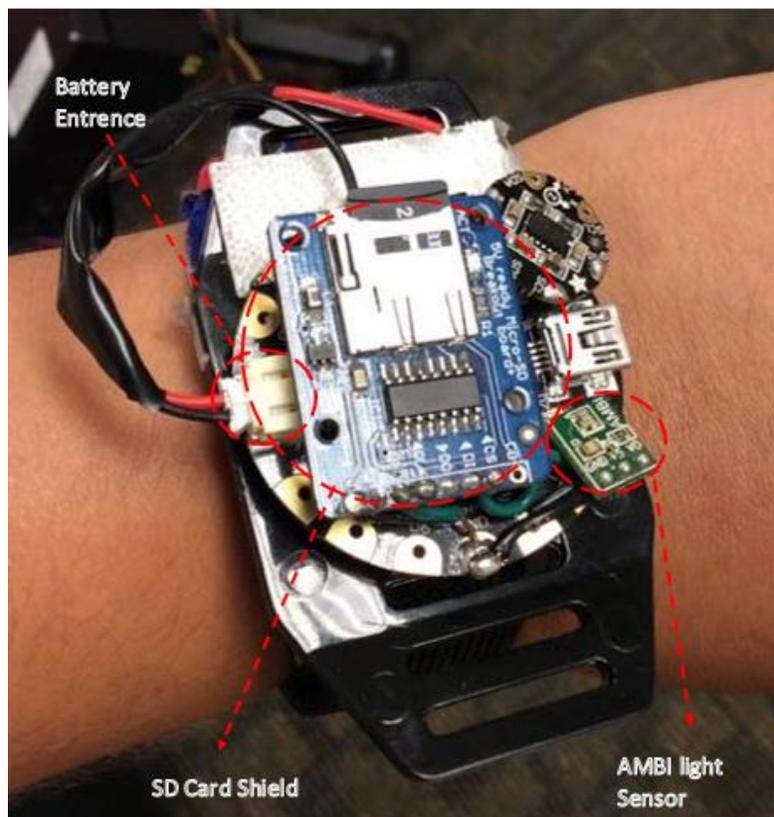


Ilustración 37 Plataforma FLORA adaptada a correa ajustable, con batería, sensor de luz y placa de memoria SD.

La plataforma FLORA al tener un microprocesador diferente a Arduino, y además una configuración de entrada diferente, se tuvo que modificar el programa original

adaptándolo a esta plataforma, la frecuencia medida de obtención de datos se redujo a 330 Hz (promedio)

Las actividades involucraron diferentes aparatos y electrodomésticos con el fin de agregar otra variable al experimento, la potencia. Y gracias a esta nueva variable se facilitará el reconcomiendo de actividades correlacionando la luz con la potencia medida a través de un potenciómetro.

Se usará el potenciómetro *PowerPort Enmetric*, este cuenta con 4 entradas, cada una de ellas proporciona capacidades de medición de potencia del aparato conectado. El *PowerPort* se comunica de forma inalámbrica con el puente de *Enmetric* usando una antena interna. Transmite características de potencia eléctricas (incluyendo potencia, voltaje, amperaje, la frecuencia y el factor de potencia).

Esta información es transmitida en tiempo real a un software con el que se puede observar los cambios de potencia, para después exportarlos a una hoja de cálculo y realizar su análisis.



Ilustración 38 Potenciómetro y puente de transmisión de datos PowerPort (Enmetric)

Con base en los resultados de las pruebas 1 y 2, se determinó realizar mediciones desde las 8:00 am y después de esta hora, realizar la siguiente cada 2 horas hasta las 8:00 pm.

Analizando cada serie de información obtenida, se determinó que, para propósitos de la presente tesis, se usara únicamente la medición de las 10:00 am con puramente luz solar, 4:00 pm con luz artificial y luz Solar, y finalmente otra medición a las 8:00 pm con únicamente luz artificial. Se seleccionaron estas debido a que resultaron ser las más representativas para cada caso.

Las actividades programadas se pensaron así debido a que son tareas comúnmente realizadas mientras los usuarios se encuentran habitando el departamento. El tiempo de medición de cada una de ellas fue de 2 min, considerando una tolerancia extra de 30 segundos que son representativos de la traslación del usuario de un cuarto a otro. La duración aproximadamente de la prueba sería de 16-18 minutos, realizando las siguientes actividades:

No.	Actividad	Tiempo
1	Reposar en Cama	2 min
2	Usar celular en Cama	2 min
3	Ir al baño y Reposar	2 min
4	Ir y sentarse en el Sillón	2 min
5	Ir al Refrigerador tomar comida y ponerla en el microondas.	2 min
5.1	Al mismo tiempo encender cafetera.	
6	Ir al sillón y comer.	2 min
6.1	Regresar los platos a la cocina.	1 min
7	Ir a la sala, trabajar en Laptop.	2 min

Se colocaron las plataformas Arduino en los diferentes cuartos a utilizar, es decir: Cuarto de dormir, baño, sala y cocina. Estas fueron alimentadas por cargadores de pared para teléfono ya que dan un voltaje de 5 Volts.

Esto contaba con una limitante, cada vez que se realizara un experimento tenía que iniciarse manualmente todos los dispositivos conectándolos a la corriente eléctrica, esto tomaba 10 segundos por placa, generando un ligero retraso en la información obtenida.

Para normalizar el proceso, se tomó el tiempo promedio al trasladarse de un cuarto a otro y encender la plataforma, este fue de 20 segundos por cuarto. Por logística, primero se encendió la plataforma ubicada de la cocina, a continuación, el de la sala, después el del baño y finalmente el del cuarto para dormir.

Cuando todos estuvieron encendidos, se esperó 30 segundos para iniciar la plataforma portátil FLORA e iniciar las actividades programadas y de la misma manera para apagarlas.

Con respecto a los potenciómetros, se distribuyeron principalmente en la cocina donde se conectó el refrigerador, microondas y cafetera, mientras que en la sala se conectó la computadora portátil, siempre estuvieron en funcionamiento debido a que por reglamento del departamento donde se realizaron estas pruebas, no se podían encender y apagar los electrodomésticos.

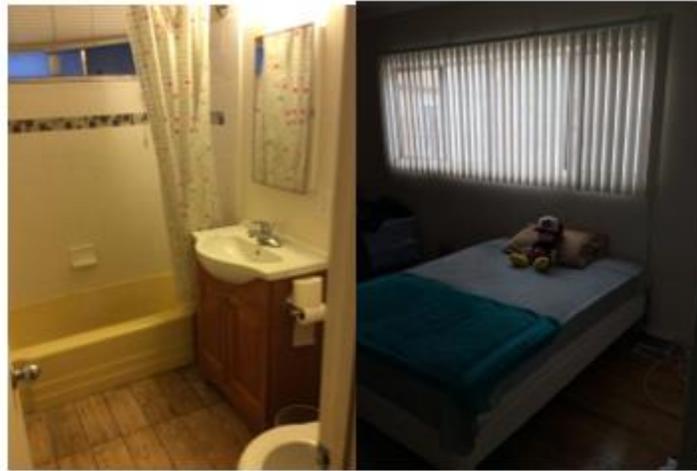


Ilustración 39 Cuartos de prueba para Prueba 3: Reconocimiento de Actividades

Prueba 3.1 Medición de Intensidad de Luz 10:00 am

Con las medidas de tiempo establecidas anteriormente se corrió la prueba en el departamento a las 10:00 am con luz únicamente solar, y los resultados fueron los siguientes:

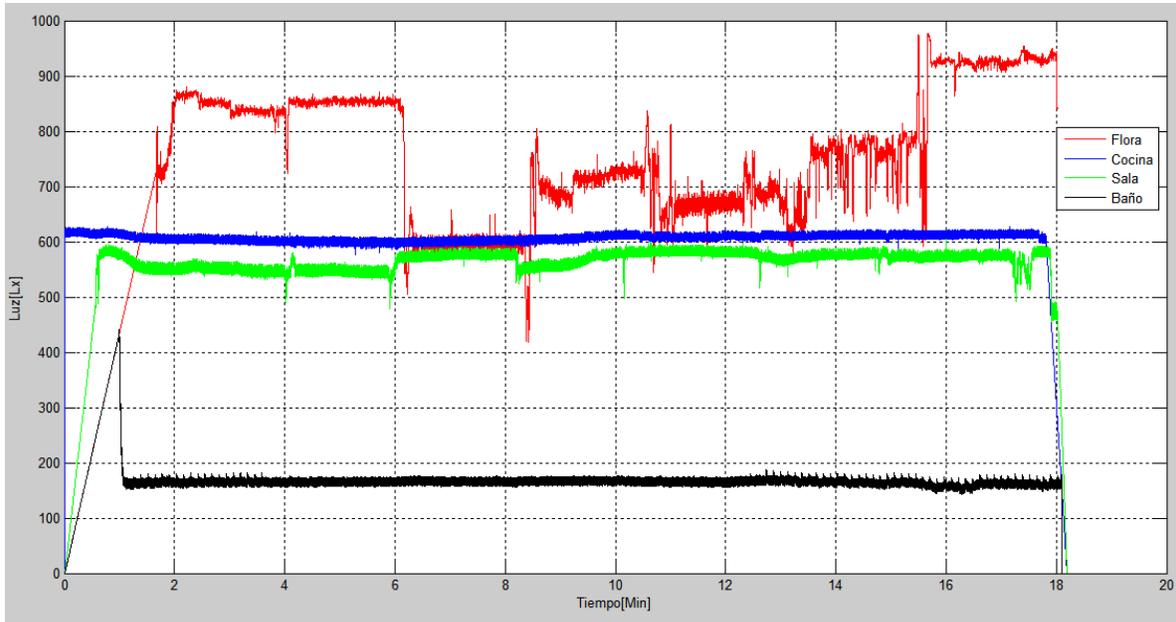


Ilustración 40 Señales de luz en diferentes cuartos incluyendo la señal de luz medida por el dispositivo FLORA a las 10:00

La única señal que varía considerablemente es la de sensor en la plataforma FLORA, las señales de luz en los cuartos permanecen constantes sin variar fuera del rango, a pesar de contar con presencia del usuario y dispositivos electrónicos.

Tomando la información variable de la plataforma FLORA y aplicando STFT se obtiene el siguiente espectrograma:

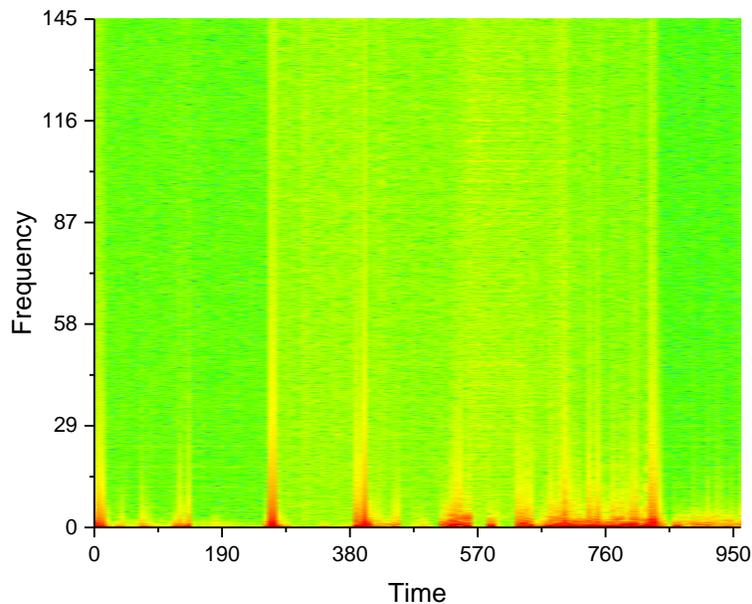


Ilustración 41 Espectrograma de luz medida por dispositivo FLORA a las 10:00 horas.

Al ser luz únicamente solar se obtiene este resultado de 0 Hz de frecuencia de señal, no existe frecuencia dominante en el espectrograma. Se perciben ligeros cambios marcados con el color amarillo verticalmente, estos se obtienen al variar la intensidad de la luz probablemente relacionados con el cambio de cuarto o actividad.

Mientras que del potenciómetro se obtuvieron los siguientes resultados:

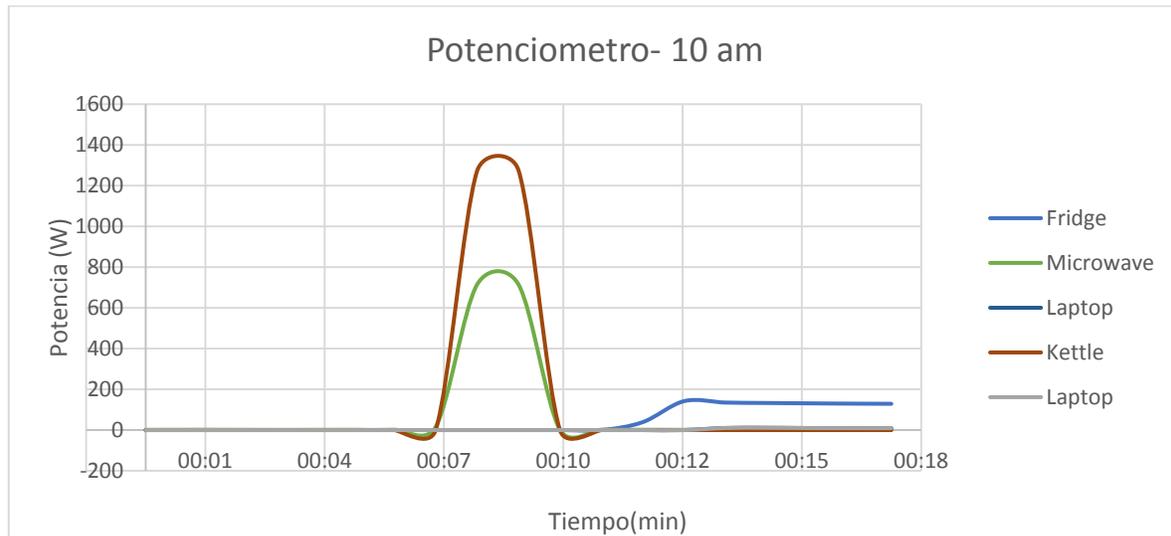


Ilustración 42 Gráfico de potencia de los diferentes electrodomésticos empleados en el experimento a las 10:00 horas.

El voltaje de la cafetera y el microondas sobresalen hasta casi 1200 W, mientras que la laptop, el refrigerador son valores tan bajos que no alcanzan a sobresalir en el gráfico.

Analizando los tiempos registrados se pueden sincronizar las gráficas para que de esta forma se observe la relación entre ellas, además de lograr identificar las actividades, las cuales se identificarán por la seriación previamente provista.

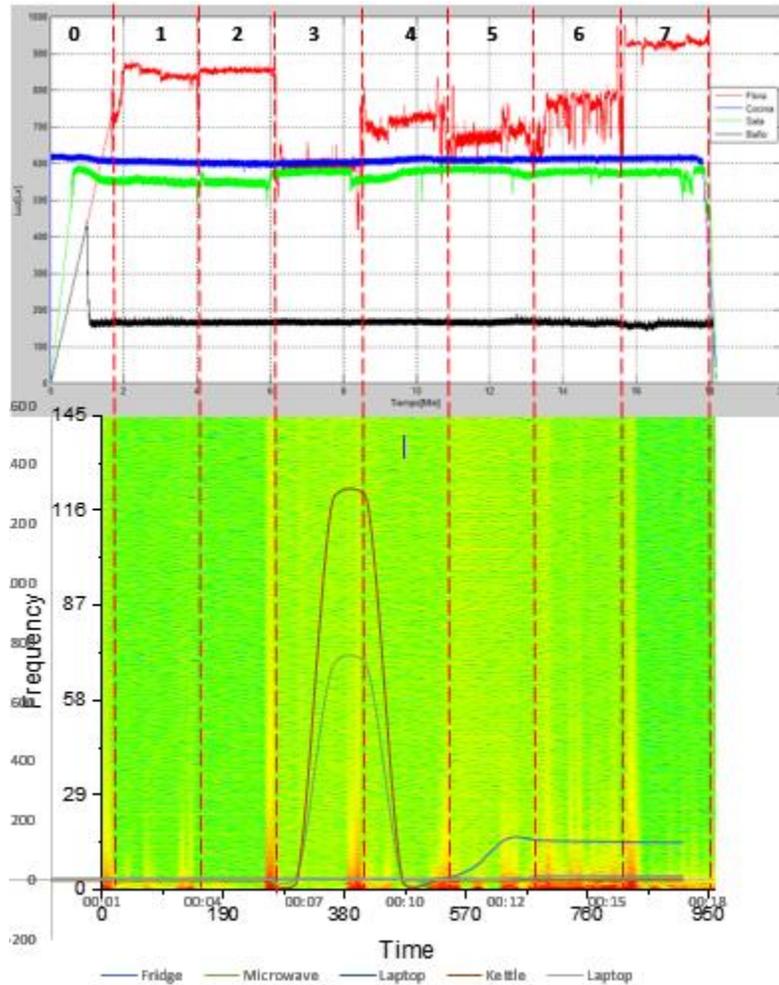


Ilustración 43 Vinculación de gráfico de espectrograma, gráfico de potenciómetro, y de luces medidas en diferentes cuartos para su análisis a las 10:00 horas

Tanto en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia se observan los cambios de un cuarto a otro, al variar la intensidad de luz y de amplitud cada vez que se cambia de actividad, el tiempo de la potencia está desfasado, pero si estuviera en el lugar 5, que es donde debería de estar, correspondería a la actividad realizada.

Prueba 3.2 Medición de Intensidad de Luz 4:00 pm

Pasando a la tarde cuando la luz solar empezaba a escasear se volvieron a tomar muestras en la misma secuencia, obteniendo los siguientes resultados.

Para los sensores de luz:

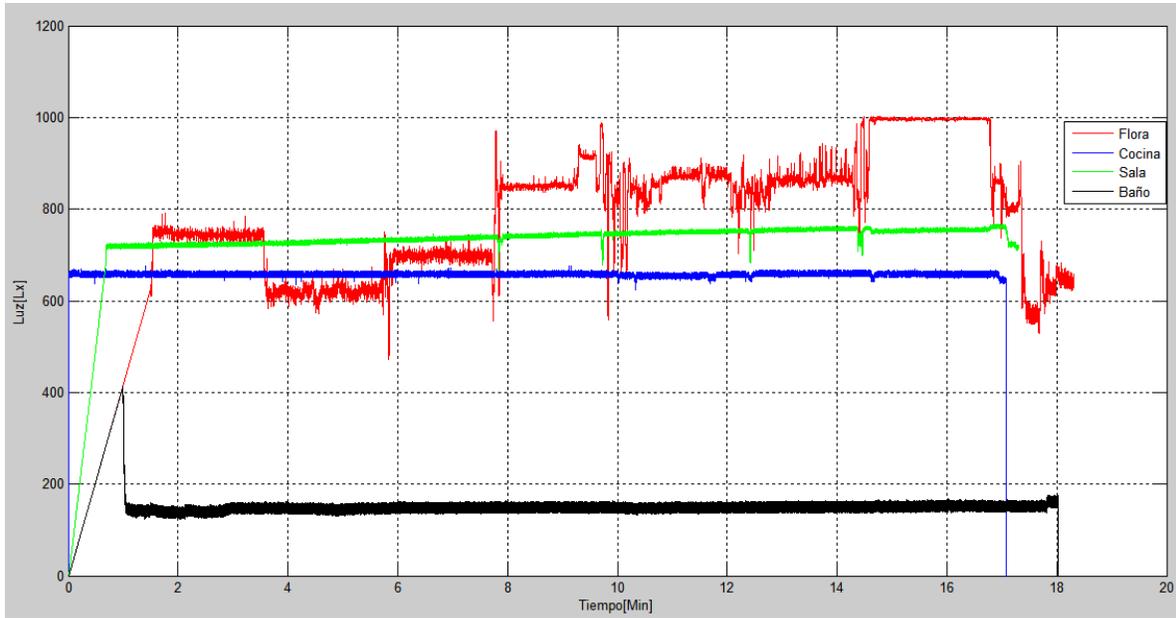


Ilustración 44 Señales de luz en diferentes cuartos incluyendo la señal de luz medida por el dispositivo FLORA a las 16:00

De nuevo la única señal variante es la proveniente de la plataforma FLORA, los cuartos permanecen constantes hasta el final. Con respecto a la intensidad de luz se observan los cambios de actividad.

Con esta información aplicando STFT se obtiene el siguiente espectrograma:

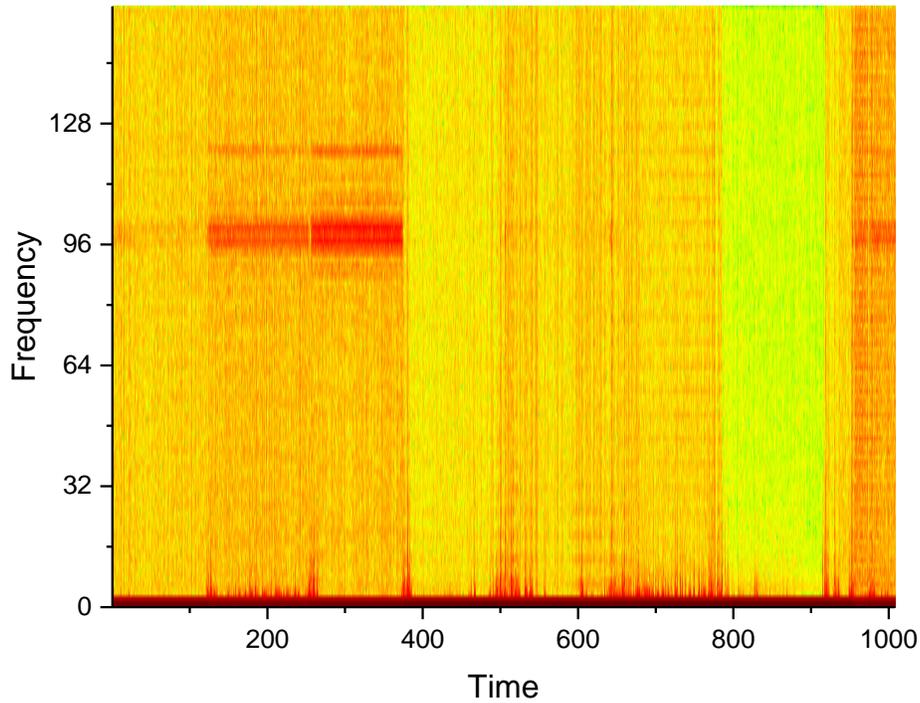


Ilustración 45 Espectrograma de luz medida por dispositivo FLORA a las 16:00 horas.

Claramente se muestra la presencia de luz solar más dominante que la artificial excepto por dos actividades donde ambas frecuencias se mostraban dominantes, fueron identificadas con “uso del celular” (actividad 2) y “estancia en el baño” (actividad 3). El brillo del celular impacta directamente en el sensor y sumado a la luz solar proveniente de las ventanas del cuarto nos muestran dos frecuencias dominantes, que son características de la combinación de ambas señales. Del mismo modo el baño un espacio cerrado con mayor intensidad de luz artificial, pero sin perder la señal de luz solar.

La grafica de potencia de los electrodomésticos se muestra de la manera siguiente:

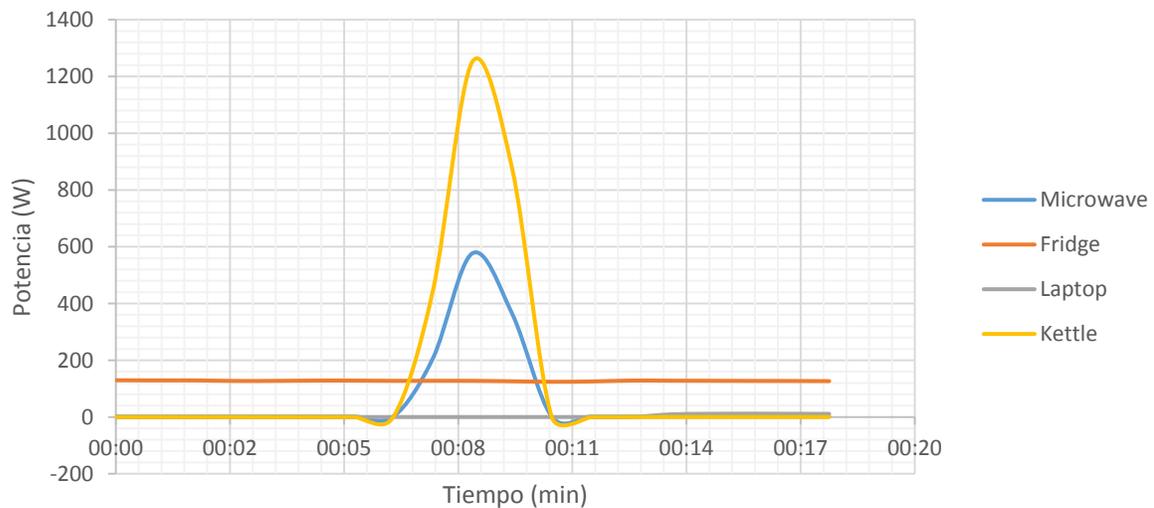


Ilustración 46 Gráfico de potencia de los diferentes electrodomésticos empleados en el experimento a las 16:00 horas.

Sin variación considerable en comparación con la muestra anterior, esta no depende de ninguna variable física del ambiente, solo de cuando se use el aparato, se espera el mismo resultado en la siguiente muestra.

Correlacionando los tres gráficos se obtiene el siguiente arreglo:

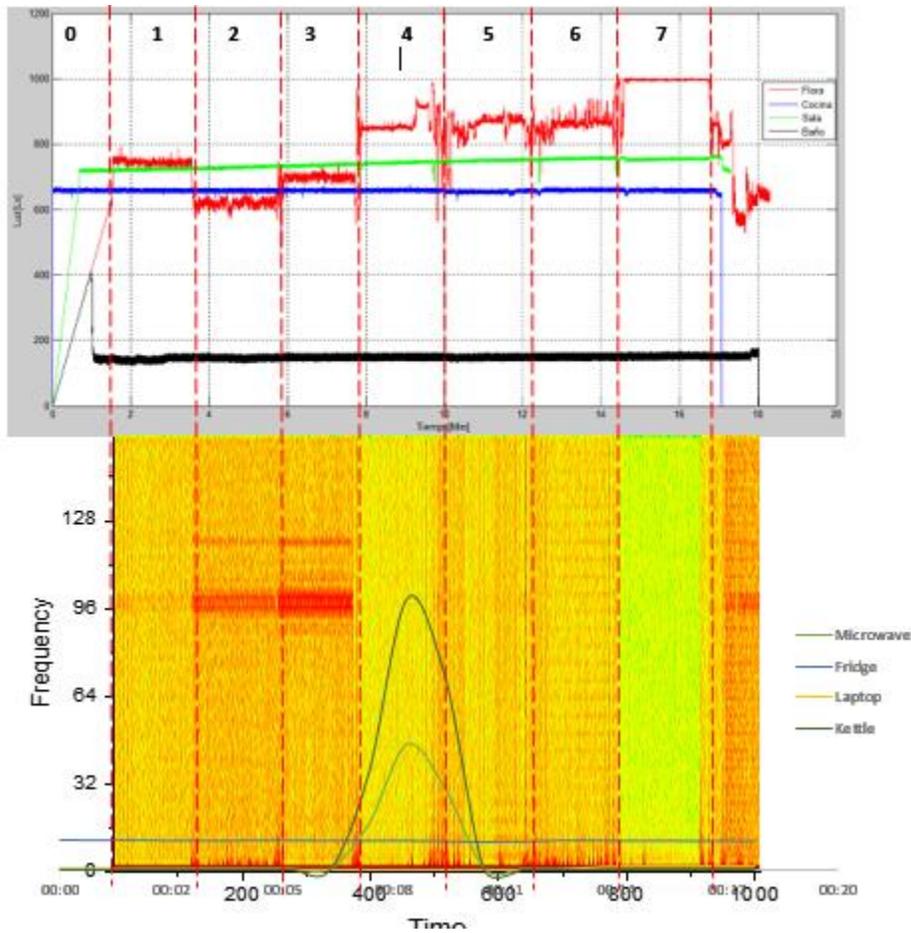


Ilustración 47 Vinculación de gráfico de espectrograma, gráfico de potenciómetro, y de luces medidas en diferentes cuartos para su análisis a las 16:00 horas

Los saltos o cambio de actividad se muestran como líneas verticales en el espectrograma, mientras que la frecuencia no nos indica del todo la presencia de luz artificial en todos los cuartos, ya que domina la luz solar.

Prueba 3.3 Medición de Intensidad de Luz 08:00 pm

Una vez agotada la luz solar en la ciudad y cerciorando que la luz del atardecer no se encontrara presente, se corrió la última prueba recorriendo las actividades previamente listadas. El gráfico de la luminancia en el dominio del tiempo se muestra a continuación:

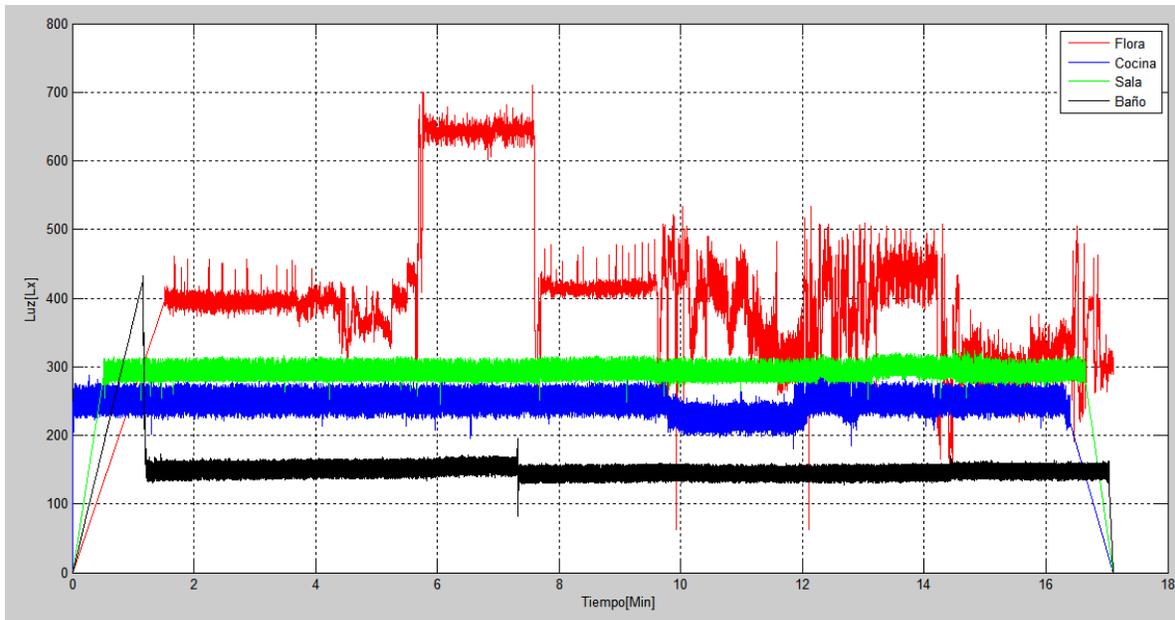


Ilustración 48 Señales de luz en diferentes cuartos incluyendo la señal de luz medida por el dispositivo FLORA a las 20:00

La variación de luz aumenta, y es representada por una “línea” gruesa de señal, característica de la luz artificial. La luz en los cuartos permanece constante sin variar por la presencia del usuario. De nuevo la única representativa es la señal del dispositivo móvil FLORA.

Con los datos obtenidos de Flora, se aplicada STFT obteniendo el siguiente resultado:

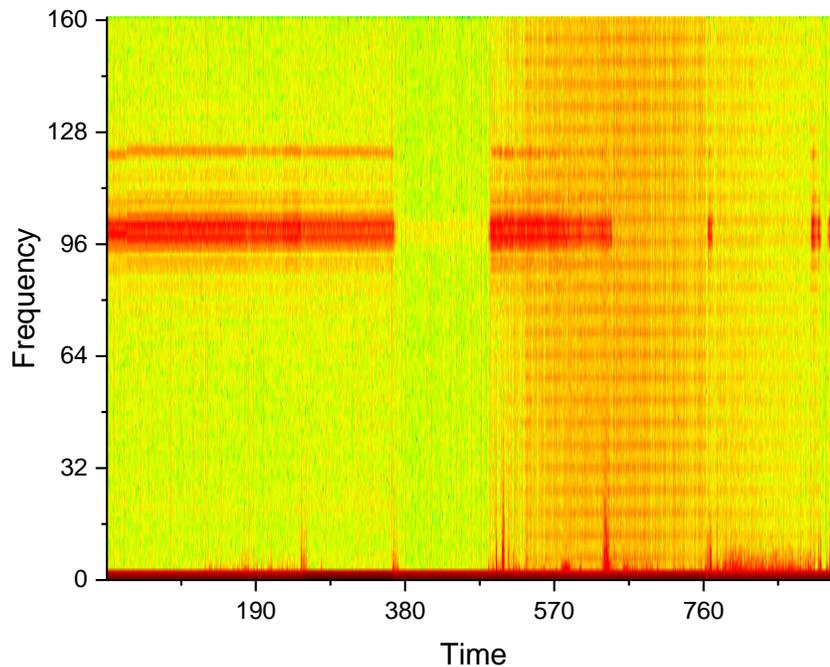


Ilustración 49 Espectrograma de luz medida por dispositivo FLORA a las 20:00 horas.

Sorprendentemente, muestra una clara presencia de luz solar en el gráfico, a pesar de cerciorarse que no existiera en el ambiente. Aunque la luz artificial muestra un mayor dominio, la luz solar se hace presente. Se piensa que es resultado de la intensidad de la luz solar reflejada por la luna.

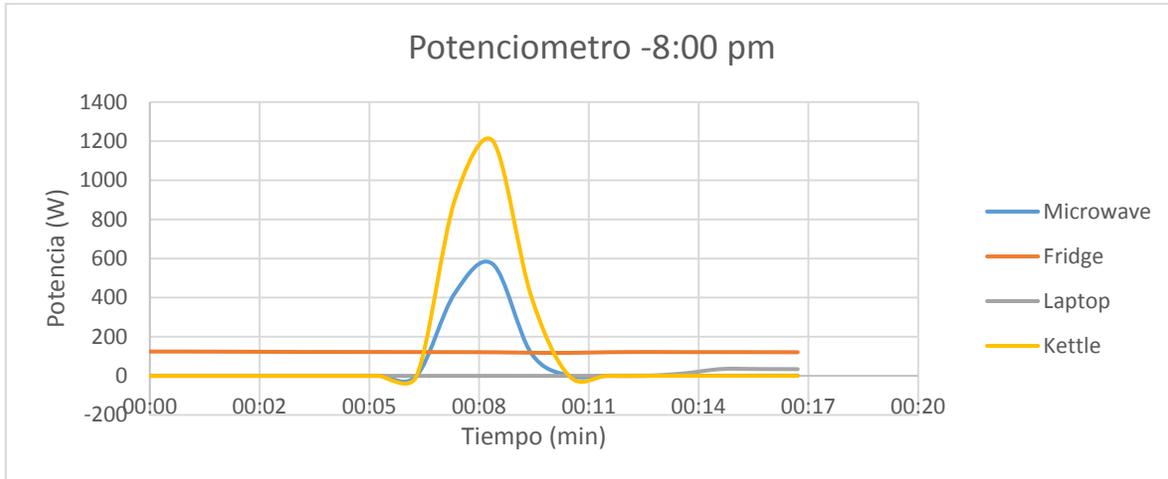


Ilustración 50 Gráfico de potencia de los diferentes electrodomésticos empleados en el experimento a las 20:00 horas.

Como se estipulo en la prueba anterior, la señal de potencia de los electrodomésticos, continuó sin variar excepto de cuando están en uso.

Conjuntamente las señales se unen para mostrar la correlación entre ellas:

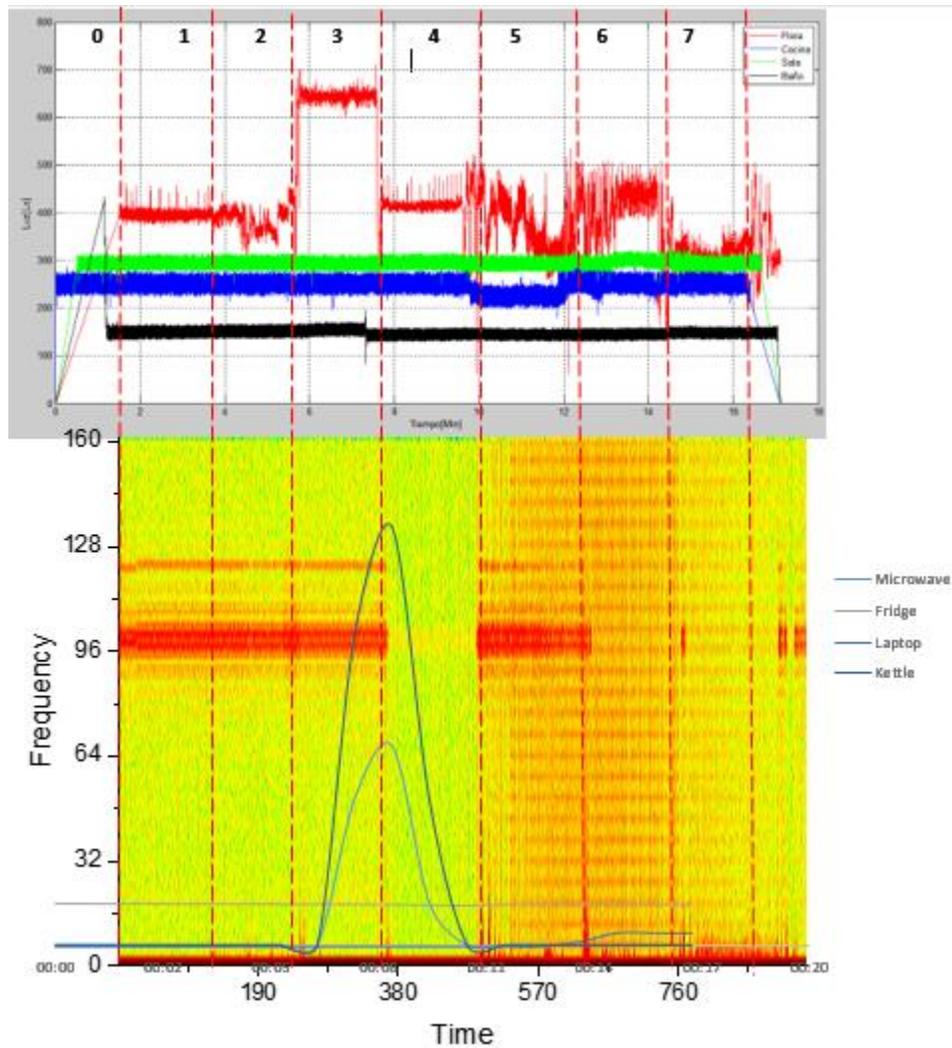


Ilustración 51 Vinculación de gráfico de espectrograma, gráfico de potenciómetro, y de luces medidas en diferentes cuartos para su análisis a las 20:00 horas

La señal representativa del cambio se muestra en el dominio del tiempo al variar según la cantidad de luz en el cuarto. Mientras que en el dominio de la frecuencia se muestra una señal parcial de luz artificial no presente en la sala, debido a su intensidad.

Resumen.

Las pruebas descritas en este capítulo, nos muestran de qué manera el espectro electromagnético de la luz, se observa en dos diferentes variables las cuales pueden ser separadas y representadas en una gráfica de espectrograma y medidas por su cantidad de amplitud y luminancia.

A partir de los resultados, ahora se es capaz de conocer la fuente de la luz, sea solar o artificial, además de estimar que hora del día se está midiendo, esto a partir de los resultados obtenidos, por ejemplo:

Por la mañana, los resultados de la medición, muestran un claro espectrograma sin variación de amplitud, resultado de la señal natural del sol, a excepción de cuando se cambia de cuarto ya que se muestra ruido en la frecuencia, producto del cambio de intensidad.

Por la tarde una combinación de ambas señales, derivado de la señal artificial y natural, se muestran con poca amplitud al apenas ser visible.

Por la noche, una gran variación de la intensidad de luz mostrada en el gráfico del dominio del tiempo, y sorprendentemente la señal de la luz solar reflejada por la luna en el gráfico del dominio de las frecuencias, presente en los cuartos más expuestos por la luz lunar.

De esta forma, se conoce como varia la señal de luz en diferentes tipos de cuartos, y si se puede crear una correlación a partir de la amplitud e intensidad, entre el gráfico en dominio del tiempo, el gráfico del dominio de la frecuencia y la potencia de los electrodomésticos empleados, intentando determinar la actividad realizada.

Los experimentos previos son el resultado de meses de investigación y muchas pruebas con la señal de luz, intentando resolver dos de las preguntas planteadas inicialmente, ¿se puede reconocer la naturaleza de la señal de luz? Y ¿Se puede determinar la actividad a partir del análisis de señal? A continuación, se obtendrá una respuesta con base en los resultados obtenidos.

5. Resumen

El consumo desmedido de energía en nuestro planeta, se torna de manera exponencial que consecuentemente genera un mayor consumo de los recursos naturales y no renovables, los cuales son finitos para el planeta. Afortunadamente la concientización de la sociedad hacia el medio ambiente, y la inversión en el desarrollo de tecnologías renovables dan pie a investigaciones como la presente que tienen el propósito de establecer las bases para el desarrollo de edificios inteligentes capaces de poder controlar el consumo total de energía, sin interrumpir la comodidad de los usuarios. La opción de energías renovables como la solar, eólica o mareomotriz requiere de inversión capital, tiempo y espacio, que pueden afectar a la ecología del lugar durante su implementación.

Se ha demostrado que un comportamiento ahorrador dentro de los edificios residenciales, ya sean oficinas o departamentos, puede generar ahorros de hasta 30% menos. Las principales fuentes de consumo energético por orden son la calefacción y aire acondicionado, la ventilación, la iluminación, los aparatos eléctricos de uso común, y otros. Pero el usuario se vería en la compleja tarea de acoplamiento cada uno de ellos cada vez que variara la temperatura o luz dentro del espacio habitado, por lo que la implementación de sistemas inteligentes que se acople automáticamente a la preferencia del usuario y medio en el que se encuentran, genera una solución inmediata de bajo coste y accesible para todos los oficinas y hogares.

Para llegar a esto el reconocimiento de actividades es esencial, debido a que, si el sistema inteligente logra determinar que estás haciendo en tiempo real, este acoplará lo demás aparatos y sistemas consumidores de energía a esa actividad. Además, el mismo sistema debe conocer las condiciones ambientales en las que se encuentra, además de las preferencias del usuario, es decir variable como temperatura e iluminancia dentro del espacio habitado. Como ejemplo sencillo, si el usuario se encuentra en la sala viendo la televisión a las 5:00 de tarde, el sistema reconocerá esta actividad por lo que el cuarto habitado acoplará la luz preferencial para observar la televisión y al mismo tiempo aprovechando la luz solar todavía presente, mientras que en los demás cuartos se corta el consumo de energía. La investigación presente se realizó fundamentada en que alrededor del 25% de energía consumida en un complejo residencial es debido a la iluminación. La investigación establece las bases que pueden ayudar al desarrollo de dicho sistema inteligente, definiendo los estados en los que se podría presentar la luz, y al mismo tiempo intentar predecir cuál sería el comportamiento del usuario por medio de los cambios de intensidad de la luz.

El uso de tecnología de hardware y software fue requerido para este análisis, programando plataformas con microcontroladores para obtener información precisa y clara de la luz por medio de sensores ambientales. Las primeras pruebas realizadas nos demuestran que una alta frecuencia de obtención de datos, nos ayudan a observar mejor los cambios de intensidad en el cuarto, además de que, al usar herramientas matemáticas,

como la transformada de Fourier se logra cambiar del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias discriminando la señal de luz de cualquier otra señal, eliminando el ruido, y facilitando su observación y análisis. Este análisis tuvo que ser extrapolado debido a la condición de la señal que no era periódica, se vio forzado a usar la transformada corta de Fourier (STFT) la cual cuenta con una ventana móvil, que analiza cada determinado conteo de datos y tiempo, la señal obtenida arrojando datos de amplitud en dominio de la frecuencia. Esta información se observa a través de una gráfica o espectrograma que muestra la amplitud de frecuencia contra un periodo de tiempo.

6. Conclusiones

Con base en el estudio y resultados de las pruebas realizadas, y la información recolectada durante la investigación se logró determinar la naturaleza de la fuente de luz, esto a partir del análisis espectral de la frecuencia y amplitud de la señal.

Tomando como punto de partida el análisis controlado del laboratorio en cual la señal de luz meramente artificial muestra en el gráfico de espectrograma una sola señal de frecuencia caracterizando un promedio de 100 Hz además de ser consideradamente variable en cuanto intensidad, variando aproximadamente un 15% entre pico y pico de la amplitud medida, esto nos refiere a que el cuarto de laboratorio tenía las condiciones óptimas para esta prueba, excluyendo ruidos de fuentes externas.

Al correr la prueba para la medición de la señal de luz solar se realizó en un espacio abierto libre de luz artificial, de tal forma que se observa en el gráfico de espectrograma que es inexistente alguna frecuencia dominante, esto nos dice que la luz solar contiene demasiada información, ruido y señales dominantes, las cuales la transformada corta de Fourier no puede discriminar y mostrar. Para lograr el efecto deseado filtros de ruido serían requeridos para mostrar alguna frecuencia, pero para motivos y objetivo de la investigación esta respuesta caracterizará a la luz solar. Adicionalmente, la luz solar se muestra de carácter cuadrático para la intensidad de luz en el dominio del tiempo.

Y finalmente la prueba de combinación de ambas luces, artificial y solar medida en un cuarto idealizado al tener ambas luces bajo control por ventanas e interruptores. Se muestran dos frecuencias dominantes en el espectrograma, esto se refiere a una de 100 Hz para la luz artificial que con base en la primera medición donde para luz artificial la frecuencia es de 100 Hz, se infiere que esta frecuencia en esta amplitud corresponde a artificial. Y para la otra frecuencia dominante de 200 Hz donde por defecto se dice que es luz natural.

Conociendo cada una de estas características se logra exhibir que por medio del análisis de frecuencia y onda de la señal del espectro de la luz, podemos determinar la naturaleza de procedencia.

Correspondiente al objetivo planteado al reconocimiento de actividades a partir de la misma señal de luz, se creó un escenario real instalando sensores de luz en los cuartos de un apartamento habitado (edificio residencial), y con esto al mismo tiempo, usando un sensor de luz portátil para el usuario, el cual recorrería el apartamento realizando diferentes actividades (comer, caminar, sentarse, usar el celular, etc.) a determinadas horas del día.

Partiendo de la información recolectada de cada sensor se intentó correlacionar los datos obtenidos por los sensores en los cuartos y los datos obtenidos por el sensor móvil y de esta forma determinar si se puede tener el reconocimiento de actividades. Adicionalmente, se complementó el muestreo de datos con la información de un potenciómetro el cual arrojaría la potencia utilizada para cada vez que se usara el electrodoméstico previamente establecido dentro de la actividad.

Analizando los resultados recolectados por la mañana se observa que la luz solar es basta para todo el departamento dejando exento cualquier uso o señal de luz artificial (0 consumo de energía eléctrica), confirmándolo con en el espectrograma donde no existe ninguna señal dominante, característica de la luz solar. Se concluye que por la mañana (de 8 a 12 horas) la señal de luz mostrada en el espectrograma es nula, y basta para todos los cuartos en apartamento, dejando exento todo uso de luz de naturaleza artificial, generando ahorros de energía para el consumo eléctrico. Esto puede variar dependiendo de la preferencia del usuario se determina su uso.

Por la tarde, debido a la escasez de luz solar en los cuartos, se encienden las luces de naturaleza artificial, y al correr la prueba y observar los resultados se esperaba las dos frecuencias dominantes representativas ambas señales con igual magnitud, pero los gráficos de espectrograma de cada sensor en todas las serie de actividades mostraron un resultado imprevisto ya que las frecuencias fueron variables, dependiendo de cada cuarto donde se midió la luz, es decir la frecuencia se mostraba con mayor y menor amplitud dependiendo de la intensidad de luz que variaba con base a la posición del sensor en el cuarto, la luz solar que entraba por la ventana, la extensión del cuarto (amplitud de luz artificial) y el número de ventanas en el cuarto.

Fundamentado con la información anterior se exhibe que la intensidad y frecuencia de la señal de luz mostrada en el espectrograma correspondiente a cada cuarto, en un horario (vespertino) directamente proporcional a las variables o condiciones en las que se encuentra, es decir, se determinan como variables la cantidad de ventanas en el cuarto, numero de focos, extensión del cuarto y preferencia del usuario.

Tomando como referencia, el análisis de información obtenido en un horario vespertino, en la sala del apartamento, donde la luz solar se encuentra en mayor cantidad, se presenta la caracterizada 0 frecuencia o sin señal dominante, teniendo conocimiento que se encontraba un foco encendido en medio del cuarto, pero este resultado se vio afectado

debido al ventanal que abarcaba toda la extensión de la sala, por otro lado, para los cuartos que se caracterizan por estar encerrados, con poca señal de luz solar, se muestra con más valor de amplitud la señal de la luz artificial y poco visible a simple vista la señal de luz solar.

Se infiere que tomando en consideración las variables de cada cuarto, el uso de calibradores para cada variable serán necesarios para el análisis y medición de la señal, esto lograrían resultados óptimos evitando la diferencia de amplitud variante por la cantidad de luz en los cuartos, recomendando el uso de estos cuando la luz solar de la mañana se ve reducida, es decir en un horario vespertino.

Los resultados obtenidos durante el periodo nocturno, en un horario de 20 a 22 horas, donde primero se comprobó los escasos de luz solar, se observó el gráfico de espectrograma, y de nueva manera los resultados fueron sorprendentes, ya que se mostró presencia de luz solar mostrada en el espectrograma, donde se supone que sería totalmente dominante la frecuencia de la luz artificial, claramente se como señal dominante de 200Hz. A pesar de que se encontraba poco visible y la luz artificial se mostraba en mayor cantidad debido a su frecuencia, la medición no queda exenta de la luz solar o natural la cual se sugiere que es aquella reflejada por la luna. El sistema de medición en un horario nocturno, tendría que agregar la variable de estacionalidad de la luna, para calibrar los futuros resultados, y que no se vean afectados por la luz externa al cuarto.

La potencia medida con los potenciómetros, nos mostró picos con el uso del electrodoméstico cuando se tenía planeado usar el electrodoméstico, pero al hacer el comparativo con la señal de luz solar obtenida del sensor en la cocina, podemos concluir que la señal de potencia y al señal del sensor de luz no funciona para correlacionar la información y asignar una actividad a esa amplitud de potencia obtenida, es decir la señal de potencia queda obsoleta al no tener señal con que afianzarla. Este resultado era de esperarse debido a que no depende de ninguna variable, más que el uso que se le asigno. Para asignar esta variable a la ecuación del reconocimiento de señales a partir de la señal de luz, se podría usar algún dispositivo que emita luz significativa y sea recibida por el sensor en el cuarto y de esta manera correlacionar la actividad a la potencia.

Con respecto al reconocimiento de actividades, observando los resultados de estas pruebas nos muestran que los datos de señal de luz obtenidos de los sensores en los diferentes cuartos, se presenta de manera constante sin variar o representar mayor cambio con la presencia del usuario, sin en cambio el dispositivo portátil mostro variación fluctuante a cada cuarto en todos los horarios medidos.

Es decir no genera ninguna relación la señal de luz medida en el cuarto, con señal de luz medida con el sensor móvil representante de la actividad realizada durante la ocupación,

es decir no fluctúa por lo que el muestreo de señal para los sensores en los cuartos nos muestra que no sería de gran aprovechamiento para futuros análisis.

Finalmente, el ahorro de energía se basa en la reducción de consumo energético dentro del edificio residencial, esto se logra controlando el mismo por medio del buen aprovechamiento del recurso natural de la luz solar. Así que con las herramientas presentes en esta tesis, siendo sensores de luz y plataformas procesadoras de señales, nos ayudan a consecuentemente, la información obtenida de ser aprovechada lograría un control del consumo energético lumínico dentro del cuarto, obteniendo ahorros energéticos. A su vez el reconocimiento de actividades ayudaría a cumplir con la preferencia del usuario y la mejor distribución de este recurso dentro del espacio habitado, obteniendo aún más beneficios de esta herramienta.

Trabajo Futuro.

Una parte fundamental de este trabajo es el reconocimiento de actividades el cual se lograría con el uso de sensores, de tipo ocupacional, lo cual agregaría una variable dependiente de la ocupación en el cuarto y directamente proporcional al consumo energético.

El uso de un sistema inteligente que aprenda por sí mismo (Machine learning) apoyaría en el análisis de datos, calibrando los sensores e eliminando el ruido de la señal por medio de pronósticos e información recolectada a diario.

Adicionalmente, el uso de cámaras sensoriales que reconocen la actividad sería de gran ayuda, pero comprometería la comodidad del usuario en el espacio habitado.

El análisis NILM (*Nonintrusive load monitoring*) en español “Monitoreo de la carga no intrusiva” se refiere al concepto del análisis de cambios en el voltaje y corriente consumidos por algún sistema, ya sean electrodomésticos o aparatos eléctricos. Este análisis dentro del edificio residencial podría ser incorporado al análisis del consumo energético total y así observar cuando se consume en exceso y en qué periodo se ahorra, además de ayudar al reconocimiento de actividades siguiendo un patrón de consumo.

Las condiciones internas (luz artificial, cantidad de luz en el cuarto, actividad realizada) y externas (luz artificial, luz natural) del cuarto sumadas a la preferencia del usuario en una sola ecuación definirán la cantidad de luz necesaria para dicha actividad en determinado tiempo. Con lo cual el sistema inteligente adaptado controlara el consumo energético y finalmente generara el ahorro energético maximizando la eficiencia del cuarto.

Bibliografía

- [1] M. A. Tuan Anh Nguyen*, "Energy intelligent buildings based on user activity: A survey," in *Energy and Buildings 56 (2013)*, University of Groningen, Nijenborgh 9, 9747 AG Groningen, The Netherlands, September 2012.
- [2] T. W. B. C. f. S. D. EIA, "Annual Energy Review 2010, Annual report," October 2011.
- [3] J. O. C. P. L. Pérez-Lombard, «A review on buildings energy consumption Energy and Buildings,» 2008.
- [4] A. E. O. U.S, «Energy Information Administration,» 2015..
- [5] T. W. B. C. f. S. D. WBCSD, «Transforming the Market: Energy Efficiency in Buildings, Survey report.,» April 2009..
- [6] Juan Ignacio Burgaleta, «Gemasolar, The first tower thermosolar commercial plant with molten salt storage,» May 2011.
- [7] «Population Matters,» [En línea]. Available: <http://www.populationmatters.org/>. [Último acceso: 15 Mayo 2015].
- [8] M. R. J.K. Aggarwal, «Human Activity Analysis: A Review,».
- [9] G.J. Levermore, "Building Energy Management Systems: Applications to Low Energy HVAC and Natural Ventilation Control," London, 2000.
- [10] U. E. P. Agency, «Green Building Basic Information,» December 22, 2010.
- [11] D. E. C. E. E. C. M. Chan, «A review of smart homes Present state and future challenges,» 2008.
- [12] «eDIANA Project,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.artemis-ediana.eu/>. [Último acceso: 15 Mayo 2016].
- [13] «iSpace Project,» 2011. [En línea]. Available: <http://cswww.essex.ac.uk/iieg/idorm.htm>.

- [14] «CASAS Project,» 2011. [En línea]. Available: <http://ailab.wsu.edu/casas/>.
- [15] M. B. P. Davidsson, «Distributed Monitoring and Control of Office Buildings by Embedded Agents,» New York, NY, 2005.
- [16] G. O. A. R. D.T. Delaney, «Evaluation of energy-efficiency in lighting Systems using sensor networks,» New York, NY, USA, 2009.
- [17] «Bode Project,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.andes.ucmerced.edu/research/>. [Último acceso: Mayo 2016].
- [18] D. Wyon, «Individual control at each workplace for health, Comfort and productivity,» 1997.

Anexos.

Programa Arduino para la programación de plataforma DiamonBlack y FLORA tipo Arduino:

```
#include <SD.h> // Incluir biblioteca para comandos de funcionamiento de placa SD (SD Shield).
#include <SPI.h> //Incluir biblioteca para la comunicación interna de dispositivos.

const int chipSelect = 4; // Asignar pin de entrada para lectura de datos.
int count=0; //Asignación de valor de entrada para el conteo.
String dataString = ""; //Iniciación de cadena de valores

void setup() // Abrir las comunicaciones serie y esperar a que se abra el puerto:
{
  Serial.begin(9600); // Velocidad de Programa
  while (!Serial) { //Esperar a el puerto serie para conectar el puerto USB.
    ;
  }
  Serial.print("Initializing SD card..."); //Empezar a leer tarjeta SD
  pinMode(4, OUTPUT); //Leer pin 4 (donde esta la tarjeta SD)
  if (!SD.begin(chipSelect)) { //Ver si la tarjeta esta conectada
    Serial.println("Card failed, or not present"); // Si no esta conectada mandar mensaje de error
    return;
  }
  Serial.println("Card initialized."); // Si si esta conectado, inicializar empezar a leer y grabar información.
}

void loop() // Termino de configuración de programa , inicio de recopilación de información.
{
  int analogPin = 5; // Seleccionar el pin donde se encuentra la entrada del Sensor AMBI
  int sensor = analogRead(analogPin); // Leer información del sensor.
  count +=1; // iniciar conteo
  dataString += String(sensor); //Iniciar cadena de datos de lectura.
  dataString += "\n"; // Añadir espacio entre datos.
  delay(1); // Demora de tiempo entre datos.

  if (count==100){ //Condicional de numero de datos.
    File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE); //Crear archivo, e iniciar a grabar información en el.
    if (dataFile) {
      dataFile.println(dataString); //Grabar información cada 100 datos.
      dataFile.close();
    }
    count=0; // Terminar programa.
    dataString=""; //
  }
}
```